

Trabajo Fin de Máster  
Máster en Organización Industrial y Gestión de  
Empresas

**“Análisis de la eficiencia del sector forestal en  
Europa a través del análisis por envoltura de  
datos y la regresión fraccional”**

Autora: María José Córdova Villa

Tutora: Ester Gutiérrez Moya

**Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2025





Proyecto Fin de Máster  
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

**“Análisis de la eficiencia del sector forestal en  
Europa a través del análisis por envoltura de datos  
y la regresión fraccional”**

Autora:

María José Córdova Villa

Tutora:

Ester Gutiérrez Moya

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de  
Empresas I  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Máster: “Análisis de la eficiencia del sector forestal en Europa a través del análisis por envoltura de datos y la regresión fraccional”

Autora: María José Córdova Villa

Tutora: Ester Gutiérrez Moya

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El/La Secretario/a del Tribunal



# Agradecimientos

---

*A mi familia, por creer en mí y estar siempre presente pese a los kilómetros que nos separan.*

*A mis amigos, por hacer este trayecto un recuerdo eterno.*

*A mis profesores, en especial Ester, por darme la oportunidad de investigar sobre este tema y ser mi guía en todo el proceso.*

*Y a mi amado esposo, mi pilar y una de las personas más importantes en mi vida, por su amor incondicional y apoyo infinito.*

*María José Córdova Villa  
Sevilla, 2025*



Este trabajo presenta un análisis de la eficiencia de la industria forestal europea basado en un modelo de Análisis por Envoltura de Datos (DEA) en dos etapas. En una primera etapa, se determina la eficiencia relativa del sector forestal en 28 países pertenecientes a la Unión Europea (UE), considerados unidades de toma de decisión (DMUs), durante el periodo 2010-2020. En particular, el modelo utilizado se centra en las variables de holgura, donde la medida escalar de eficiencia se calcula mediante la evaluación directa de los excesos de insumos y los déficits de productos en las DMUs, de manera no radial.

Para ello, se consideran tres entradas/insumos (o *inputs*, proveniente de la terminología anglosajona) no discrecionales. Estas variables son: las personas empleadas a tiempo completo, la superficie de bosque disponible para suministro de madera y las existencias iniciales en crecimiento. Como variables de salida (u *outputs*, proveniente de la terminología anglosajona) se selecciona, la producción de madera en rollo, el valor agregado bruto y las existencias finales de crecimiento. Los países que presentan menores valores de eficiencia durante el periodo de estudio son Estonia, Letonia, Eslovaquia y Bulgaria. Además, se observa que Países Bajos es el principal modelo de referencia de producción forestal.

La segunda etapa del estudio tiene como objetivo la identificación de los factores exógenos que pudieran influir en los valores de eficiencia, para ello se ajusta un modelo de regresión fraccional a los valores de eficiencia acotados en el intervalo unidad. Las variables consideradas son de naturaleza económica (producto interior bruto, superficie de producción forestal), ambiental (temperatura, precipitación) y geográfica (regiones).

A los efectos de este estudio y debido a la diferencia escalar entre las variables, se tipifican los datos previamente. Esta transformación permite que las variables estén en la misma escala, lo que facilita una comparación e interpretación más precisa de los coeficientes del modelo.

Las variables que destacan, por orden de significatividad en los modelos fraccionales, son las regiones geográficas, la superficie terrestre (TIERRA) y la temperatura (TEMP). La región Sur-Oeste muestra el mayor impacto positivo sobre la eficiencia, seguida por las regiones Centro-Oeste, Norte y Centro-Este, todas con coeficientes positivos y estadísticamente significativos, especialmente en el modelo fraccional *loglog*.

Las estimaciones de las distintas especificaciones de la regresión fraccional son consistentes en términos de signo y significancia, lo que evidencia una relación coherente entre las variables seleccionadas y la eficiencia.

Los resultados de este estudio muestran la idoneidad del modelo DEA como una herramienta versátil y robusta frente a valores anómalos para la medición de la eficiencia en el sector forestal, lo que permitiría establecer un marco de referencia para futuras estrategias de gestión forestal y políticas nacionales.

Este enfoque expone iniciativas y buenas prácticas para la gestión sostenible de los bosques, destacando las inversiones en tecnologías sostenibles para gestión de recursos forestales y programas locales de reforestación. Estas implementaciones están vinculadas con las estrategias y compromisos que tiene la UE con respecto a la mitigación del cambio climático y la protección de la biodiversidad.

Palabras clave: DEA – Eficiencia relativa – Holguras – Sector forestal europeo – Segunda etapa – Regresión Fraccional.

# Abstract

---

This study presents an analysis of the efficiency of the European forest industry based on a two-stage Data Envelopment Analysis (DEA) model. In a first stage, the relative efficiency of the forestry sector in 28 countries belonging to the European Union (EU), considered as decision making units (DMUs), during the period 2010-2020 is determined. In particular, the model used focuses on slacks variables, where the scalar measure of efficiency is calculated by directly assessing excess inputs and deficits of outputs in DMUs, in a non-radial way.

For this purpose, three non-discretionary inputs are considered. These variables are the number of full-time employees, the area of forest available for timber supply and the initial growing stock. The output variables selected are roundwood production, gross value added and final growing stock. The countries with the lowest efficiency values during the study period are Estonia, Latvia, Slovakia and Bulgaria. In addition, it is noted that the Netherlands is the main reference model for forestry production.

The second stage of the study aims to identify the exogenous factors that could influence the efficiency values. For this purpose, a fractional regression model is fitted to the efficiency values delimited in the unit interval. The variables considered are economic (gross domestic product, forest production area), environmental (temperature, precipitation) and geographical (regions). For the purposes of this study and due to the scalar difference between the variables, the data are pre-typed. This transformation allows the variables to be on the same scale, which facilitates a more accurate comparison and interpretation of the model coefficients.

The variables that stand out, in order of significance in the fractional models, are geographic regions, land surface (TIERRA) and temperature (TEMP). The South-West region shows the greatest positive impact on efficiency, followed by the Central-West, North and Central-East regions, all with positive and statistically significant coefficients, especially in the fractional loglog model.

The estimates of the different specifications of the fractional regression are consistent, in terms of sign and significance, which shows a coherent relationship between the selected variables and efficiency.

The results of this study show the suitability of the SBM-DEA model as a versatile and robust tool in the face of outliers for measuring efficiency in the forestry sector, which would allow establishing a reference framework for future forest management strategies and national policies.

In addition, this approach exposes initiatives and good practices for sustainable forest management, highlighting investments in sustainable technologies for forest resource management and local reforestation programs. These implementations are linked to the EU's strategies and commitments regarding climate change mitigation and biodiversity protection.

Key words: DEA - Relative efficiency - European forestry sector - Second stage - Fractional regression.



<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xviii</b>
<b>1 Objetivos del trabajo</b>	<b>1</b>
<b>2 Introducción</b>	<b>2</b>
<b>3 Revisión Bibliográfica</b>	<b>4</b>
<b>4 Descripción de datos</b>	<b>18</b>
4.1 Variables de Entrada	18
4.2 Variables de Salida	18
4.3 Cuadro descriptivo de las variables de estudio	19
4.4 Resumen estadístico de las variables	20
<b>5 Enfoque DEA propuesto</b>	<b>23</b>
5.1 Modelo DEA propuesto	23
5.1.1 Datos	23
5.1.2 Variables	24
5.2 Modelo propuesto de análisis de regresión	27
<b>6 Resultados Obtenidos</b>	<b>29</b>
6.1 Resultados de la evaluación de eficiencia mediante el modelo SBM	29
6.1.1 Análisis comparativo del periodo 2010-2020 con el periodo 2010-2015	30
6.1.2 Países Bajos como referencia significativa	33
6.1.3 Análisis comparativo y comportamiento del periodo 2016-2020	34
6.2 Resultados de la estimación del modelo de regresión fraccional	37
6.2.1 Sugerencias y aspectos a considerar para la mejora de la eficiencia en la industria europea de la madera	41
<b>7 Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>8 Referencias</b>	<b>44</b>
<b>Anexos</b>	<b>51</b>
Anexo 1: Holguras de producción (2010-2015 y 2010-2020)	51
Anexo 2: Holguras de producción (2010-2015, 2016-2020 y 2010-2020)	51
Anexo 3: Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2010-2015)	51
Anexo 4: Código del modelo en Rstudio – FASE 1	52
Anexo 5: Código del modelo en Rstudio – FASE 1 – Diagrama de dispersión	53
Anexo 6: Código del modelo en Rstudio – FASE 1 – Diagrama de caja de las variables de entrada y salida observada de los países ineficientes	53
Anexo 7: Código del modelo en Rstudio – FASE 2	54
<b>Glosario</b>	<b>57</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1. Descripción general de los estudios DEA sobre gestión forestal	7
Tabla 3-2. Descripción general de los estudios DEA sobre productos madereros	12
Tabla 4-1. Descripción de entradas y salidas	19
Tabla 4-2. Resumen estadístico de las variables en el periodo (2010-2020). Primera etapa	20
Tabla 4-3. Descripción de factores contextuales. Segunda etapa	21
Tabla 6-1. Valor de eficiencia y holguras de producción (2010-2020)	29
Tabla 6-2. Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2010-2020)	31
Tabla 6-3. Valor de eficiencia y holguras de producción (2016-2020)	35
Tabla 6-4. Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2016-2020)	36
Tabla 6-5. Validación de hipótesis del modelo lineal múltiple	37
Tabla 6-6. Validación de hipótesis del modelo lineal múltiple	38
Tabla 6-7. Resultados de las estimaciones por MCO y Regresión fraccional	39
Tabla 6-8 Media muestral de efectos parciales	41



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 4-1. Variables de entrada y variables de salida consideradas	19
Figura 6-1. Diagrama de caja de las variables de entrada y variables de salida observadas de los países ineficientes y valores específicos de los países Mavericks (círculo relleno) y Países Bajos (copo de nieve)	32
Figura 6-2. Eficiencia por país y región. Gráfico de valor individual de la eficiencia de los países de cada región forestal europea. El símbolo (×) representa el valor de la mediana	40



# Notación

$\xi_0$	Valor de eficiencia del SBM del país 0
$j$	Índice sobre los países
$EMPL_j$	Suma del número anual de personas empleadas a tiempo completo en el sector forestal en el país $j$ durante el periodo de tiempo de estudio.
$BDSM_j$	Suma de la cantidad anual de bosque disponible para el suministro de madera en el país $j$ durante el periodo estudiado.
$EX_I_j$	Existencias en crecimiento en el país $j$ al inicio del periodo de estudio.
$PROD_j$	Madera en rollo total producida por el país $j$ durante el período de estudio.
$VAB_j$	Valor añadido bruto total del sector en el país $j$ durante el período de estudio.
$EX_F_j$	Existencias en crecimiento en el país $j$ al final del período de estudio.
0	Índice del país específico cuya eficiencia y objetivo se están calculando.
$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$	Variables de intensidad utilizadas para calcular el objetivo como una combinación lineal convexa de las entradas y salidas observadas.
$holgura^{PROD}$	Mejora potencial en la producción total de madera en rollo.
$holgura^{VAB}$	Mejora potencial del valor añadido bruto.
$holgura^{EX-F}$	Mejora potencial del stock final en crecimiento.
$\leq$	Menor o igual
$=$	Igual
$+$	Suma
$\geq$	Mayor o igual
E	Valor esperado
$x_i$	Vector $k$ -dimensional de las variables climáticas/contextuales/económicas que estiman la eficiencia del $i$ -ésimo país de la Unión europea.
$\beta$	Vector $k$ -dimensional de parámetros desconocidos
$G(-)$	Función no lineal que satisface la condición $0 \leq G(-) \leq 1$
$\exp$	Exponencial
$\phi$	función de distribución acumulada de la distribución normal estándar.
$\partial$	Derivada
MCO	Mínimos Cuadrados Ordinarios
$H_0$	Hipótesis nula
$H_1$	Hipótesis alternativa



# 1 OBJETIVOS DEL TRABAJO

---

El sector forestal en la Unión Europea (UE) y los países de la Asociación Europea de Libre Comercio (AELC) se enfrentan a constantes desafíos debido a la creciente demanda de madera y a la influencia de políticas sectoriales impulsadas por la UE. Este sector tiene un impacto directo en la economía de los países, lo que hace necesario conocer los principales factores que influyen en su desarrollo.

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo un análisis comparativo de la eficiencia del sector de productos primarios de madera “en rollo” (troncos de los árboles sin copa y desramados) en países de la UE durante el período 2010-2020, utilizando el enfoque basado en el Análisis por Envoltura de Datos (DEA) de doble etapa. En primer lugar, se utiliza un modelo DEA, el cual es una técnica no paramétrica que permite incorporar entradas y salidas sin necesidad de asignar ponderaciones predefinidas a las variables, lo que lo convierte en una herramienta idónea para la evaluación del rendimiento forestal y la propuesta de posibles mejoras. Para ello, se procede a calcular y analizar la eficiencia relativa de 28 países de la UE durante el periodo de estudio previamente descrito, empleando el modelo SBM-DEA (en terminología anglosajona, Slack-Based Measure). Este análisis no solo permite identificar a los países más eficientes, sino también proporciona objetivos específicos en las variables de mejora para aquellos países con desempeño más bajo.

En segundo lugar, se analizan los factores externos que pudieran influir en los valores de eficiencia mediante un modelo de regresión fraccional. Este enfoque permitirá evaluar cómo afectan variables exógenas de tipo económico, geográfico y climatológico sobre los valores de eficiencia obtenidas.

La revisión de la literatura cumple un papel fundamental como parte de la investigación previa al desarrollo de este trabajo, ya que permite aproximarse al conocimiento actual que se ha desarrollado en el sector forestal y determinar cuáles son los modelos que mejor describen el comportamiento y ayudan a la eficiencia del sector

Se espera que este estudio demuestre que el enfoque propuesto puede ser una herramienta práctica y eficaz para evaluar y mejorar la eficiencia en el sector forestal. Asimismo, busca proporcionar información valiosa que sirva de base para diseñar estrategias forestales más sostenibles, impulsar la economía circular y fortalecer la competitividad de este sector tan importante para Europa.

## 2 INTRODUCCIÓN

---

El planeta y sus ecosistemas se encuentran en constante cambio, con transformaciones radicales y desafíos que exigen soluciones cada vez más complejas. El sector forestal y maderero, tanto a nivel global como europeo, se ha visto afectado por los cambios climáticos en las últimas décadas y, en respuesta, ha tenido que implementar nuevas estrategias que promuevan prácticas sostenibles en la industria, sin alterar el equilibrio ecológico ni comprometer la biodiversidad de los bosques.

Los bosques ofrecen soluciones a los desafíos mundiales en función del coste, la crisis climática y la biodiversidad para transformar sistemas más eficientes y sostenibles en favor de una mejor producción.

La temperatura de la superficie terrestre es superior cada año y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) ha provocado cambios en todos los sistemas naturales de la Tierra. El cese de la deforestación y degradación de bosques no solo reduce las emisiones mundiales GEI, sino también ayuda a la restauración de bosques y elimina carbono de la atmósfera, el cual puede almacenarse en productos madereros. Los bosques son capaces de regular las precipitaciones y estabilizar el clima.

En Europa, el sector forestal y de productos madereros se enfrenta a varios desafíos ante el cambiante contexto global, tales como los costes competitivos, el aumento de la demanda global, la necesidad de sustentabilidad, estrictas normativas ambientales, políticas de biodiversidad y gestión de suelo, nuevas tecnologías, innovación de productos madereros, entre otros retos que impulsan al sector forestal a modificar muchos de sus sistemas para adaptarse y seguir siendo competitiva y sostenible.

Los bosques de la UE se extienden a lo largo de 160 millones de hectáreas, lo que equivale a un 4% de la superficie forestal mundial. Además, cubren el 39% del territorio y los seis países con mayor superficie forestal arbolada (Suecia, Finlandia, España, Francia, Alemania y Polonia) representan dos tercios de la superficie forestal de la UE (Parlamento Europeo, 2023). En 2020, los bosques cubrían unos 4060 millones de hectáreas (31 %) de la superficie terrestre mundial. Se calcula que 420 millones de hectáreas de bosques se convirtieron a otros usos de la tierra entre 1990 y 2020 debido a la deforestación. (FAO *Global Forest Resources Assessment*, 2020).

Según el estudio comparativo de eficiencia del sector forestal europeo entre países publicado en 2022 (Gutiérrez & Lozano, 2022), la cobertura forestal en Europa ha aumentado los últimos años, debido a la implementación de programas de forestación y regeneración natural en tierras marginales, para cumplir con los compromisos de Europa en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático y las disposiciones del Protocolo Kioto. Hasta la fecha, la cobertura forestal sigue mostrando tendencias positivas pese a los desafíos que aún están presentes (*CO2 Revolution*, 2024). Algunos proyectos o programas como Proyecto MAIL o Gestión integrada del paisaje (FAO *Integrated Landscape Management*), han sido diseñados para alinearse con los objetivos climáticos de Europa.

En el marco de la lucha contra el cambio climático, Europa ha establecido múltiples tratados y regulaciones que refuerzan el papel de los bosques como reservas naturales y equilibrio ecológico. Destacan el Pacto Verde Europeo (*European Green Deal*) que busca la neutralidad climática para 2050 mediante medidas como la plantación de 3,000 millones de árboles; el Objetivo 55 (*Fit for 55*), enfocado en reducir emisiones GEI un 55% para 2030 (Consejo de la Unión Europea, 2024) y la Estrategia Forestal de la UE 2030 diseñada para la expansión y protección de los ecosistemas forestales (Comisión Europea, 2021). Complementan a estas iniciativas la Ley Europea del Clima (Comisión Europea, 2021), que impone restricciones legales para la captura de carbono y obliga a los Estados miembros a alcanzar neutralidad climática para 2050, y la revisión del Protocolo UTCUTS (UNFCCC, 2003), para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura que eleva los objetivos de absorción de CO<sub>2</sub> para 2030.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015), Europa produce volúmenes importantes de madera en rollo, productos primarios de madera y papel y es un exportador a nivel mundial. En 2022, la Unión Europea (UE) exportó un total de 57 millones de metros cúbicos de madera en rollo (FAOSTAT, 2022). Además, los cinco países de la UE que presentan mayor producción forestal de madera en rollo siguen siendo Alemania, Suecia, Finlandia, Francia y Polonia (FAOSTAT, 2023).

El sector forestal en Europa tiene un impacto significativo tanto económico como en el empleo, contribuyendo a múltiples industrias como la fabricación de muebles, producción de madera, papel y otros derivados, además de actividades de silvicultura y tala. El valor añadido a la economía de la UE por la silvicultura y explotación forestal y por las industrias asociadas a esta actividad económica representa el 1% del total del Valor Añadido Bruto de la UE en 2020, según indica la revista española de estudios agro-sociales y pesqueros (Chillón, 2024). Además, en 2022, 3,5 millones de personas estuvieron involucradas en actividades relacionadas con este sector (ILOSTAT, 2022). La tendencia general muestra un ligero aumento del 1.4% en el empleo en este sector hasta la actualidad.

En el marco de la Estrategia Forestal Europea 2030 (Parlamento Europeo, 2022), se prioriza el equilibrio entre el uso sostenible de los recursos forestales y la conservación ambiental, con el objetivo de asegurar que los bosques sigan siendo un pilar esencial en la transición hacia una economía verde. Además, esta estrategia enfatiza la importancia de mejorar la calidad de vida y fomentar el empleo en las zonas rurales, mientras se garantiza la protección de los bosques, la provisión de servicios ecosistémicos y su papel como depósitos naturales de carbono.

Según el informe de *El estado de los bosques del mundo 2024* (SOFO, 2024), las previsiones indican que la demanda mundial de madera en rollo podría aumentar hasta un 49 % entre 2020 y 2050, lo que hace aún más crucial la gestión eficiente de estos recursos forestales. Además, casi el 75% de la población mundial utiliza productos forestales no madereros en diferentes categorías, tales como: Alimentos, forrajes, medicina, perfumes, cosméticos, utensilios, artesanías, materiales de construcción, productos ornamentales, entre otros (FAO, 2024), lo que resalta la importancia de este sector no solo para la producción de madera, sino también para los productos derivados de los bosques.

En los últimos años, se han utilizado técnicas avanzadas como el Análisis Envolvente de Datos (DEA) para la evaluación de la eficiencia operativa del sector forestal desde una perspectiva de comparación entre países, considerando variables como la cantidad de personas empleadas, bosque disponible, existencias iniciales y finales en crecimiento, producción de madera en rollo y valor añadido bruto. Estas metodologías no solo identifican los niveles de eficiencia entre países, sino que también ofrecen objetivos de mejora específicos en el sector de productos primarios de madera en Europa.

Recientemente, se han identificado tendencias positivas en el uso de suelos boscosos, los cuales crean un ambiente adecuado para el desarrollo de la vegetación forestal. Sin embargo, aún existen obstáculos en la gestión de las crisis, como las plagas y el cambio climático, que afectan el rendimiento del sector en ciertas regiones de Europa (FAO, 2015).

Este trabajo tiene como objetivo el análisis de la eficiencia del sector forestal europeo durante el periodo 2010-2020, a través de la metodología DEA para la evaluación del desempeño de los países de la UE en la producción de productos primarios de madera, así como la identificación de las principales variables determinantes de la eficiencia en el sector.

Para alcanzar este objetivo, el estudio se estructura en siete secciones. En primer lugar, se presentan los objetivos del estudio, donde se describe la metodología utilizada para evaluar la eficiencia del sector forestal y los factores externos que pueden influir en ella. En segundo lugar, se incluye la introducción, que contextualiza la importancia del sector forestal en Europa, los desafíos que enfrenta y la necesidad de analizar su eficiencia mediante la metodología DEA. En tercer lugar, se lleva a cabo una revisión de la literatura y estudios previos que han aplicado el Análisis Envolvente de Datos (DEA) en el sector forestal. En cuarto lugar, se detallan los datos y las variables utilizadas en el estudio. En quinto lugar, se presenta y explica el enfoque DEA basado en dos etapas. En sexto lugar, se analizan los resultados obtenidos de la evaluación de eficiencia operativa de los 28 países de la UE durante el periodo 2010-2020 y se evalúan los factores exógenos que influyen en estos valores de eficiencia, mediante un modelo de regresión fraccional siguiendo un enfoque comparativo entre países. Finalmente se extraen las principales conclusiones del trabajo.

# 3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

**E**l Análisis Envolvente de Datos (DEA) es una técnica no paramétrica de programación lineal utilizada para la evaluación de la eficiencia relativa de unidades de decisión (DMUs, Decision Making Units) que transforma múltiples insumos en múltiples productos. La eficiencia se mide mediante un valor que oscila entre 0 y 1, donde 1 indica que una DMU es eficiente. Esta metodología permite la identificación de buenas prácticas y áreas de mejora. DEA ha sido ampliamente aplicada en sectores como la salud (Charnes et al, 1981; Hollingsworth, 2003), la educación (Thanassoulis, 1999), el transporte (Cullinane et al, 2006), la banca (Berger & Humphrey, 1997) y en el sector forestal (Gutiérrez & Lozano, 2013), para la evaluación de la eficiencia en el uso de recursos y la generación de salidas en distintos contextos y regiones.

DEA se ha aplicado al análisis de la eficiencia en diversas actividades relacionadas con la actividad forestal. Por ejemplo, Kao & Yang (1992) estudiaron la eficiencia técnica en plantaciones forestales; Pascual (2005) evaluó la gestión sostenible en el uso de recursos forestales; Sauer & Abdallah (2007) analizaron la eficiencia económica en el manejo de tierras forestales; Gutiérrez & Lozano (2013) aplicaron DEA para medir la sostenibilidad en el sector forestal; Alzamora & Apiolaza (2013) investigaron la eficiencia en cadenas de suministro forestal, y Sun et al., (2014) evaluaron la eficiencia medioambiental en la producción forestal. Estos estudios reflejan la versatilidad de DEA para abordar problemas de eficiencia en contextos forestales diversos y su contribución al desarrollo sostenible del sector.

A continuación, se realiza una revisión de los principales estudios de investigación publicados sobre el sector forestal (gestión forestal y productos madereros). La búsqueda se realiza de manera complementaria y fuertemente relacionada a la revisión bibliográfica recopilada hasta el 2022 en el artículo de Gutiérrez & Lozano (2022) y con búsqueda estructurada de palabras clave en las publicaciones. Como plataforma de búsqueda se usa principalmente Google Académico (<https://scholar.google.es/>) y la base de datos Scopus ([www.scopus.com](http://www.scopus.com)).

Las tablas 3-1 y 3-2 ofrecen una revisión general de las características de algunos estudios DEA relacionados con los bosques, con un total de 53 trabajos agrupados en dos categorías: estudios sobre gestión forestal y estudios sobre productos madereros, incluidos productos forestales procesados y materias primas.

Dentro de la aplicación de DEA en el sector forestal, específicamente para la gestión forestal, se han incorporado estudios abarcando una amplia gama de países. Los artículos como los de Gutiérrez & Lozano (2022), Staňková et al., (2023) y Neykov et al., (2023) son contribuciones publicadas sobre la aplicación de DEA en la industria forestal que tratan comparaciones entre países de la Unión Europea. Además, se observan estudios enfocados en parques, bosques, asociaciones de propietarios, juntas forestales públicas, estados, industrias forestales, recursos forestales, provincias, municipios, unidades de gestión forestal, operaciones de cosecha de bosques, distritos, empresas, granjas, parcelas, sectores forestales, entre otros.

Por otro lado, con respecto a los productos madereros, la mayoría de los estudios DEA se han centrado exclusivamente en productos específicos, tales como: tablero lineal, contratistas de tala, pulpa y papel, madera en rollo, madera aserrada, madera y productos de madera, paneles de madera, operaciones de aprovechamiento forestal, contratistas de tala, sistemas de cosecha forestal, entre otros.

La mayoría de los trabajos analizados aborda el análisis de la eficiencia a través del modelo radial-CCR con retornos a escala constante (Charnes et al., 1978). Sin embargo, también se encuentran, aunque en menor medida, investigaciones que utilizan el modelo radial-BCC con retornos a escala variable (Banker et al., 1984). En este contexto, la orientación define si el enfoque del modelo está dirigido a reducir los insumos o a aumentar los productos. El término “radial” indica que las mejoras se realizan de manera proporcional en todas las dimensiones, manteniendo constante la combinación de insumos o la combinación de productos. La principal diferencia entre ambos modelos radica en sus supuestos sobre los rendimientos a escala: el modelo CCR asume rendimientos constantes a escala (CRS), mientras que el modelo BCC considera rendimientos variables a escala (VRS).

Entre algunos estudios destacados que incluyen modelos CCR se encuentran los de Chen et al., (2020) y Akay (2022). Para modelos BCC, se encuentran algunas investigaciones como las de Susaeta et al. (2023) y Zadmirzaei et al., (2017).

Cabe destacar que algunos de los estudios muestran también la aplicación del Índice de Malmquist (IPM). Este último es una medida que se utiliza para analizar cambios en la productividad total de los distintos factores entre periodos de tiempo y se divide en dos componentes principales: el cambio en la eficiencia (mejor uso de recursos) y el cambio tecnológico (mejoras en las posibilidades de producción). En otras palabras, esta metodología mide la capacidad de cambio de la DMU para transformar insumos en productos, en comparación con el desempeño de periodos anteriores. Siguiendo esta metodología, se destacan los trabajos de Kao (2010) y Yang et al., (2016).

Las tablas 3-1 y 3-2 contienen una descripción general de los estudios DEA sobre gestión forestal y productos madereros.



Tabla 3-1. Descripción general de los estudios DEA sobre gestión forestal

País/Región	Unidades de decisión (años)	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	Modelo DEA	Referencia
EEUU	80 parques Nacionales	Empleados permanentes, empleados a tiempo parcial, empleados temporales, edificios orientados a visitantes y no visitantes, millas de senderos, millas de carreteras.	Superficie total, viajes realizados, contactos de visitantes de viajes, charlas en vivo, contactos de charlas en vivo, personas en senderos, edificios clasificados, visitas recreativas, horarios de visitas recreativas, pernoctaciones en campamentos/zonas rurales, artefactos catalogados de museos, estructuras prehistóricas, total de estructuras clasificadas, artefactos en la colección del parque, contactos del centro de visitantes.	CCR (varias especificaciones de entradas/salidas)	Rhodes (1986)
Taiwán	13 bosques nacionales (1978-1987)	Presupuesto (US\$), dotación inicial (103 m3), mano de obra (personas), tierra (ha).	Timber production (103m3), average stocking (103 m3), recreation (visits), by-products (US\$).	BCC (Orientación de salida)	Kao et al. (1993)
Japón	28 asociaciones de Propietarios de Bosques (FOA) (1991-1994)	Miembros de la FOA, personal, propietarios de bosques privados de más de 50 ha, trabajadores forestales regulares, fondo de inversión, área forestal jurisdiccional, activos, costos, existencias de maquinaria de cosecha, aserraderos de más de 50 Kw, área de capacidad de almacenamiento de madera, venta de madera, producto de madera, área de reforestación, área de aclareo, cosecha de troncos.	Ingresos, ganancias, total de empleados forestales.	CCR	Shiba (1997)
Finlandia	19 juntas forestales públicas (1993-1994)	Gastos de mano de obra, viajes y materiales.	Resultados relacionados con las juntas forestales.	Regresión Tobit orientada a resultados CCR/BCC (claridad del trabajo, apoyo de la dirección, diseño y satisfacción del trabajo, clima organizacional, existencias forestales en la zona, importancia de la forestación en la zona)	Viitala & Hänninen (1998)

<b>País/Región</b>	<b>Unidades de decisión (años)</b>	<b>Variables de entrada</b>	<b>Variables de salida</b>	<b>Modelo DEA</b>	<b>Referencias</b>
Taiwán	17 bosques nacionales (promedio 1979-1988)	Tierra (1000 ha, mano de obra (personas), gasto (106US\$), stock inicial (106 m3).	Producción de madera (103 m3), conservación de suelos (106 m3), recreación (103 visitas).	Índice de productividad de Malmquist de ponderaciones comunes	Kao (2010)
Brasil	14 estados (2007)	Costo operativo agregado, salarios agregados.	Ingresos netos.	BCC (orientación de entrada)	Dos Santos (2011)
Turquía	37 bosques nacionales (2009)	Capital (TL), área total (ha), área forestal (ha), área forestal productiva (ha), costos de producción (TL), costos de empleados (TL), cantidad de empleados técnicos (personas), cantidad total de empleados (personas).	Cantidad de producción (m3), Ingresos por ventas (TL), Cantidad de ventas (m3), Valor agregado (TL).	CCR/BCC (orientación de entrada)	Korkmaz (2011)
Croacia	48 bosques nacionales (2006)	Tierra (1000 ha), existencias en crecimiento (106 m3), gastos (105 HRK), mano de obra (personas).	Ingresos (105HRK), producción de madera (m3/ha), inversiones en infraestructura (km), renovación biológica de los bosques (ha).	CCR/BCC (orientación de salida)	Šporčić & Landekić (2014)
China	8 industrias forestales estatales (2001-2011)	Fondo de inversión fijo, número de trabajadores en activo, costes totales.	Ventas, producción total.	Índice de productividad de Malmquist	Yang et al. (2016)
China	31 UMD (2008-2012-2013) Recursos forestales - Provincias y municipios del interior	Inversión forestal, empleados, superficie forestal.	Valor de la producción forestal, producción de madera, almacenamiento forestal.	CCR (orientación de entrada) / (orientación de salida), índice de productividad de Malmquist	Li et al. (2017)
Irán	24 bosques nacionales (período de 10 años)	Superficie (ha), existencias en crecimiento antes de la gestión forestal (m3/ha), costes de plantación (TIR/ha), costes de construcción de carreteras (millones de TIR/ha).	Ingresos por cosecha (TIR/ha), stock después de la gestión forestal (m3/ha).	BCC Orientado a la salida, variables de entrada discrecionales/no discrecionales	Zadmirzaei et al. (2017)

País/Región	Unidades de decisión (años)	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	Modelo DEA	Referencias
China	31 provincias y municipios (2005-2013)	Inversión forestal, empleados, área forestal.	Valor de la producción forestal, producción de madera, almacenamiento forestal.	BCC (orientación de entrada), Índice de Malmquist	Li Lei et al. (2017)
España	28 países de la UE (2010-2015)	Personas empleadas, bosque disponible para suministro de madera y existencias iniciales en crecimiento.	Producción de madera en rollo, valor añadido bruto, existencias finales en crecimiento.	SBM DEA (orientación de salida)	Ester Gutiérrez & Sebastián Lozano (2022)
China	30 provincias (2003-2017)	Tierra, trabajo y capital	Beneficios económicos, beneficios sociales, beneficios ecológicos	CCR	Ni Chen et al. (2020)
Irán	33 unidades de gestión forestal (2016-2018)	Stock 1, carbono secuestrado en el stock 1, costos fijos, costos variables.	Ingresos por cosecha, stock 2, carbono secuestrado en el stock 2, tarea de protección forestal, tarea de reasentamiento de ganado, emisión de CO2.	CCR (orientación de entrada)	Mohammadi Limaei & Soleiman (2020)
Nueva Zelanda	73 operaciones de cosecha de bosques individuales (2009-2018)	Número de trabajadores, número de máquinas, promedio de horas de trabajo programadas por día, tamaño del área de cosecha, tamaño promedio de la pieza.	Productividad del sistema.	DEA (orientación de salida), Malmquist	Okey Francis Obi & Rien Visser (2020)
Polonia	113 distritos forestales (2008 a 2012)	Eficiencia financiera: Costos de tala, costos de gestión forestal, costos de administración forestal, otros costos administrativos. Eficiencia de los recursos económicos: Área de un distrito forestal, empleo, existencias en crecimiento.	Eficiencia financiera: Ingresos totales de la venta de madera. Eficiencia de los recursos económicos: Volumen de madera talada.	Tobit, BCC (orientación de entrada)	Wojciech Młynarski et al. (2021)
Bulgaria y Eslovaquia	8 empresas forestales (2014-2018)	Costos de mano de obra y costos de materiales, costos laborales, costos de materiales, otros costos.	Ingresos, visitantes, número de locales.	CCR, BCC (orientación de entrada), SFA, Índice de Malmquist	Nikolai Neykov et al. (2021)
China	31 parques forestales (2009-2018)	Superficie de la tierra, inversión, fondos de protección ecológico, guía turístico, personal.	Área acumulada, vehículos y barcos, recorridos, camas, comidas, turistas, ingreso por turismo, empleos en turismo social.	SBM no orientado	Xiu-juan Huang et al. (2022)

País/Región	Unidades de decisión (años)	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	Modelo DEA	Referencias
China continental	30 provincias y regiones autónomas (1990-2019)	Utilización de materias primas y energía, presiones ambientales.	Aumento en la calidad de vida, producción de valor monetario.	SBM, Tobit	Minyan Z. et al. (2022)
China	3706 granjas forestales estatales (2008-2018)	Tierra (superficie total de explotación), trabajo (número total de empleados), capital (gasto total de una granja forestal).	Ingreso total de una granja forestal (operativo y fondos de compensación por beneficios ecológicos forestales), almacenamiento de carbono (beneficio del secuestro de carbono).	BCC (orientación de salida), Tobit	Chen Liang et al. (2022)
Turquía	28 direcciones forestales regionales (2015-2020)	Número de empleados forestales, área forestal, material forestal en crecimiento, tala permitida y longitud de los caminos forestales, longitud de la reparación y el mantenimiento de los caminos forestales.	Cosecha industrial de madera, leña	CCR (orientación de entrada / orientación de salida)	Anil Orhan Akay (2022)
China	32 empresas forestales (2014-2019)	Activos totales (capital), número de empleados (trabajo), costos operativos (inversión en la adquisición de tierra).	Ingreso operativo, ganancia neta.	CCR, DEA de supereficiencia, Índice de Malmquist	Mingxing Li et al. (2023)
EEUU	2282 parcelas forestales (1977-2015)	Precipitación total anual (mm), productividad del sitio (m <sup>3</sup> /ha/año), temperatura mínima media anual (°C), temperatura máxima media anual (°C), antigüedad de la parcela (años), densidad de árboles (árboles/ha).	Producción de madera (m <sup>3</sup> / ha), carbono secuestrado (toneladas C/ha/año), rendimiento de agua (toneladas), riqueza (nivel 1–10).	BCC (SBI) (orientación de salida)	Andres Susaeta et al. (2023)
China	30 provincias y ciudades (2008-2021)	Mano de obra forestal (número de empleados), capital forestal, construcción ecológica forestal, infraestructura forestal.	Producción deseada, resultados no deseados.	BCC (orientación de entrada), Tobit	Junlan Tan et al. (2023)
China	30 provincias (2005 -2019)	Tierra, trabajo, capital	Valor total de la producción forestal	CCR (orientación de salida), Índice de Malmquist	Mingming Jin et al. (2023)
Unión Europea	18 países (2016-2020)	Empleados (miles), superficie de terreno boscoso (miles de hectáreas), volumen de madera (miles de metros cúbicos).	Producción de madera en rollo (miles de metros cúbicos), valor añadido (millones de euros).	CCR (orientación de entrada)	Michaela Staňková et al. (2023)

País/Región	Unidades de decisión (años)	VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA	Modelo DEA	Referencias
Unión Europea	25 países (2015-2020)	Compras totales por empleado, coste de personal por empleado,	Ingresos por empleado, valor añadido por empleado	DEA de dos etapas, CCR (orientación de entrada).	Nikolai Neykov et al. (2023)
Unión Europea	29 sectores forestales europeos (2011-2020)	Empleado (personas-año), área forestal (ha año), volumen de madera.	Madera en rollo, leña y otros productos básicos, económico agregados de la silvicultura, protector funciones de bosques.	DEA de dos etapas, Índice de productividad de Malmquist, BCC (orientación de salida)	Alireza Amirteimoori et al. (2023)
Bulgaria	86 parcelas de tierra (2016-2020)	Precio de cada parcela.	Valor de la madera del bosque, valor del hábitat, área de cada parcela.	CCR (orientación de salida)	Nikolay Neykov et al. (2024)
Países de Europa, Asia y América del norte	49 sectores forestales (2015-2020)	Superficie forestal, existencias forestales en crecimiento, planificación de la gestión forestal.	Stock de biomasa sobre el suelo, precios unitarios de exportación de madera en rollo industrial, retiradas de madera, CO2 emitido por incendios forestales.	DEA estocástico extendido (orientación de salida).	Alireza Amirteimoori et al. (2024)
China	31 provincias (2001-2020)	Área forestal, inversión, empleados.	Valor de la producción forestal, producción de madera, volumen de existencias forestales.	DEA-SBM	Wasi ul Hassan Shah et al. (2024)
Corea	172 bosques recreativos naturales nacionales, públicos y privados (2016-2020)	Costos laborales, impuestos y otros gastos, personal de gestión.	Ingresos, visitantes, número de locales.	BCC (orientación de salida), CCR, Índice de Malmquist	Seung Yeon Byun et al. (2024)

Tabla 3-2. Descripción general de los estudios DEA sobre productos madereros

<b>País/Región</b>	<b>Producto maderero</b>	<b>Unidades de decisión (años)</b>	<b>Variables de entrada</b>	<b>Variables de salida</b>	<b>Modelo DEA</b>	<b>Referencias</b>
Sur de EEUU	Contratistas de tala	109 DMUs (1988–1994)	Capital (US\$), consumibles (US\$), costos laborales (US\$).	Madera (toneladas).	CCR-BCC (orientación de entrada)	LeBel & Stuart (1998)
América del norte	Tablero lineal	65 DMUs (1994)	Fibra (BDST/FST), combustible (103 m <sup>3</sup> /FST), productos químicos (lb/FST), mano de obra operativa (hombre-h), energía (kWh/FST), materiales (unidad/FST), entrega (milla/FST).	Producción de toneladas cortas terminadas (anual).	BCC (orientación de entrada)	Yin (1998)
Cuenca del Pacífico	Pulpa y papel	70 DMUs (1994)	Fibra (US\$), energía (US\$), mano de obra (US\$), materiales (US\$), productos químicos (US\$).	Pulpa Kraft de madera blanda blanqueada (tonelada).	BCC (orientación de entrada)	Yin (1999)
EEUU, Canadá, Rusia, América Latina, Asia-Oceanía, Suecia, Finlandia	Pulpa	102 DMUs (1996)	Fibra (tonelada métrica completamente seca), energía (103 m <sup>3</sup> ) (gas), mano de obra (hora-hombre), materiales (unidad).	Pulpa Kraft de madera blanda blanqueada (tonelada).	BCC (orientación de entrada)	Yin (2000)
Brasil	Madera en rollo	255 DMUs (1995)	Capital (US\$ 1985), mano de obra (ETC), tierra cultivada (km <sup>2</sup> ), área (km <sup>2</sup> ).	Madera en rollo (m <sup>3</sup> ), producción de ganado (cabezas), arroz (toneladas), maíz (toneladas), frijol (toneladas), yuca (toneladas), plátano (toneladas).	Regresión Tobit orientada a resultados del BCC (porcentaje de superficie de tierra con títulos, gasto en servicios gubernamentales, densidad de población, aserraderos por km <sup>2</sup> )	Otsuki et al. (2002)

País/Región	Producto maderero	Unidades de decisión (años)	Variables de entrada	Variables de salida	Modelo DEA	Referencias
Noruega	Madera aserrada	Número variable de DMU (panel desequilibrado) (1974-1988); 1991	Troncos para aserrar (m3), mano de obra (horas-hombre), capital (NOK), electricidad (kWh), fueloil (toneladas), madera para planificación (m3).	Madera aserrada (m3), madera cepillada (m3), astillas (m3).	CCR, Regresión Tobit orientada a la entrada (logaritmo de entrada, salida, capital)	Nyrud & Bergseng (2002)
Canadá	Pulpa y papel	36 DMUs (1959-1994)	Energía, capital, trabajo, materiales.	Pulpa/papel/cartón, demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos totales.	BCC. Regresión de Tobit orientación de entrada (densidad forestal, proporción de madera dura en la producción total de madera en rollo, producción media de madera en rollo por establecimiento, relación entre el capital de construcción e ingeniería y el área cosechada)	Hailu & Veeman (2003)
Países de la OCDE	Pulpa y papel	17 DMUs (1991-2000)	Capacidad de pulpa de madera, capacidad de papel y cartón, número de empleados.	Pulpa de madera Papel y cartón.	Malmquist (orientación de salida)	Hseu & Shang (2005)
España	Madera y productos de madera. Pulpa y papel Muebles de madera	15 DMUs (1998-2001)	Empleados (número de personas), fondos de accionistas (103 e), préstamos (103 e), gastos de I+D (103e), asociaciones de I+D.	Ventas (103 e), Utilidad antes de impuestos (103 e), Patentes, Innovaciones de productos, Innovaciones de procesos.	CCR/BCC Regresión logística orientación de entrada (gastos en I+D, asociaciones en I+D, patentes, innovación de productos/procesos)	Díaz-Balteiro et al. (2006)
Columbia Británica (Canadá)	Madera aserrada	82 DMUs (1990-2002)	Troncos procesados (103 m3), empleados (personas).	Madera (103 pies tablares), astillas de madera (103 unidades secas).	Índice de Malmquist orientación de salida CCR/BCC	Salehirad & Sowlati (2007)
Irán	Paneles de madera	10 DMUs (2002-2006)	Ingresos de operación (US\$), utilidad neta (US\$), sello total (US\$).	Costo total (US\$), Suma de activos (US\$)	Window analysis DEA, SBM orientación libre	Hemmasi et al. (2011)

País/Región	Producto maderero	Unidades de decisión (años)	Variables de entrada	Variables de salida	Modelo DEA	Referencias
Canadá	Maderas	24 DMUs (1999–2003; 2004–2008)	Entrada de madera (m3), horas-hombre, ELECTRICIDAD (GJ), combustible de madera (GJ).	Producción de madera (m3).	CCR (orientación de entrada)	Upadhyay et al. (2012)
Irán	Madera aserrada, Tableros a base de madera, Pulpa y papel	14 DMUs (2010)	Costos fijos (construcción de caminos, mantenimiento, plantación, administración), costos variables (cosecha, transporte de madera), ingresos por tamaño de camino (intermedio).	Ingresos en el mercado, utilidad	Modelo DEA de dos etapas	Limaei (2013)
Nueva Zelanda	Operaciones de aprovechamiento forestal	106 DMUs (2009–2015)	Número de días de cosecha (unidades), número de máquinas (unidades), área total de cosecha (ha), número de tipos de troncos (unidades), madera cosechada (toneladas), tamaño de la pieza (toneladas/tronco), distancia de extracción (m).	Volumen total de madera extraída.	Regresión Tobit orientación de salida CCR/BCC (región, tamaño de la operación, pendiente del terreno, clasificación de registros, tamaño de las piezas)	Obi & Visser (2017)
Nueva Zelanda	Contratistas de tala	5 contratistas de tala (2009-2015)	Número de días de cosecha, número de máquinas, área total de cosecha, número de clasificaciones de troncos, volumen total de madera, trabajadores, tamaño de la pieza, distancia de extracción.	Productividad del sistema.	CCR, BCC (orientación de salida)	Francis Obi et al. (2017)
Miembros Europeos	Papel y pulpa	17 DMUs (1995–2006)	Insumos intermedios (106 int.US\$), capital social (106 int.US\$), número de empleados (miles de personas).	Producción bruta (106 000 000 USD), emisiones de CO2 (miles de toneladas).	Función de distancia direccional. Índice secuencial de Malmquist	Li et al. (2018)
Indonesia	Muebles de madera	10 PYME de muebles de madera	Mano de obra empleada, costos de mano de obra (generales, materias primas, materiales de apoyo).	Cantidad de muebles de madera producidos en unidades.	CCR (orientación de entrada / orientación de salida)	Diana P. Sari et al. (2018)

País/Región	Producto maderero	Unidades de decisión (años)	Variables de entrada	Variables de salida	Modelo DEA	Referencias
Nueva Zelanda	Sistemas de cosecha forestal	67 contratistas de cosecha forestal (2009-2015)	Días de cosecha, número de máquinas, tamaño del área de cosecha, clasificación de troncos, producción de madera extraída de la cosecha, número de trabajadores, tamaño de las piezas, distancia de extracción.	Productividad de la cosecha (volumen de madera).	DEA de dos etapas, CCR, BCC (orientación de salida)	Okey Francis Obi (2018)
Canadá	Aserraderos	125 aserraderos de Ontario (1999-2015)	Madera en rollo (m3), número de empleados.	Producción de madera (m3).	DEA (Bootstrap), CCR, BCC (orientación de entrada)	Shashi K. Shahi & Mohamed Dia (2019)
EEUU	Aserraderos	146 aserraderos durante cuatro años de encuesta (2003, 2008, 2013, 2017)	Cantidad de troncos, mano de obra (empleados a tiempo completo), capital.	Madera en rollo, residuos.	Índice de Malmquist, Tobit	Sol de Changyou et al. (2021)
Canadá	Pulpa y papel de madera en rollo y fibra reciclada	224 fábricas de pulpa y papel de madera en rollo y fibra reciclada de Ontario (1999-2015)	Material en metros cúbicos de madera en rollo y/o fibra reciclada consumida, mano de obra en términos de número de personas empleadas.	Toneladas métricas de pulpa y papel producidos, metros cúbicos de astillas enviadas a otras industrias de productos forestales (tableros de fibra y bioenergía).	DEA de dos etapas, CCR, BCC (orientación de entrada)	Shashi K. Shahi & Mohamed Dia (2021)

Algunos de los estudios que se muestran en las tablas 3-1 y 3-2, además de considerar modelos DEA con retornos de escala constantes y retornos de escala variables, incluyen la regresión Tobit, la cual se utiliza para analizar datos en los que la variable de interés está acotada o los datos están censurados, como el caso de aplicación de algunas investigaciones como las de Liang et al., (2022) y Tan et al., (2023).

Otros estudios se enfocan hacia el índice de productividad de Malmquist. Uno de los autores que usa este índice es Kao (2010), quien estudia los bosques nacionales en Taiwan con variables relacionadas a la superficie terrestre, mano de obra, gasto, stock inicial, producción de madera, conservación de suelos y recreación, con el objetivo de medir la mejora del desempeño de los nuevos distritos del país luego de la reorganización del sector. Asimismo, se destaca el estudio de Yang et al., (2016), quienes estudian las industrias forestales estatales como elementos importantes de la economía forestal de China.

Algunos autores han empleado SBM como enfoque DEA no radial para medir la eficiencia considerando las holguras en las entradas y salidas. Por ejemplo, Gutiérrez & Lozano (2022), realizaron un análisis comparativo entre países de la Unión Europea, evaluando la eficiencia del sector forestal en dos etapas. De manera similar, otros autores como Huang et al. (2022), aplicaron este enfoque para analizar la eficiencia de producción y eficiencia de servicio en 31 parques forestales en China. Este estudio permitió la identificación de buenas prácticas y la formulación de recomendaciones para que cada provincia reduzca sus ineficiencias, optimice la gestión de recursos y las actividades turísticas. Por otro lado, Hao et al. (2022) también centraron su investigación en China, pero con un enfoque diferente, ya que evaluaron la eficiencia energética de 31 provincias para aportar otra perspectiva sobre el uso eficiente de los recursos en el sector forestal.

Además de estos estudios orientados a la eficiencia del sector forestal en general, existen investigaciones específicas sobre productos madereros. Un ejemplo relevante es el trabajo de Hemmasi et al. (2011), quienes analizaron el rendimiento de 10 empresas de la industria de paneles de madera en Irán mediante un modelo DEA-SBM basado en datos financieros. Su objetivo era la evaluación del nivel de producción y la posición competitiva de estas empresas en el mercado. Los resultados demostraron que algunas empresas no lograban equilibrar adecuadamente sus entradas y salidas, lo que indicaba la necesidad de aplicar estrategias de reducción de insumos para mantener el mismo nivel de producción.

Con respecto al enfoque de un modelo DEA de dos etapas, hay otros estudios que también han aplicado esta metodología:

Para investigaciones sobre gestión forestal, destaca el trabajo de Neykov et al., (2023), quienes analizan la eficiencia económica de micro y pequeñas empresas dedicadas al procesamiento de madera en 25 países de la UE durante el periodo 2015-2020. En este estudio, se utiliza un modelo DEA combinado con análisis de regresión fraccional, empleando tanto modelos probit como logit para la identificación de los factores que afectan la eficiencia. El objetivo principal era conocer los distintos insumos y factores exógenos que influyen en la evaluación de las variables de estudio. Además de este estudio, es interesante mencionar la investigación realizada por Amirteimoori et al. (2023), cuyo objetivo fue analizar la aplicación del modelo DEA para la evaluación de la capacidad de gestión y el crecimiento de la productividad en 29 sectores forestales europeos a lo largo del periodo 2011-2020. En primer lugar, los autores utilizaron un modelo DEA para medir la eficiencia técnica desde la perspectiva de la frontera meteorológica. Posteriormente, desarrollaron un modelo de regresión para determinar el impacto de las variables contextuales. Los resultados indicaron que la densidad regional, el paso del tiempo y el producto interno bruto fueron los factores con mayor influencia positiva en la mejora del desempeño.

En el caso de investigaciones relacionadas específicamente con productos madereros y que utilizan dos etapas, se encuentra el estudio de Limaie (2013), quien evaluó la eficiencia de 14 empresas forestales iraníes en 2010. La primera etapa aplica un modelo DEA para estimar la eficiencia técnica de las empresas. En la segunda etapa se usa este modelo para dividir el proceso productivo en dos subprocesos: cosecha de madera y comercialización. La descomposición del proceso en estas dos etapas persigue la identificación de las fuentes específicas de ineficiencia dentro de cada subproceso. En este caso, se considera como producto maderero la madera aserrada, tableros a base de madera, pulpa y papel. Los resultados indican que un desempeño deficiente en la etapa de cosecha fue la principal causa de la baja eficiencia observada ese año.

Estos estudios demuestran la capacidad del enfoque DEA por ser aplicable a diferentes segmentos del sector forestal, ya sea para el análisis de la gestión de sus recursos como de productos madereros.

# 4 DESCRIPCIÓN DE DATOS

---

Para este estudio, se emplea un conjunto de datos que comprende el periodo de 2010 a 2020 e incluye las estadísticas forestales de 28 países de la Unión Europea. Con el fin de realizar un análisis comparativo, se consideran como referencia los mismos países que se estudiaron en el artículo de Gutiérrez & Lozano (2022). Las fuentes de datos utilizadas provienen de Eurostat, los cuales están disponibles en la plataforma <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser> para el periodo de estudio de once años. Además, se recopila información de los informes anuales publicados en la FAO (<https://www.fao.org/home/es>).

Las entradas y salidas consideradas se muestran en la figura 4-1. Esta selección de insumos (*inputs*) y productos (*outputs*) se basa en las variables analizadas en otros artículos del sector forestal y que tienen características similares al objetivo de este proyecto. Estas variables aportan información acerca del comportamiento de la silvicultura y la industria forestal.

## 4.1 Variables de Entrada

Las tres variables de entrada que pertenecen al proceso de producción de madera en rollo están representadas por las personas empleadas a tiempo completo (EMP), el bosque disponible para suministro de madera (BDSM) y las existencias iniciales en crecimiento (EX\_I). Estas entradas son variables que dependen de factores externos que están fuera del control directo de las unidades de decisión (países de la UE), por lo tanto, este modelo DEA considera las entradas como factores no discrecionales y, por lo tanto, no tiene como objetivo reducirlas.

Estas limitaciones se deben a restricciones externas, legales, geográficas u otras causas que condicionan el proceso de decisión. Para este caso en específico, la cantidad de empleados no se ajusta fácilmente en el corto plazo, ya que está condicionado a normas laborales, niveles salariales y la estructura o políticas de trabajo según cada país. A nivel europeo, las leyes y normas laborales pueden hacer que el proceso de contratación o despido de empleados sea lento o complejo. Asimismo, el bosque disponible para suministro de madera está determinado por factores naturales, geográficos y políticas nacionales asociadas al uso de suelo y recursos. No es posible controlar la cantidad de bosque disponible, ya que depende de ciertas restricciones de conservación, gestión ambiental, explotación y tala de árboles. Una reducción de esta variable no implica lograr la eficiencia. Finalmente, las existencias iniciales de crecimiento reflejan la cantidad de recursos forestales acumulados en un cierto periodo de tiempo. Esta es una variable que se determina por el crecimiento natural de los árboles y su ciclo biológico, el cual no pretende ser reducido a corto plazo ni ser alterado.

Para cualquier cambio o modificación sería necesario que el sector público, ecologistas/activista medio ambiental y representantes de los sectores forestales lleguen a un consenso.

## 4.2 Variables de Salida

Como variable de salida se consideran la producción de madera en rollo (PROD), el valor agregado bruto (VAB) y las existencias finales de crecimiento (EX\_F). Estas salidas explican diferentes perspectivas que reflejan tanto el impacto económico como las dimensiones técnicas de la actividad forestal. Así:

PROD: representa la cantidad total de madera extraída de los bosques de diferentes países durante el periodo de estudio, mide la intensidad de la explotación forestal en términos de volumen extraído y refleja el nivel de aprovechamiento de los recursos forestales para medir la eficiencia del manejo forestal.

VAB: es la medida económica que indica la contribución neta del sector forestal a la economía expresados en unidades monetarias. Refleja la rentabilidad y valor de la actividad forestal dentro del PIB.

EX\_F: corresponde a la cantidad final de madera que permanece en el bosque durante el periodo de estudio. Representa el crecimiento de este recurso forestal luego del proceso de extracción y refleja el balance entre lo que se extrae y lo que se genera para conocer los recursos disponibles.

Estos productos cubren diferentes dimensiones, PROD y EX\_F son productos o resultados técnicos que miden la cantidad de madera extraída y la existencia final del periodo evaluado, mientras que VAB refleja la contribución de la actividad productiva a la economía. Este último indicador es útil para medir el progreso de la madera en rollo a lo largo del proceso productivo y su cálculo de los objetivos permite determinar la necesidad de apoyo de incentivos conforme a las políticas nacionales o de la Unión Europea.

Debido a la falta de información disponible, algunas variables de impacto, como las relacionadas con las contribuciones de la captura de CO<sub>2</sub>, la conservación de la biodiversidad y el cuidado de ríos y zonas de agua (cuencas hidrográficas) no se incluyen en este análisis.

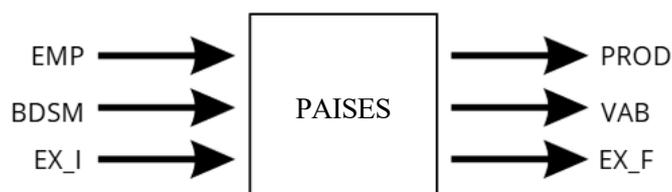


Figura 4-1. Variables de entrada y variables de salida consideradas

### 4.3 Cuadro descriptivo de las variables de estudio

La tabla 4-1 presenta un desglose detallado de las variables incluidas en este trabajo, mostrando una descripción breve pero informativa de cada una de ellas. Se especifica la unidad de medida correspondiente y se señala si las variables son de tipo discrecional o no, facilitando una mejor comprensión de las entradas y salidas utilizadas a lo largo de este análisis.

Tabla 4-1. Descripción de entradas y salidas

	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Tipo</b>
<b>Entradas</b>	EMPL	Personas empleadas a tiempo completo	10 <sup>3</sup> personas	No discrecional
	BDSM	Bosque disponible para suministro de madera	10 <sup>3</sup> hectáreas	No discrecional
	EX_I	Existencias iniciales de crecimiento	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> sobre corteza	No discrecional
<b>Salidas</b>	PROD	Producción de madera en rollo	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> sobre corteza	Discrecional
	VAB	Valor agregado bruto	10 <sup>3</sup> euros	Discrecional
	EX_F	Existencias finales de crecimiento	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> sobre corteza	Discrecional

\* Para efectos de este estudio, las unidades económicas se encuentran deflactadas según año base 2020.

Las variables de entradas son no discrecionales, lo que significa que no pueden ser controladas directamente ni dependen de decisiones internas, ya que están influenciadas por factores externos. Por otro lado, las variables de salida son discrecionales, ya que pueden ajustarse en función de los objetivos establecidos y las decisiones estratégicas que se toman.

#### 4.4 Resumen estadístico de las variables

En esta sección se presentan estadísticos descriptivos de las variables de entrada y salida correspondientes al periodo 2010-2020.

La tabla 4.2 incluye información de estadísticos descriptivos de posición y dispersión.

Tabla 4-2. Resumen estadístico de las variables en el periodo (2010-2020). Primera etapa

	Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Estándar	Coficiente Variación
Input	EMPL	208 [113]	9 [5]	803 [430]	186 [99]	0,894
	BDSM	65.318 [30.819]	451 [246]	282.488 [119.595]	74.306 [34.489]	1,138
	EX_I	822.333 [822.333]	3.462 [3.462]	3.255.485 [3.255.485]	830.032 [830.032]	1,009
Output	PROD	189.465 [96.631]	115 [57]	801.289 [427.599]	218.547 [113.021]	1,154
	VAB	42.599 [5.037]	1.665 [12]	206.080 [23.553]	54.644 [6.060]	1,283
	EX_F	955.831 [877.926]	3.740 [3556]	3.539.673 [3.492.665]	984.340 [888.419]	1,030

\* Los valores entre corchetes [ ] indican los datos obtenidos en el periodo 2010-2015.

Durante el período de estudio 2010-2020, los resultados muestran un panorama diversificado. En promedio, se emplean 208.000 personas por año en el sector forestal, este resultado refleja una mayor cantidad de empleo en comparación con el promedio de 113.000 personas observado en el periodo 2010-2015, esto quiere decir que los últimos cinco años, el empleo ha aumentado, por término medio, en 95.000 personas. Este incremento del 54,33% demuestra un posible crecimiento en la actividad forestal.

Con respecto al bosque disponible para suministro de madera en 2010-2020, la superficie media de 65.318 mil hectáreas supera en más del doble el promedio reportado en 2010-2015 (30.819 mil hectáreas). Esto se puede deber a varios factores, tales como:

- **Políticas ambientales:** Debido a estrategias de gestión sostenible forestal y el uso de madera como fuente de energía renovable según indica la política de medio ambiente (Parlamento Europeo, 2025).
- **Estrategia de la UE a favor de los Bosques (Comisión Europea, 2021):** Gestión forestal sostenible en Europa. Destaca la importancia de la regeneración natural y el manejo adecuado de los bosques para asegurar una disponibilidad continua de madera a largo plazo.
- **Aumento de la superficie forestal:** Reforestación y la expansión de áreas boscosas. Según El estado de los bosques del mundo (FAO, 2022), los bosques en Europa han aumentado de manera constante debido a políticas de reforestación y prácticas de gestión sostenible. Esto se debe en parte a políticas agrícolas que fomentan la reforestación en tierras marginales.
- **Tecnologías que mejoran la gestión forestal:** Tecnologías de gestión forestal y silvicultura han mejorado la productividad de los bosques, generando mayor extracción de madera sin comprometer la biodiversidad ni el ecosistema. Una mejor gestión hace que los bosques produzcan más madera.

Las existencias iniciales promedio (882.333 toneladas) coinciden con los valores reportados en 2010-2015, sin embargo, las existencias finales promedio de crecimiento (955.831 toneladas) muestran un aumento con respecto al promedio obtenido en 2010-2015 (877.926 toneladas). Esto indica un crecimiento forestal de 77.905 toneladas adicionales en comparación con el periodo 2010-2015.

La producción de madera en rollo arroja un valor de 189.465 toneladas en el periodo 2010-2020, más del doble del promedio obtenido en 2010-2015, esto quiere decir que los últimos cinco años, esta producción refleja un incremento del 49%. Esta expansión significativa en la producción puede estar relacionada a la demanda de madera en el mercado europeo.

El valor añadido bruto promedio durante el periodo de estudio es de 42.599 millones de euros. Un aumento en este valor podría estar relacionado con una mayor rentabilidad del sector forestal, debido a posibles avances tecnológicos o mejoras del mercado.

Los resultados 2010-2020, al igual que los datos 2010-2015, muestran dispersión en todas sus variables, excepto en el número de personas empleadas, y en menor medida, las existencias finales. Esto es un reflejo de la heterogeneidad que existe entre países en términos de tamaño, recursos forestales, empleo, producción y valor añadido bruto. Hay países que cuentan con grandes superficies forestales y por ende un alto nivel de producción y valor agregado. Sin embargo, hay otros países que enfrentan limitaciones en su capacidad de explotar este sector.

En términos generales, el sector forestal se enfrenta a un crecimiento en las variables de estudio. La producción de madera en rollo, el valor añadido bruto y las existencias finales de crecimiento presentan incrementos significativos con respecto al periodo de comparación 2010-2015. Esto quiere decir que los últimos años han fortalecido las políticas relacionadas a la gestión de forestales, hubo un aumento en la demanda de madera y mejoras sostenibles con respecto a los recursos naturales.

El sector forestal europeo experimentó un notable crecimiento entre 2010-2020, reflejando un aumento significativo en la producción, el valor agregado bruto y las existencias finales de crecimiento. Sin embargo, la alta dispersión de las variables subraya la importante diferencia entre los países europeos, principalmente por los tamaños que estos presentan, la disponibilidad de recursos forestales y las diferentes dinámicas de los mercados regionales.

La segunda etapa de la metodología presentada en este proyecto tiene como objetivo evaluar el efecto de los factores exógenos sobre las medidas de rendimiento obtenidas en modelo DEA. Estos factores contextuales en el modelo de regresión fraccional son utilizados para identificar los determinantes de la competitividad y eficiencia del sector forestal europeo.

La tabla 4-3 presenta una descripción detallada de los factores contextuales incluidos en el modelo de regresión fraccional, especificando las variables exógenas del modelo y las unidades de medida correspondientes.

Tabla 4-3. Descripción de factores contextuales. Segunda etapa

<b>Variables</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
PIB	Producto Interno Bruto: Valor total de los bienes y servicios finales producidos en un país durante un período determinado. Indicador de desempeño económico. (Deflactado con año base 2020).	Billon US\$
TIERRA	Área terrestre, excluyendo cuerpos de agua interiores como lagos y ríos.	10 <sup>3</sup> ha
TEMP	Temperatura media del aire calculada a lo largo de un año, promediando las temperaturas mensuales.	°C
PRECIP	Promedio de precipitación mensual durante un año.	mm/hr
NORTE	Variable Dummy (1 = Norte ; 0 = Otro)	Dummy
CENTR_OE	Variable Dummy (1 = Europa occidental ; 0 = Otro)	Dummy
CENTR_ES	Variable Dummy (1 = Europa central ; 0 = Otro)	Dummy
SUR_OE	Variable Dummy (1 = Sur ; 0 = Otro)	Dummy

La consideración de estas variables en un modelo de regresión fraccional permite la identificación de manera precisa de los potenciales determinantes de la competitividad y eficiencia del sector forestal europeo.

En este análisis, los factores de estudio no son controlados o completamente controlados por entes gubernamentales de la Unión Europea o privados. Sin embargo, es interesante recopilar información que permita la evaluación de cómo influye la incorporación de estas variables en la ineficiencia del sector forestal.

Se han empleado variables para medir el impacto asociado a cada uno de los países de la Unión Europea, entre las cuales se incluye el Producto Interno Bruto (Eurostat, 2020), que actúa como medida del desempeño o rendimiento económico, la superficie terrestre excluyendo cuerpos de agua interiores como lagos y ríos (Eurostat, 2019), que refleja las hectáreas de recursos forestales, la temperatura media anual del aire (Climate Change Knowledge Portal, 2020) y la precipitación promedio anual. Además, ante la diversidad de superficie forestal en Europa, se ha incluido una variable geográfica que es la localización. Para ello, los bosques de Europa se han clasificado en cinco regiones geográficas: Europa del Norte, Europa Central-Oeste, Europa Central-Este, Europa del Sur-Oeste y Europa del Sur-Este. Para efectos de este análisis se consideran cuatro variables ficticias que reflejan estas divisiones:

- NORTE: Dinamarca, Estonia, Finlandia, Letonia, Lituania, Noruega y Suecia.
- CENTRO OESTE: Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Irlanda, Países Bajos, Suiza y Reino Unido.
- CENTRO ESTE: República Checa, Hungría, Polonia, Rumania y Eslovaquia
- SUR OESTE: Italia, Portugal y España.
- SUR ESTE: Bulgaria, Grecia, Croacia, Chipre y Eslovenia

El análisis estadístico se realiza a través de la aplicación informática RStudio (versión 2023.12.1.402), ejecutando las librerías deaR (versión 1.4.1) y la librería frm de R (Ramalho, 2015).

# 5 ENFOQUE DEA PROPUESTO

---

El enfoque DEA propuesto consiste en dos etapas. En la primera, se utiliza un modelo DEA para medir la eficiencia, los valores u objetivos de cada unidad de toma de decisión DMU, que en este caso corresponde a los países de análisis pertenecientes a la Unión Europea. En la segunda etapa, se utiliza el resultado de eficiencia obtenido en la primera etapa y se lleva a cabo un análisis de regresión fraccional para determinar si algunas variables exógenas generan impacto en la eficiencia del modelo.

## 5.1 Modelo DEA propuesto

El modelo propuesto mide la eficiencia basada en holguras SBM (Slacks-Based Measure) con orientación de salida, *outputs*, o de producción (Tone, 2001).

El modelo SBM es una técnica DEA no radial que se enfoca en aprovechar las holguras de entrada y salida para medir la eficiencia. Este modelo calcula el valor de la eficiencia basándose en la relación entre la reducción relativa de los insumos (entradas) y el aumento relativo de los productos (salidas), considerando todas las ineficiencias posibles en ambos aspectos.

El modelo SBM tiene varias propiedades que lo hacen útil en diversas aplicaciones:

1. *Invariancia de unidades:* La eficiencia del modelo no se ve afectada por las unidades de medida de las entradas o salidas. Puede ocurrir, por ejemplo, que las entradas se midan en hectáreas o metros cúbicos y las salidas en euros. Pese a esto, el resultado de la evaluación sigue siendo válido y consistente.
2. *Monotonidad en holguras de entrada y salida:* Si se mejora algo en el sistema, como usar menos recursos o generar mayor producción, la eficiencia no empeora, más bien aumenta o se mantiene. Esto asegura que cualquier cambio positivo en el rendimiento siempre se ve reflejado como un aumento del valor de eficiencia, lo cual es útil para medir mejoras continuas.
3. *Eficiencia no radial:* A diferencia de los enfoques radiales, el modelo SBM considera las holguras de manera individual para cada entrada y salida, proporcionando una evaluación detallada de las ineficiencias.

Para la formulación del modelo, a continuación, se detallan los datos y variables que se consideran.

### 5.1.1 Datos

$j = 1, 2, \dots, n$  índice sobre los países.

$EMPL_j$  Suma del número anual de personas empleadas a tiempo completo en el sector forestal en el país  $j$  durante el periodo de tiempo de estudio.

$BDSM_j$  Suma de la cantidad anual de bosque disponible para el suministro de madera en el país  $j$  durante el periodo estudiado.

$EX\_I_j$  Existencias en crecimiento en el país  $j$  al inicio del periodo de estudio.

$PROD_j$  Madera en rollo total producida por el país  $j$  durante el período de estudio.

$VAB_j$  Valor añadido bruto total del sector en el país  $j$  durante el período de estudio.

$EX\_F_j$  Existencias en crecimiento en el país  $j$  al final del período de estudio.

0 Índice del país específico cuya eficiencia y objetivo se están calculando.

### 5.1.2 Variables

$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  Variables de intensidad utilizadas para calcular el objetivo como una combinación lineal convexa de las entradas y salidas observadas.

$holgura^{PROD}$  Mejora potencial en la producción total de madera en rollo.

$holgura^{VAB}$  Mejora potencial del valor añadido bruto.

$holgura^{EX-F}$  Mejora potencial del stock final en crecimiento.

$\xi_0$  Valor de eficiencia del SBM del país 0.

La elección de la orientación de este modelo no solo se debe a que todas las variables de entradas son no discrecionales, sino también al contexto global de la lucha contra el cambio climático y el objetivo de lograr una economía más sostenible.

En el sector forestal, el incremento de la producción de madera en rollo no solo contribuye a la captura de CO<sub>2</sub> a través del crecimiento de los árboles, sino que también establece un ciclo de carbono más sostenible. Esto se debe a que los productos elaborados a partir de la madera actúan como almacenes de carbono a largo plazo, por lo tanto, es una alternativa con menor huella de carbono en comparación con otras fuentes de materiales como, por ejemplo, el acero o el concreto. Por otro lado, el fomento del uso de estos productos contribuye directamente a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles y otros recursos que no son renovables y que generan altos niveles de contaminación.

En el contexto actual, donde la Unión Europea busca alcanzar la neutralidad climática para 2050, la promoción del uso de productos forestales sostenibles se alinea con diferentes iniciativas, como el Pacto Verde Europeo, según indica el Consejo Europeo (*Consilium*, 2024) y la Estrategia Forestal 2030 (Comisión Europea, 2021).

En cuanto a los rendimientos a escala, la elección del enfoque de Rendimientos Variables a Escala (VRS) se justifica porque este modelo refleja mejor la realidad del sector forestal europeo. La industria opera en un entorno donde prevalecen efectos de escala debido a factores como las diferencias en las condiciones de los bosques, las capacidades tecnológicas de los países y las limitaciones en los mercados internacionales. Además, no existe un mercado de competencia perfecta, ya que las políticas nacionales u otros factores influyen en la producción. Bajo estas circunstancias, asumir rendimientos variables a escala permite obtener de mejor manera las ineficiencias del sector. La formulación del modelo DEA propuesto se expresa como:

Modelo DEA SBM orientado a la producción

$$(\xi_0)^{-1} = \text{Max } 1 + \frac{1}{3} * \left( \frac{\text{holgura}^{PROD}}{PROD_0} + \frac{\text{holgura}^{VAB}}{VAB_0} + \frac{\text{holgura}^{EX_F}}{EX_{F_0}} \right)$$

Sujeto a.

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j EMPL_j \leq EMPL_0 \quad (5.1)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j BDSM_j \leq BDSM_0 \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j EX_I_j \leq EX_I_0 \quad (5.3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j PROD_j = PROD_0 + \text{holgura}^{PROD} \quad (5.4)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j VAB_j = VAB_0 + \text{holgura}^{VAB} \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j EX_F_j = EX_F_0 + \text{holgura}^{EX_F} \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (5.7)$$

$$\lambda_j \geq 0 \forall j \quad \text{holgura}^{PROD}, \text{holgura}^{VAB}, \text{holgura}^{EX_F} \geq 0 \quad (5.8)$$

El modelo lineal anterior calcula el punto operación factible considerando tecnología VRS en DEA. Se maximiza el incremento porcentual promedio de las tres variables de producción o salida. Las restricciones de las variables de entrada imponen que el objetivo no consuma más insumos que los ya observados, que son fijos y no pueden reducirse (Banker & Morey, 1986).

Específicamente, la función objetivo busca maximizar la eficiencia  $\xi_0$  del país 0, evaluado como el inverso de esta expresión. La eficiencia incorpora las holguras de las tres variables de salida (producción de madera en rollo, valor añadido bruto, y stock final en crecimiento) y estas incluyen el término 1/3, porque son ponderadas de igual manera en la evaluación. El valor “1” representa el nivel base de la eficiencia en su estado inicial. Por lo tanto, si no hay presencia de holguras en el modelo, la eficiencia será exactamente 1, lo que significa que el país está en la frontera eficiente.

Las primeras tres restricciones de entradas (expresiones 5.1-5.3), garantizan que las combinaciones lineales convexas de los datos de los países no exceden las entradas observadas en el país 0. En otras palabras, asegura que las entradas no superan los recursos disponibles para que el modelo no proponga como referencia combinaciones con más recursos que los que el país ya tiene.

Las siguientes tres restricciones de salida (expresiones 5.4-5.6) aseguran que las combinaciones lineales convexas de los países igualen las salidas observadas del país 0, ajustadas por las holguras correspondientes. Las holguras representan el potencial de mejora para que el país alcance la frontera de eficiencia. Si las holguras toman un valor positivo, significa que el país no es eficiente y puede incrementar su producción.

De manera detallada se tiene lo siguiente:

$\sum_{j=1}^n \lambda_j EMPL_j \leq EMPL_0$ : La cantidad ponderada de personas empleadas a tiempo completo ( $EMPL_j$ ) en la combinación convexa de los países no excede el número de empleados del país 0 ( $EMPL_0$ ). Esta restricción se limita a países que operan con igual o menor cantidad de empleados en el sector forestal. De esta manera, el país se evalúa en la frontera de eficiencia que no demanda más empleo del que se utiliza.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j BDSM_j \leq BDSM_0$ : Establece que la cantidad de bosque disponible para el suministro de madera ( $BDSM_j$ ) en la combinación convexa de países no puede superar la disponibilidad del país 0 ( $BDSM_0$ ). Se asegura que el país 0 sea comparado con países que tienen igual o menor cantidad de recursos. Evalúa que tan bien utiliza sus recursos forestales comparados con otros.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j EX_I_j \leq EX_I_0$ : Garantiza que las existencias iniciales en crecimiento ( $EX_I_j$ ) de la combinación convexa de países no supere las existencias iniciales del país 0 ( $EX_I_0$ ). Esta restricción es importante para no evaluar un país con niveles de recursos superiores a los que realmente dispone.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j PROD_j = PROD_0 + holgura^{PROD}$ : La combinación convexa de la producción total de madera en rollo ( $PROD_j$ ) de los países debe ser igual a la producción observada del país 0 ( $PROD_0$ ), más una mejora potencial ( $holgura^{PROD}$ ). Determina cuánto puede mejorar la producción el país de estudio sin aumentar las entradas.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j VAB_j = VAB_0 + holgura^{VAB}$ : El valor añadido bruto ( $VAB_j$ ) de la combinación convexa de países debe ser igual al observado en el país 0 ( $VAB_0$ ), más una mejora potencial ( $holgura^{VAB}$ ). Evalúa si el país está maximizando el valor económico que genera en el sector forestal.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j EX_F_j = EX_F_0 + holgura^{EX.F}$ : Define que las existencias finales en crecimiento ( $EX_F_j$ ) de la combinación convexa de países deben ser iguales a las observadas en el país 0 ( $EX_F_0$ ), más una mejora potencial ( $holgura^{EX.F}$ ). Indica si el país puede mejorar su stock final en crecimiento mientras mantiene constante sus entradas.

$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ : Asegura convexidad en las combinaciones lineales de países, característica fundamental del enfoque DEA en VRS.

$\lambda_j \geq 0 \forall j$   $holgura^{PROD}$ ,  $holgura^{VAB}$ ,  $holgura^{EX.F} \geq 0$ : No negatividad

## 5.2 Modelo propuesto de análisis de regresión

En este trabajo, se abordan las técnicas utilizadas en estudios previos sobre eficiencia en la gestión forestal y los productos madereros, centrándose en el análisis envolvente de datos (DEA). En estos casos, es común complementar el análisis con una segunda etapa, utilizando modelos de regresión, Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) o modelos censurados estimados por máxima verosimilitud (ML). Sin embargo, algunos investigadores, como Simar & Wilson (2007), han señalado que estas estimaciones suelen presentar correlaciones seriales, lo que puede afectar la validez de los resultados.

En el presente trabajo, se tratan los valores de eficiencia como un valor que describe el desempeño relativo de las DMU dentro de una muestra. Además, se asume que las variables exógenas del modelo, como los factores ambientales, son independientes de las variables de entrada o salida de la primera etapa, según proponen los autores Hoff (2007) y Ramalho et al., (2010).

Se considera la metodología de regresión basada en la esperanza condicional de la eficiencia, que permite incluir las variables ambientales mencionadas anteriormente dentro del análisis y evalúa su impacto mediante una prueba de significancia no paramétrica. Esta prueba emplea técnicas de bootstrap y estimaciones basadas en kernel, siguiendo las recomendaciones de Daraio & Simar (2007).

Finalmente, se emplea un modelo de regresión fraccional (FRM) como extensión del primer modelo en caso de que las variables respuesta continuas estén acotadas. FRM se utiliza principalmente para el estudio de las variables que están limitadas en un cierto rango, en particular, proporciones o porcentajes. Este modelo es útil porque permite analizar cómo diferentes factores influyen en las variables, teniendo en cuenta que no pueden superar ciertos límites (como por ejemplo 0 y 1 en el caso de proporciones). Estos modelos, basados en el trabajo de Papke & Wooldridge (1996), permiten un análisis más completo y certero cuando hay probabilidad significativa entre los límites del intervalo. Ramalho et al. (2010) adapta el FRM a la estructura DEA, proponiendo el uso de estos modelos en una segunda etapa.

Papke & Wooldridge (1996) desarrollaron el método de cuasi-máxima verosimilitud (QMLE), una técnica estadística ideal para analizar datos que representan proporciones o fracciones, es decir, valores entre 0 y 1. Este método se destaca por ser fácil y práctico, ya que solo requiere la descripción correcta de cómo se espera que la variable de estudio se comporte, sin necesidad de asumir una forma específica para su distribución. Además, el QMLE garantiza que las predicciones siempre se mantengan dentro del rango válido y ofrece resultados fiables con datos fraccionarios incluso cuando estos no siguen una distribución tradicional. La expresión del modelo de regresión se expresa como:

$$E(\xi_0|x_i) = G(x_i \beta) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.9)$$

donde:

$\xi_0$ : Medida de eficiencia técnica basada en la holgura  $0 \leq \xi_0 \leq 1$

$x_i$ : Vector k-dimensional de las variables climáticas/contextuales/económicas que estiman la eficiencia del i-ésimo país de la Unión europea.

$\beta$ : Vector k-dimensional de parámetros desconocidos.

$G(-)$ : Función no lineal que satisface la condición  $0 \leq G(-) \leq 1$  y que puede adoptar diferentes especificaciones simétricas como por ejemplo “logit” y “probit” y especificaciones asimétricas como “loglog” y “loglog complementario”.

Entre las diferentes formas que puede adoptar la función G, éstas darían lugar a:

**Modelo logit:** Este modelo se utiliza para representar probabilidades. Convierte una combinación lineal de las variables explicativas ( $x_i\beta$ ) en probabilidades que aseguran un rango de valores entre 0 y 1. Es común utilizarlo en análisis de regresión logística, ya que su forma sigmoideal “S” asegura un crecimiento suave y simétrico, lo que hace que sea menos sensible a valores extremos.

$$G_{logit}(x_i\beta) = \frac{\exp(x_i\beta)}{(1+\exp(x_i\beta))} \quad (5.10)$$

**Modelo probit:** El modelo probit es similar al modelo logit, pero utiliza la función de distribución acumulada de la distribución normal estándar  $\phi$ . Este enfoque se utiliza cuando se supone que los errores tienen una distribución normal ( $N \sim (0,1)$ ), lo que permite modelizar escenarios donde los valores extremos tienen un impacto más significativo.

$$G_{probit}(x_i\beta) \sim = \phi(x_i\beta) \quad (5.11)$$

**Modelo loglog:** Esta transformación es menos frecuente que las dos anteriores y es útil en modelos donde las probabilidades se acumulan en posiciones cercanas a 0. Es ideal para situaciones donde los datos muestran asimetrías, es decir, situaciones en las que los eventos positivos son poco usuales o difíciles de que ocurran en rangos amplios de valores explicativos.

$$G_{loglog}(x_i\beta) = \exp(-\exp(-x_i\beta)) \quad (5.12)$$

**Modelo loglog complementario:** Esta transformación se usa cuando los eventos son poco frecuentes en un comienzo, pero luego aumentan rápidamente y se acercan al valor de 1. Es utilizado en casos extremos o poco usuales.

$$G_{cloglog}(x_i\beta) = 1 - \exp(-\exp(-x_i\beta)) \quad (5.13)$$

Cabe destacar, que el modelo de regresión fraccional (FRM) se utiliza para la modelización de variables dependientes como proporciones o fracciones en un intervalo  $[0,1]$ . No requiere ningún supuesto de distribución de datos, lo que lo hace más flexible en comparación con otros enfoques estadísticos que sí dependen de funciones específicas. Este solo asume su forma funcional de  $G(-)$ , la cual determina cómo las variables explicativas están relacionadas con la variable dependiente dentro del rango estipulado.

Los efectos parciales de un cambio unitario en la variable explicativa  $x_j$  se definen mediante la derivada  $G(-)$  con respecto a  $x_j$ :

$$\frac{\partial E(\xi_i|x_i)}{\partial x_{ij}} = \beta_j \frac{\partial G(x_i\beta)}{\partial (x_i\beta)} \quad (5.14)$$

Esto permite la interpretación del impacto de la variable explicativa sobre la variable respuesta esperada del modelo. En otras palabras, interpreta cómo pequeñas variaciones en  $x_j$  influyen en el resultado. Esto proporciona información interesante para el análisis de sensibilidad y para la identificación de los factores que impactan en la variación de la eficiencia. Se considera como estimaciones de los efectos parciales, los efectos medios muestrales, que se definen por:

$$\widehat{\beta}_j \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(x_i\beta) \quad (5.15)$$

Se calculan como la media de las transformaciones de las variables explicativas  $x_j$  mediante la función de  $g(x_i\beta)$ , promediando todas las observaciones en la muestra.

## 6 RESULTADOS OBTENIDOS

**E**n este apartado, se presentan y analizan los resultados obtenidos en las dos etapas de análisis. La primera etapa corresponde a la evaluación mediante el modelo DEA, donde se determinan las eficiencias relativas del sector forestal de 28 países de la UE y posteriormente, en la segunda etapa, se realiza un análisis de regresión con el objetivo de identificar y evaluar los factores exógenos que explican las variaciones en la eficiencia de la primera fase, estableciendo relaciones significativas entre ellas.

### 6.1 Resultados de la evaluación de eficiencia mediante el modelo SBM

Los resultados de eficiencia obtenidos se presentan en la tabla 6-1, donde se detallan además los valores de las holguras de producción calculadas mediante del modelo DEA SBM para cada país. Según estos índices, 17 países, que representan el 60,7 % del total analizado resultaron eficientes, mientras que los 11 restantes (39,3%) mostraron ineficiencias.

Tabla 6-1. Valor de eficiencia y holguras de producción (2010-2020)

DMU	EFICIENCIA $\xi_0$	HOLGURAS DE PRODUCCIÓN (Slack output)		
		$holgura^{VAB}$	$holgura^{PROD}$	$holgura^{EX\_F}$
Bélgica	1,000	0	0	0
Bulgaria	0,219	103690,442	0,000	82229,810
Republica Checa	1,000	0	0	0
Dinamarca	1,000	0	0	0
Alemania	1,000	0	0	0
Estonia	0,087	77712,771	0	29530,198
Irlanda	0,552	49405,503	1202,566	522,282
Grecia	0,353	27939,500	65723,957	6828,429
España	1,000	0	0	0
Francia	1,000	0	0	0
Croacia	0,234	77031,420	17682,405	0
Italia	1,000	0	0	0
Chipre	1,000	0	0	0
Letonia	0,171	76646,610	0	52432,980
Lituania	0,290	70029,056	2939,588	0
Hungría	0,504	64555,118	2513,475	0
Países Bajos	1,000	0	0	0
Austria	1,000	0	0	0
Polonia	1,000	0	0	0
Portugal	1,000	0	0	0
Rumania	1,000	0	0	0
Eslovenia	1,000	0	0	0
Eslovaquia	0,184	63231,337	0	0
Finlandia	0,699	30777,947	0	30322,915
Suecia	1,000	0	0	0
Reino Unido	0,783	26564,587	29261,169	69111,977
Noruega	1,000	0	0	0
Suiza	1,000	0	0	0
<b>SUMA</b>		<b>667584,291</b>	<b>119323,160</b>	<b>270978,591</b>

El hecho de que más de la mitad de los países obtengan un valor de 1 es un resultado esperable al asumir retornos de escala variable (VRS). Para aquellos países clasificados como ineficientes, se calculan las posibles mejoras en su producción a partir de las holguras y los valores que estas arrojan para cada país que no alcanza dicha eficiencia.

Los países ineficientes, es decir, aquellos con valores inferiores a 1 no están utilizando de manera óptima sus recursos para alcanzar la producción deseada. Por lo tanto, para esos casos, se estima el incremento necesario en su producción (*outputs*) para alcanzar la eficiencia, considerando constantes los recursos empleados (*inputs*). En este modelo DEA, las holguras (*slacks*) reflejan el nivel de producción no logrado por las variables y, a su vez, permiten la identificación de áreas específicas de mejora para el establecimiento de un plan de acción que optimice el desempeño.

El déficit total estimado para el periodo 2010-2020 alcanza valores significativos. En cuanto a la producción de madera en rollo, el déficit se calcula en  $119,3 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> sobre la corteza, lo que representa un impacto económico de 667.584,30 millones de euros. Por otro lado, el déficit de material en crecimiento final asciende a  $270 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> sobre la corteza. Estas cifras evidencian una notable brecha en la disponibilidad de recursos durante el período analizado.

Los países que contribuyen a estos déficits son: Bulgaria, Letonia, Reino Unido, Estonia, Irlanda, Grecia, Croacia, Lituania, Hungría, Eslovaquia y Finlandia. Los países con los índices de eficiencia relativa más bajos son Estonia, Letonia y Eslovaquia.

En contraste, los países Estados miembros de la Unión Europea (UE) que han adoptado políticas de contratación pública de madera ecológica o sostenible y presentan valores eficientes son: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia y Holanda (COPADE, 2013). Este grupo también incluye a Finlandia y al Reino Unido. Aunque este último dejó de ser miembro de la UE tras su salida en enero de 2020. Pese a lo anterior, sigue siendo relevante en estudios previos a dicha fecha. Estos países, implementan políticas que aseguran que la madera utilizada en proyectos financiados por el sector público sea gestionada de manera sostenible y a favor de las forestales.

### 6.1.1 Análisis comparativo del periodo 2010-2020 con el periodo 2010-2015

En términos de eficiencia, el período 2010-2020 mostró avances respecto al período 2010-2015. En el estudio, 17 de los 28 países evaluados fueron catalogados como eficientes, lo que representa un incremento del 10,1% en la eficiencia, equivalente a tres países adicionales en comparación con el período anterior, en el que se registraron 14 países eficientes.

La comparación entre los déficits estimados para ambos periodos, considerando que la longitud de ambos periodos es diferente, revela diferencias significativas que ayudan a explicar los cambios en la eficiencia del sector forestal europeo (Ver anexo 1).

Durante 2010-2015, los mayores contribuyentes al déficit fueron Italia, España, Rumania y Francia. Sin embargo, en el estudio actual, estos países lograron posicionarse como eficientes.

Además, es importante considerar lo siguiente:

- En el período 2010-2020, el déficit de madera en rollo mostró una reducción significativa, disminuyendo en casi cinco veces respecto al período 2010-2015, lo que equivale a una reducción del 80,7% en términos de m<sup>3</sup>. Esto refleja una mejora en la disponibilidad y eficiencia de esta materia prima.
- El impacto económico aumentó 14 veces durante el período que abarca 11 años, esto se debe al crecimiento económico, a la mayor valoración del recurso forestal y a los costes más altos derivados de su escasez. Esto podría señalar que los países mejoraron su capacidad para producir madera en rollo, pero las ineficiencias persisten en otros factores relacionados con la gestión y el mercado.
- En cuanto al material de crecimiento final, el déficit experimentó un aumento del 11,3%, lo que podría atribuirse a una mayor demanda de este material o una limitación en el suministro. Esto indica que sigue existiendo una insuficiencia en el volumen de material de crecimiento final para satisfacer la demanda, posiblemente por una gestión forestal ineficiente o por falta de crecimiento proporcional en la producción.

Los déficits de corteza para la producción de madera en rollo (PROD) en el periodo 2010-2015 fue de  $619,1 \cdot 10^6$  metros cúbicos sobre la corteza. Su reducción hasta el 2020 muestra que los países de la Unión Europea han mejorado con respecto la gestión de sus recursos forestales. Esto puede ser debido a prácticas o medidas sostenibles que se han adoptado, como por ejemplo la Estrategia Forestal de la Unión Europea, (Comisión Europea, 2013).

El incremento en el VAB, que pasa de 46.980,10 millones de euros (2010-2015) a 667.584,30 millones de euros (2010-2020), refleja que el sector forestal está logrando optimizar sus procesos productivos e incrementa el valor de los productos finales, pese a las limitaciones de materias primas. Algunos factores que influyen a este cambio es el desarrollo tecnológico y el énfasis en gestionar los recursos de manera más sostenible (RedPac, 2020).

La disminución del déficit en la producción de madera en rollo sugiere avances en la capacidad de producción de los países europeos. Esto está relacionado con las mejores prácticas de manejo forestal, innovaciones tecnológicas y una mayor optimización en el uso de recursos existentes.

La tabla 6-2 muestra los países que actúan como modelos o referencias para los países ineficientes, junto con sus correspondientes valores  $\lambda_j$ , que definen el punto operativo objetivo o la meta de mejora para cada país. La columna de DMU muestra el listado de países ineficientes.

Tabla 6-2. Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2010-2020)

DMU	LAMBDA								
	ALEMANIA	ESPAÑA	FRANCIA	ITALIA	PAÍSES BAJOS	POLONIA	PORTUGAL	RUMANIA	SUECIA
Bulgaria	0	0,006	0,012	0,318	0,664	0	0	0	0
Estonia	0,032	0	0,092	0,013	0,863	0	0	0	0
Irlanda	0	0,015	0,008	0	0,977	0	0	0	0
Grecia	0	0	0	0	0,782	0	0,176	0	0,042
Croacia	0,053	0	0	0,108	0,838	0	0	0	0
Letonia	0,059	0	0,120	0	0,806	0	0	0	0,015
Lituania	0,040	0	0,006	0,084	0,787	0	0	0,083	0
Hungría	0,016	0	0,029	0,111	0,844	0	0	0	0
Eslovaquia	0,032	0	0,008	0	0,822	0,083	0	0,055	0
Finlandia	0	0	0,130	0	0,167	0	0	0	0,703
Reino Unido	0,080	0	0,118	0	0,802	0	0	0	0

Aunque 17 de los 28 países son técnicamente eficientes, solo 9 se consideran puntos de referencia para otros países. Esto significa que, aunque países como Bélgica, República Checa, Dinamarca, Chipre, Austria, Eslovenia, Noruega y Suiza son eficientes, no funcionan como modelos para los países ineficientes que buscan mejorar y no contribuyen a las combinaciones de eficiencia utilizadas para evaluar su desempeño.

El principal país de referencia para todos los países ineficientes en este estudio es Países Bajos, que destaca como principal referencia para Irlanda, Estonia, Hungría, Croacia y Eslovaquia. Esto contrasta con los resultados del estudio correspondiente al período 2010-2015, donde Portugal desempeñaba este rol al ser la principal referencia para España, Italia, Letonia, Rumanía y el Reino Unido. En el estudio actual, todos esos países, excepto Letonia y el Reino Unido, han alcanzado valores de eficiencia.

Por otro lado, pese a no ser una referencia tan significativa como Países Bajos, esta Italia, que es principal referente para Bulgaria, mientras que Suecia lo es para Finlandia.

En términos del modelo DEA, los puntos de referencia son las DMU eficientes que se utilizan como "modelo" para proyectar a las DMU ineficientes hacia la frontera eficiente. Estas DMU, conocidas como *Mavericks*, destacan por sus características extremas que influyen significativamente en las proyecciones. Esto refleja que los países eficientes tienen una combinación de entradas y salidas diferente de la de los países ineficientes.

El hecho de que Países Bajos sea la referencia principal para todos los países ineficientes, indica que su combinación de entradas y salidas es una buena referencia para realizar mejores prácticas.

La figura 6-1 muestra diagramas de caja de las variables de entrada y salida observadas de los países ineficientes. Además, se señalan aquellos países que son eficientes pero que a efectos de estos resultados no son una referencia para los países ineficientes. Países Bajos también se puede observar en este diagrama.

Un país "maverick" es aquel que tiene características atípicas o un comportamiento diferente en comparación con las demás DMU. En este caso, Países Bajos destaca como un posible país maverick, porque sus niveles de eficiencia tienen un impacto significativo en cómo deben ser los países ineficientes y en cómo mejorar.

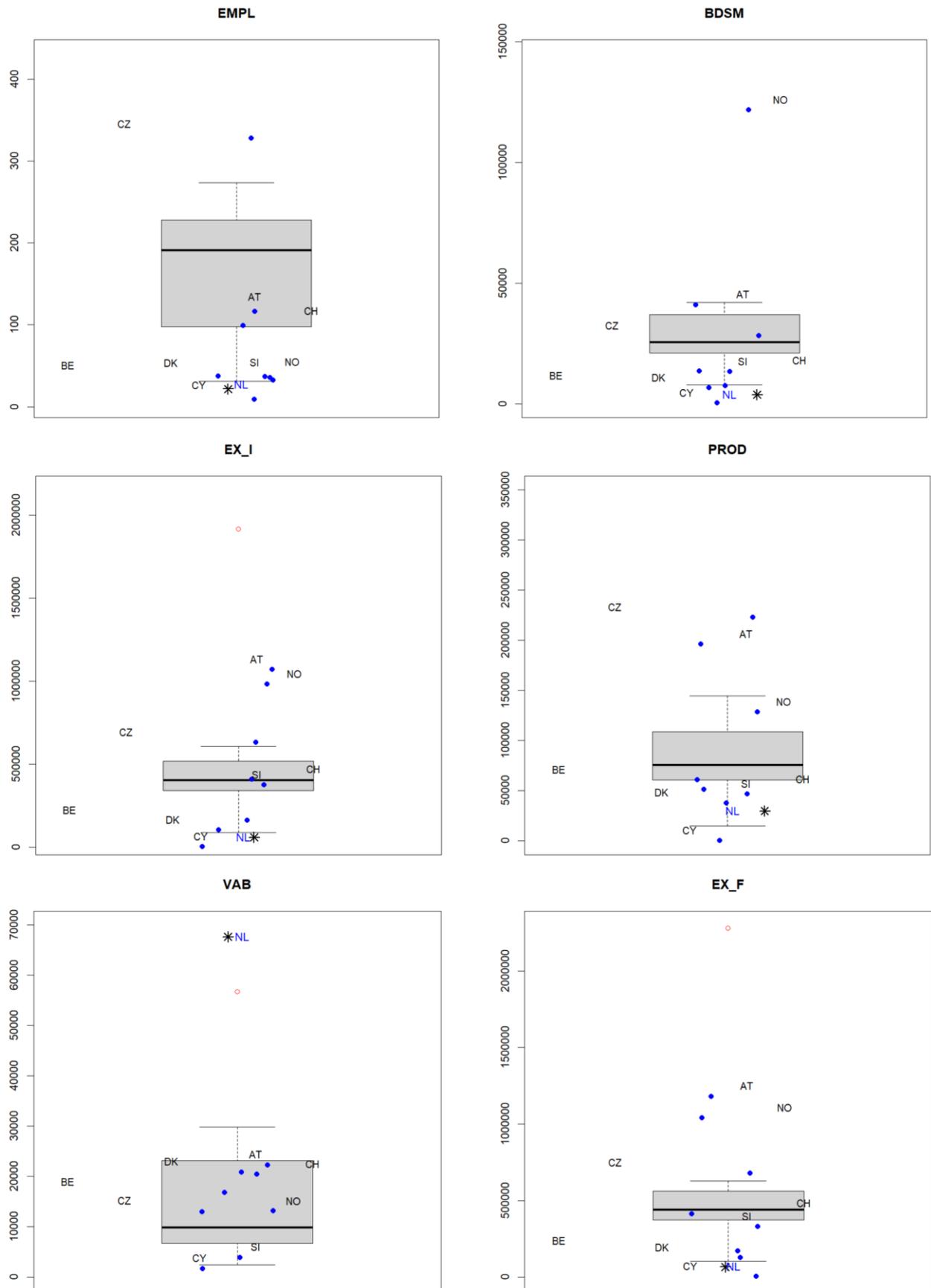


Figura 6-1. Diagrama de caja de las variables de entrada y variables de salida observadas de los países ineficientes y valores específicos de los países Mavericks (círculo relleno) y Países Bajos (copo de nieve)

Los países que tienen valores significativamente alejados del rango intercuartílico presentan características diferentes al promedio, lo que podría indicar la existencia de posibles mavericks. Pese a que estos países son eficientes, presentan combinaciones de entradas y salidas que pueden ser irrelevantes como referencia para los países ineficientes.

Según los diagramas de caja y la información proporcionada, se observa que los países ineficientes muestran valores dispersos en las variables analizadas, mientras que el país de referencia presenta valores más consistentes y alineados con la mediana de los datos (línea horizontal resaltada en negro).

Para la variable que representa a las personas empleadas a tiempo completo, se observa una alta variabilidad en los países ineficientes, con valores atípicos como el de la República Checa (CZ), mientras que Países Bajos muestra un valor alineado con los ineficientes, lo que sugiere que podría ser un modelo adecuado para mejorar la eficiencia en esta variable. Noruega (NO) destaca como valor atípico positivo, esto puede ser debido a la disponibilidad de bosque para suministro de madera que presenta en comparación con otros países. La presencia de valores extremos positivos y negativos refleja la disparidad en la disponibilidad inicial de recursos forestales entre países.

Al observar la producción de madera en rollo, hay dispersión en los países ineficientes, en este caso destaca Austria (AT) y Noruega (NO) con altos valores. Países Bajos se mantiene dentro del rango intercuartílico, lo que refuerza su posición como un punto de referencia eficiente. Además, considerando la variable de valor añadido bruto, este país de referencia destaca con un valor superior a la mediana.

### 6.1.2 Países Bajos como referencia significativa

Países Bajos es una referencia significativa a pesar de tener una superficie forestal limitada y no ser tan reconocido por su producción agrícola en el área forestal en comparación con otros países europeos. Según los resultados, este país ha demostrado gran capacidad para aprovechar al máximo sus recursos y mejorar su rendimiento en el sector forestal. La gestión eficiente de estos recursos y la adopción de tecnologías innovadoras han sido factores clave para mantener un crecimiento sostenible en este sector.

Países Bajos cultiva diferentes árboles y especies que se adaptan al mercado, seleccionadas por su especificidad y alto valor económico, como es el caso de los álamos, robles, madera de pino y madera dura, según indica La Haya sobre el *Mercado Holandés de la Madera* y algunos documentos de *Biodiversidad de Holanda* (Guía Blog Holanda, 2025). Esta diversidad permite una producción más eficiente para sectores específicos, como la madera para construcción, la industria del papel, productos de madera, fabricación de muebles y elementos de carpintería.

Otro aspecto a considerar son las condiciones climáticas de este país, que se caracteriza por un clima templado húmedo con precipitaciones regulares y temperaturas moderadas, las cuales crean un entorno favorable para el crecimiento de diversas especies forestales.

Algunas tecnologías de Países Bajos consisten en la aplicación de sensores de humedad del suelo, drones y teledetección, para facilitar la vigilancia y el mapeo de áreas forestales, detectando signos tempranos de estrés en los árboles, plagas o enfermedades (konicaminolta, 2025), diferentes aplicaciones informáticas de simulación para la planificación de la gestión forestal, tecnologías de agricultura de precisión, invernaderos climatizados para el control del cultivo, entre otras (HortoInfo, 2023).

La limitada superficie forestal en los Países Bajos promueve la adopción de políticas ambientales que aseguren un manejo forestal eficiente y sostenible. Los bosques en el país ocupan alrededor del 10% del paisaje, y están expuestos a emisiones de nitrógeno y sequías debido al cambio climático. Para enfrentar estos desafíos, Países Bajos ha implementado proyectos como, por ejemplo: "Bosques resilientes al cambio climático", que busca el almacenamiento de CO<sub>2</sub> en bosques y la mejora de la resiliencia de los ecosistemas forestales (FSC, 2025).

Los países miembros de la Unión Europea (UE) están sujetos a diversas estrategias, políticas y tratados orientados al uso sostenible de los recursos forestales como parte de sus compromisos con la mitigación del cambio climático y la protección de la biodiversidad, como es el caso de la Estrategia de la UE en favor de los Bosques para 2030 (Comisión Europea, 2021), el Pacto Verde Europeo según el Consejo Europeo (*Consilium*, 2024), entre otros. Países Bajos, se destaca del resto por su enfoque innovador y proactivo, ya que ha invertido en investigación y desarrollo para la obtención de soluciones avanzadas en silvicultura y bioeconomía (La Bioeconomía, 2015).

Algunas iniciativas de mejores prácticas para la gestión sostenible de los bosques son las siguientes:

- Inversiones en tecnologías sostenibles: El gobierno neerlandés ofrece subsidios para innovaciones que promuevan el uso eficiente de los recursos forestales, como las tecnologías de biorrefinería (Ekos, 2024).
- Estrategia Nacional de Gestión Forestal Sostenible con Iniciativas de reforestación urbana: Programas locales para integrar la silvicultura en entornos urbanos, plantando árboles y promoviendo espacios verdes para mejorar la calidad de vida (FSC, 2025) y (Gaceta holandesa, 2020)
- Liderazgo en bioeconomía circular: El país fomenta activamente la transformación de productos forestales en bioplásticos, bioenergía y otros derivados para reducir la dependencia de combustibles fósiles (Bioeconomía, 2020).
- Subvenciones para la producción de hidrógeno renovable: Ayudas estatales para un programa de producción de hidrógeno renovable. Busca reducir la dependencia del gas natural obteniendo beneficios climáticos (Tierras Holandesas, 2024).
- Educación y concienciación: Programas educativos sobre gestión forestal sostenible como por ejemplo A Rocha Países Bajos (2021) y campañas que buscan sensibilizar a la población sobre la importancia de los bosques, como la iniciativa Tegelwippen en Ámsterdam que tiene como objetivo incrementar áreas verdes con la participación ciudadana (El País, Clima y medio ambiente, 2024).
- Plan Holandés de Infraestructura Verde e incremento de árboles: Integración de los bosques en un enfoque más amplio de infraestructura verde nacional, con el objetivo de mejorar los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques, como la captación de carbono, la mejora de la calidad del aire y la recreación (NOS, 2020).
- Programa “Bosques resilientes al cambio climático”: Medidas específicas para fortalecer la naturaleza e impulsar la experiencia de los bosques holandeses, así como para almacenar CO<sub>2</sub> en el entorno, logrando bosques resilientes al clima en las zonas centro y sur de los Países Bajos (FSC, 2024).

El uso eficiente de recursos e implementación avanzada de tecnología en el sector productivo permite alcanzar altos niveles de producción en superficies relativamente pequeñas. Aunque Países Bajos no cuenta con un clima perfecto para forestación a gran escala, en comparación con otros países europeos, cuenta con tecnología específica y políticas de gestión eficiente de recursos. La forestación en este país es controlada y menos diversificada, pero con gestión forestal eficiente, lo que lo convierte en un referente en términos de eficiencia y sostenibilidad.

### **6.1.3 Análisis comparativo y comportamiento del periodo 2016-2020**

El análisis comparativo entre el periodo 2010-2015 y los últimos cinco años de estudio (2016-2020) permite identificar posibles variaciones en la eficiencia de los países. Los resultados muestran que la proporción de países eficientes se ha mantenido relativamente estable en ambos periodos, lo que indica que aquellos con un desempeño eficiente en la producción forestal han logrado sostenerlo en el tiempo.

Pese a lo anterior, se observan algunos cambios significativos. Durante el periodo 2010-2020, República Checa, Dinamarca, Eslovenia y Suiza fueron clasificados como países eficientes en el análisis. Sin embargo, en el periodo 2016-2020, esta eficiencia relativa disminuyó, lo que demuestra un menor desempeño en el uso de sus recursos forestales para esos países en los últimos años. Por el contrario, en 2016-2020, Irlanda, Hungría y Finlandia alcanzaron valores eficientes, reflejando una mejora en su desempeño relativo dentro del sector forestal.

En términos de eficiencia, el período 2016-2020 mostró que 16 de los 28 países fueron catalogados como eficientes. Esto se ve reflejado en la tabla 6-3.

Tabla 6-3. Valor de eficiencia y holguras de producción (2016-2020)

DMU	EFICIENCIA $\xi_0$	HOLGURAS DE PRODUCCIÓN (Slack output)		
		$holgura^{VAB}$	$holgura^{PROD}$	$holgura^{EX\_F}$
Bélgica	1	0	0	0
Bulgaria	0,258	73331,313	4950,5373	23301,985
Republica Checa	0,52	22271,782	0	153419,33
Dinamarca	0,903	2122,3536	1575,7101	11542,912
Alemania	1	0	0	0
Estonia	0,062	52736,769	5461,2409	0
Irlanda	1	0	0	0
Grecia	0,334	16328,53	37274,635	50132,853
España	1	0	0	0
Francia	1	0	0	0
Croacia	0,224	50195,8	20627,218	66017,876
Italia	1	0	0	0
Chipre	1	0	0	0
Letonia	0,09	68841,985	0	43263,417
Lituania	0,246	48941,165	28841,606	51298,885
Hungría	1	0	0	0
Países Bajos	1	0	0	0
Austria	1	0	0	0
Polonia	1	0	0	0
Portugal	1	0	0	0
Rumania	1	0	0	0
Eslovenia	0,314	15649,219	16357,392	0
Eslovaquia	0,088	92271,327	0	76644,781
Finlandia	1	0	0	0
Suecia	1	0	0	0
Reino Unido	0,458	33751,218	95198,559	732539,13
Noruega	1	0	0	0
Suiza	0,43	37284,205	41903,454	69470,767
<b>SUMA</b>		<b>513725,67</b>	<b>252190,35</b>	<b>1277631,9</b>

Durante el periodo 2016-2020, los principales países que contribuyeron al déficit fueron el Reino Unido, República Checa y Eslovaquia. Sin embargo, al analizar el periodo completo 2010-2020, se observa un cambio en el caso de República Checa: mientras en los últimos cinco años aparece como ineficiente, al considerar el periodo completo logra posicionarse como eficiente. En contraste, el Reino Unido y Eslovaquia mantuvieron su condición de ineficientes en ambos periodos.

Este resultado sugiere que la eficiencia de la República Checa ha disminuido en los últimos años, pasando de ser un país eficiente en el análisis global a uno de los principales contribuyentes al déficit en el periodo más reciente. Una explicación es que, al considerar todo el periodo, el desempeño positivo de los primeros años compensa la pérdida de eficiencia observada en los últimos años, permitiéndole aún ser clasificada como eficiente en el análisis global. Además, al analizar únicamente el periodo 2016-2020, se evidencia esta disminución en su eficiencia, posiblemente por el impacto de la sequía extrema entre 2018 y 2020, que provocó una alta mortalidad forestal en República Checa y un brote masivo de escarabajos de corteza. Esto llevó a la tala de grandes extensiones de bosques y saturó el mercado maderero, causando una caída de los precios y pérdidas económicas significativas para los propietarios forestales del país (European Forest Institute, 2025).

La sequías, debilitan los árboles y, por lo tanto, estos son más susceptibles a enfermedades y plagas. Además, la tala a gran escala en áreas que implementan medidas adecuadas de conservación provoca la erosión del suelo, afectando la capacidad de regeneración natural de los bosques (Radio Prague International, 2024). Esto implica un deterioro en el aprovechamiento de los recursos forestales por causas climáticas adversas.

Por otro lado, los déficits de corteza para la producción de madera en rollo (PROD) fueron de  $619,1 \cdot 10^6$  metros cúbicos sobre la corteza en el período 2010-2015 y de  $252,2 \cdot 10^6$  metros cúbicos en el período 2016-2020. Su reducción muestra que los países han mejorado la gestión de sus recursos forestales y su producción (Ver anexo 2).

El VAB muestra un incremento de 513.725,70 millones de euros en el período 2016-2020, lo que indica que el sector forestal, además de mejorar su proceso productivo, ha incrementado también el valor de sus productos finales. En este sentido, la innovación tecnológica y la mejora en la gestión de recursos más sostenible han sido factores que influyen directamente.

Además, es importante considerar lo siguiente:

- En 2016-2020, el déficit de madera en rollo mostró una reducción significativa, disminuyendo en casi tres veces respecto a los resultados de años anteriores, lo que equivale a una reducción del 59,3% en términos de  $m^3$ . Esto refleja una mejora en la disponibilidad y eficiencia de esta materia prima.
- El impacto económico aumentó casi 11 veces en 2016-2020 en comparación con el periodo 2010-2015. Este incremento de actividad económica, la mayor valoración del recurso forestal y el aumento de los costos han influido directamente. Si bien los países han logrado optimizar la producción de madera en rollo, aún enfrentan ineficiencias en la gestión y en el funcionamiento del mercado.
- Con respecto al material de crecimiento final, los últimos cinco años han presentado un incremento significativo en el déficit, lo que podría atribuirse a una mayor demanda de este material debido a la actividad económica en crecimiento o una limitación en el suministro. Esta insuficiencia en el volumen de material de crecimiento final para satisfacer la demanda podría ser por la falta de crecimiento proporcional en la producción.

Con respecto al periodo 2016-2020, también se analizan los países que actúan como modelos o referencias para los países ineficientes, junto con sus correspondientes valores  $\lambda_j$ , que definen el punto operativo objetivo o la meta de mejora para cada país. El detalle se observa en la tabla 6-4.

Tabla 6-4. Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2016-2020)

DMU	LAMBDA										
	ALEMANIA	ESPAÑA	FRANCIA	ITALIA	CHIPRE	PAÍSES BAJOS	POLONIA	PORTUGAL	FINLANDIA	SUECIA	NORUEGA
Bulgaria	0	0	0	0,251	0	0,721	0,028	0	0	0	0
Republica Checa	0	0,025	0	0	0	0,392	0	0,258	0,325	0	0
Dinamarca	0	0	0	0	0,675	0,273	0	0	0,052	0	0
Estonia	0,022	0	0	0,025	0	0,852	0	0	0	0,101	0
Grecia	0	0	0	0	0	0,784	0	0,144	0,071	0	0
Croacia	0	0	0	0,017	0	0,834	0,146	0	0,003	0	0
Letonia	0	0	0	0,193	0	0,672	0,038	0	0,005	0,092	0
Lituania	0	0	0	0,047	0	0,781	0,077	0	0,094	0	0
Eslovenia	0	0	0	0	0,539	0,290	0	0	0	0,079	0,092
Eslovaquia	0	0,192	0,009	0,212	0	0,585	0	0	0,002	0	0
Reino Unido	0	0,557	0	0	0	0,134	0	0	0,309	0	0
Suiza	0	0,064	0	0,024	0	0,769	0	0	0,143	0	0

En este periodo de estudio, si bien 16 de los 28 países son técnicamente eficientes, solo 11 se consideran puntos de referencia para otros países. Esto quiere decir que, aunque países como Bélgica, Irlanda, Hungría, Austria, Rumania son eficientes, no funcionan como modelos para los países ineficientes que buscan mejorar y, por lo tanto, no contribuyen a las combinaciones de eficiencia utilizadas para evaluar su desempeño.

Países Bajos es el principal país de referencia para todos los países ineficientes en el periodo 2016-2020, al igual que en el análisis del periodo completo 2010-2020. Sin embargo, en 2016-2020 destaca especialmente como referencia para Estonia, Croacia, Grecia, Lituania y Suiza. En el caso de Suiza, es importante señalar que, en el análisis de 2010-2020, ha alcanzado valores de eficiencia.

Por otro lado, pese a no ser una referencia tan significativa como Países Bajos, esta España, que es principal referente para el Reino Unido, mientras que Chipre lo es para Dinamarca y Eslovenia.

## 6.2 Resultados de la estimación del modelo de regresión fraccional

En primer lugar, se ha estimado, a través del método de mínimos cuadrados ordinarios, el modelo de regresión lineal múltiple. A continuación, se validan las hipótesis del modelo lineal múltiple para la comprobación de la normalidad, autocorrelación, heterocedasticidad de las perturbaciones, así como linealidad de las variables explicativas, asimetría y curtosis, arrojando los resultados que aparecen en la tabla 6-5.

Tabla 6-5. Validación de hipótesis del modelo lineal múltiple

	Valor	P-valor	Decisión
<b>Asimetría</b>	0.4819388	0.4875	Hipótesis aceptable.
<b>Curtosis</b>	0.8650313	0.3523	Hipótesis aceptable.
<b>Heterocedasticidad</b>	0.0005463	0.9814	Hipótesis aceptable.
<b>Normalidad</b>	0.9659000	0.4760	Hipótesis aceptable.
<b>Autocorrelación</b>	1.7971000	0.2496	Hipótesis aceptable.
<b>Linealidad</b>	2.2694000	0.1603	Hipótesis aceptable.

Tal como se muestra en la tabla 6-5, no existe evidencia muestral desde el punto de vista estadístico para el rechazo de la hipótesis nula de normalidad, lo que indica que se podría asumir que las eficiencias se distribuyen según una distribución normal. Asimismo, no se observa evidencia que muestre autocorrelación significativa, lo que confirma que los residuos son independientes entre sí y, por ende, es un buen indicador para la validez del modelo. Por otra parte, la hipótesis de linealidad tampoco se rechaza, lo que respalda que la relación entre las variables explicativas y la variable dependiente es lineal. Considerando en todos los contrastes anteriores un nivel de significancia del 0,05.

Por lo tanto, a partir de los resultados anteriores se concluye que el modelo de regresión lineal múltiple estimado no contradice ninguna de las hipótesis básicas del modelo teórico. Sin embargo, las estimaciones de la eficiencia obtenidas del modelo lineal no están completamente acotadas dentro del intervalo unitario cerrado [0,1]. En este estudio, aproximadamente el 10% de los valores de eficiencia estimados se encuentran fuera de este rango, pese a que estos valores son muy cercanos a 1.

Debido a lo anterior, resulta necesario la especificación de un modelo de regresión alternativo que no adolezca de esta debilidad en las estimaciones. En este sentido, los modelos de regresión fraccional, estimados mediante el método de Cuasi Máxima Verosimilitud, son una opción, ya que no requieren el cumplimiento de ninguna hipótesis para que los resultados se consideren válidos y precisos. Para ello, se seleccionan los modelos de regresión fraccional como metodología de análisis para explicar los valores de eficiencia obtenidos.

Estos modelos son útiles para estudiar y modelizar datos donde la variable dependiente es una proporción o fracción que toma valores en el intervalo [0,1]. Dichos valores están acotados entre 0, que representa la menor eficiencia posible y 1, que es el valor de eficiencia máxima.

La elección de este modelo garantiza que las predicciones generadas se encuentren dentro del rango previamente descrito, que sean estadísticamente consistentes y puedan interpretarse correctamente según el objetivo de estudio. Además, estos modelos se adaptan mejor a las propiedades de eficiencia calculadas en DEA para la evaluación de la influencia de las variables exógenas implementadas.

La tabla 6-7 muestra los resultados de las estimaciones del modelo de regresión lineal múltiple, así como las cuatro especificaciones del modelo fraccional (logit, probit, loglog, cloglog).

Es importante observar el signo de los coeficientes, la significancia estadística, el ajuste  $R^2$  y los resultados de la prueba del error de especificación del modelo de regresión (RESET). Todos estos criterios de evaluación nos ayudan a entender qué tan bien se ajusta el modelo, si las relaciones entre las variables tienen sentido y si el modelo está correctamente especificado.

Según el modelo de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), pertenecer a la región Norte incrementa la eficiencia en 1,0499 unidades, siendo esta la región con el mayor impacto absoluto en el modelo. Le siguen las regiones Centro-Oeste y Centro-Este, con coeficientes de 0,8734 y 0,8572, respectivamente, ambas también significativas positivas. La región Sur-Oeste presenta un coeficiente de 0,4838 y es marginalmente significativo. En cuanto a las variables climáticas, la temperatura (TEMP), con un coeficiente de 0,4134, es significativa e influye directamente en los procesos forestales. Por su parte, las precipitaciones (PRECIP) tienen un efecto positivo, aunque más moderado. Esta última está relacionada con la necesidad de mantener niveles adecuados de humedad para el crecimiento forestal. La superficie terrestre (TIERRA), con un coeficiente de 0,1888, es marginalmente significativa en MCO, pero cobra mayor relevancia en los modelos de regresión fraccionales, destacándose como una variable clave.

El modelo MCO presenta un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,8624, lo que indica que el 86,24% de la variabilidad observada en la eficiencia puede ser explicada por las variables exógenas incluidas en este modelo. Este valor describe un buen ajuste, ya que refleja cómo las variables exógenas influyen de manera significativa en la eficiencia.

El análisis de las cuatro especificaciones del modelo de regresión fraccional (logit, probit, loglog y cloglog), confirma que la región geográfica también tiene impacto significativo en la eficiencia forestal. En general, las regiones "NORTE", "CENTRO OESTE", "CENTRO ESTE" y "SUR OESTE" presentan coeficientes positivos y son estadísticamente significativas en la mayoría de los modelos. En particular, destaca la región Sur-Oeste, que presenta los coeficientes más altos y es estadísticamente significativa en todas las especificaciones, especialmente en el modelo *logit* y *loglog*. Este último muestra los coeficientes más significativos, destacando a la región Sur-Oeste, que registra el mayor impacto, seguida por Centro-Oeste (2,67), Norte (2,45) y Centro-Este (2,01). Estos resultados refuerzan la importancia de la ubicación geográfica en la eficiencia del sector.

En cuanto a la variable superficie terrestre (TIERRA), es significativa en las cuatro especificaciones fraccionales, destacando principalmente en el modelo *loglog* (1,39). Esto refuerza la idea de que una mayor disponibilidad de tierra está asociada con una mayor eficiencia forestal.

Respecto a las variables climáticas, la temperatura (TEMP) muestra un coeficiente positivo en todos los modelos, aunque es significativa solo en el modelo *loglog* (1,41). Esto refuerza la idea de que el clima desempeña un rol importante en el resultado de la eficiencia. Por su parte, las precipitaciones (PRECIP) también tienen un efecto positivo y significativo en *loglog* (0,87), lo que indica que la disponibilidad de agua sigue siendo un factor relevante, aunque con menor impacto que la temperatura.

En cuanto a la variable PIB, presenta coeficientes negativos en casi todas las especificaciones y no resulta estadísticamente significativo en este caso.

En términos de ajuste del modelo, los valores de Pseudo  $R^2$  varían entre 0,372 y 0,466, lo que indica que los modelos fraccionales explican una proporción moderada a alta de la variabilidad en la eficiencia. El modelo de regresión *loglog* destaca por presentar el mejor ajuste (0,466), siendo esta especificación la que mejor explica la variabilidad de la eficiencia forestal en comparación con los otros modelos. En contraste, el modelo *cloglog* presenta el menor ajuste (0,372), siendo el menos adecuado para evaluar una relación entre las variables explicativas y la eficiencia.

El diagnóstico de corrección de la forma funcional se comprueba mediante la prueba RESET (Regression Equation Specification Error Test), que evalúa si la especificación del modelo es correcta y ayuda a detectar posibles errores. Los resultados se pueden observar con mayor detalle en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6. Validación de hipótesis del modelo lineal múltiple

Modelo	Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)	Modelo de regresión fraccional (f)			
		logit	probit	loglog	cloglog
Prueba RESET	0.44817	2.999	2.507	2.744	0.355
P-valor	0.8695	0.083	0.113	0.098	0.551

Para este caso, la hipótesis nula y alternativa es la siguiente:

$H_0$ : Modelo de regresión correctamente especificado.

$H_1$ : Modelo de regresión no está correctamente especificado.

Con un nivel de significancia del 5%, todos los modelos están correctamente especificados, ya que no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Esto implica que la especificación de los modelos es adecuada y que los resultados obtenidos son útiles para evaluar los factores que influyen en la eficiencia forestal.

Tabla 6-7. Resultados de las estimaciones por MCO y Regresión fraccional

Modelo	Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)	Modelo de regresión fraccional (f)			
		logit	probit	loglog	cloglog
<b>PIB</b>	-0.1045 (0.1196)	0.044582 (1.178207)	-0.137178 (0.464934)	-0.141318 (0.719254)	-0.159370 (0.352739)
<b>TIERRA</b>	0.1888 (0.1082)	1.472069** (0.629578)	0.883189** (0.364326)	<b>1.393013***</b> (0.500244)	0.757528** (0.363831)
<b>TEMP</b>	0.4134** (0.1328)	1.320115 (0.820463)	0.699723 (0.453435)	<b>1.414200**</b> (0.642868)	0.310805 (0.451822)
<b>PRECIP</b>	0.2308* (0.1062)	0.838111 (0.574689)	0.455235 (0.310142)	<b>0.874405*</b> (0.487034)	0.284936 (0.252862)
<b>NORTE (Reg1) (a)</b>	1.0499*** (0.2257)	2.191175 (1.505208)	1.120366 (0.719376)	<b>2.445726**</b> (1.059139)	0.303992 (0.686518)
<b>CENTRO OESTE (Reg2) (b)</b>	0.8734*** (0.1749)	2.619079** (1.080744)	1.471753** (0.606175)	<b>2.679075***</b> (0.972037)	0.969939* (0.527746)
<b>CENTRO-ESTE (Reg3) (c)</b>	0.8572*** (0.1753)	1.860479** (0.873638)	1.046108** (0.449099)	<b>2.013780***</b> (0.724326)	0.579065 (0.373185)
<b>SUR-OESTE (Reg4) (d)</b>	0.4838 (0.2756)	16.557995*** (1.261634)	5.017911*** (0.559573)	17.361628*** (1.101513)	2.854605*** (0.572129)
<b>%Valores ajustados fuera del rango [0,1]</b>	10%				
<b>R<sup>2</sup></b>	0.8624	–	–	–	–
<b>Pseudo R<sup>2</sup></b>	–	0.449	0.427	0.466	0.372
<b>Prueba RESET</b>	0.44817	2.999	2.507	2.744	0.355

Consideraciones:

- Variable dependiente: Valor de eficiencia del modelo SBM.
- Muestra: 28 países pertenecientes a la Unión Europea.
- “\*”, “\*\*” y “\*\*\*” indican un nivel de significancia de 10%, 5% y 1% respectivamente.
- El error estándar robusto corresponde a los valores que aparecen entre paréntesis.
- Conjunto de referencia de variables Dummy: Región europea SUR-ESTE (Bulgaria, Grecia, Croacia, Chipre y Eslovenia).

(a) Variable Dummy que marca 1 para la región de Europa del NORTE (Dinamarca, Estonia, Finlandia, Letonia, Lituania, Noruega y Suecia) y 0 para los demás países.

(b) Variable Dummy que marca 1 para la región de Europa CENTRAL-OESTE (Austria, Bélgica, Francia, Alemania, Irlanda, Países Bajos, Suiza y Reino Unido) y 0 para los demás países.

(c) Variable Dummy que marca 1 para la región de Europa CENTRAL-ESTE (República Checa, Hungría, Polonia, Rumanía y Eslovaquia) y 0 para los demás países.

(d) Variable dummy que marca 1 para la región SUR-OESTE de Europa (Italia, Portugal y España) y 0 para los demás países.

(f) Modelo de regresión fraccionaria estándar de una parte. Método de estimación de cuasi-máxima verosimilitud.

En términos generales, los modelos fraccionales confirman las tendencias observadas en el modelo MCO y resaltan aún más el impacto de las variables, como es el caso de la región geográfica y la superficie terrestre. Además, la diferencia en los ajustes de los modelos señala que el modelo *loglog* es la mejor alternativa dentro de las especificaciones consideradas.

La figura 6-2, representa gráficamente los valores individuales de eficiencia de los países de las distintas regiones europeas.

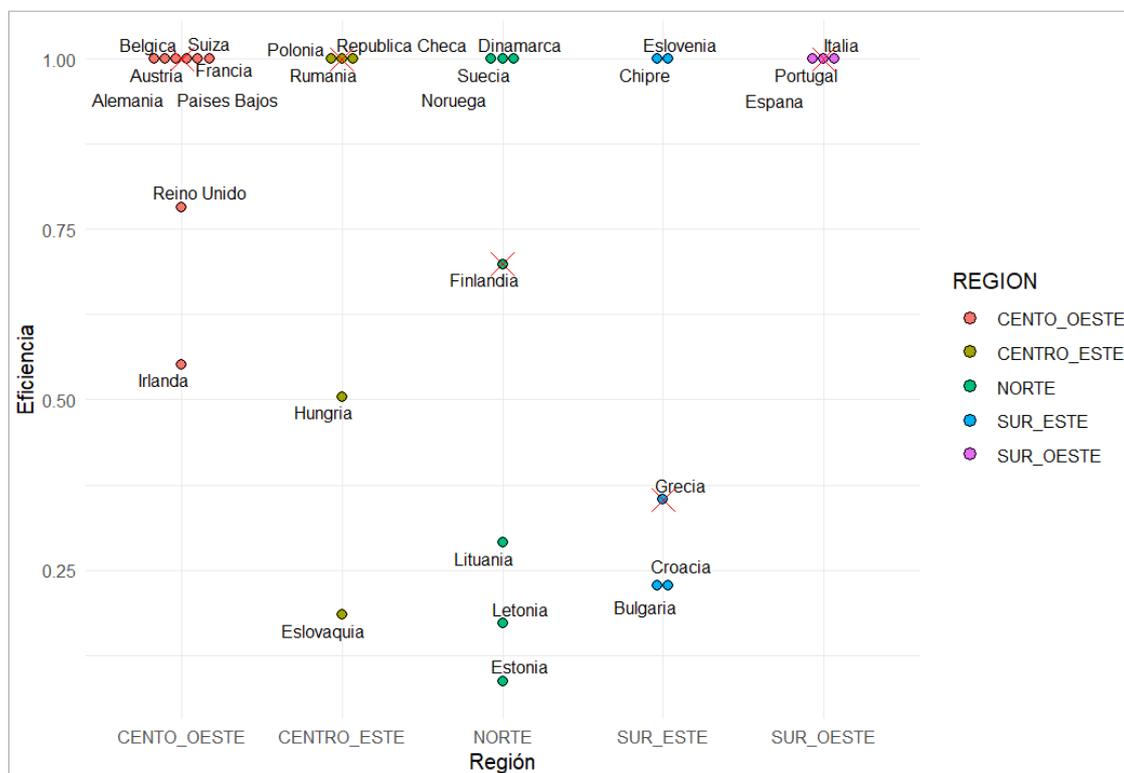


Figura 6-2. Eficiencia por país y región. Gráfico de valor individual de la eficiencia de los países de cada región forestal europea. El símbolo (x) representa el valor de la mediana

Específicamente, la figura anterior muestra la distribución bidimensional de los países de la Unión Europea según su eficiencia en las diferentes regiones que la componen. Se observa que la mayoría de los países eficientes se encuentran en la zona Centro-Oeste. Por otro lado, cabe destacar que la totalidad de los países que están en la zona Sur-Oeste son parte de la frontera eficiente.

La tabla 6-8 muestra la media de los efectos parciales estimados para cada variable explicativa, calculada como la media muestral de sus efectos parciales.

Tabla 6-8 Media muestral de efectos parciales

Variables	Modelo de regresión Fraccional			
	Logit	Probit	LogLog	CLogLog
PIB	0.006249078	-0.03307834	0.02505804	-0.03831808
NORTE (Reg1)	0.307135482	0.27015963	-0.43366766	0.07309022
CENTRO-OESTE (Reg2)	0.367114545	0.35489118	-0.47504427	0.23320723
CENTRO-ESTE (Reg3)	0.260782117	0.25225327	-0.35707646	0.13922754
SUR-OESTE (Reg4)	2.320922731	1.20999422	-3.07850338	0.68634668
TIERRA	0.206338867	0.21296774	-0.24700429	0.18213607
TEMP	0.185039540	0.16872775	-0.25076096	0.07472834
PRECIP	0.117477373	0.10977304	-0.15504642	0.06850843

La media muestral de los efectos parciales se utiliza para la evaluación del impacto que generan los factores exógenos sobre los valores de eficiencia obtenidos en la primera etapa de este estudio. Se analiza e interpreta cómo las variables PIB, TEMP, PRECIP, TIERRA y las diferentes regiones de Europa influyen en los valores de eficiencia. Estos resultados se analizan a través de los cuatro modelos de regresión fraccional para proporcionar información detallada sobre el comportamiento del modelo.

En general, los coeficientes de las variables en los distintos modelos fraccionales presentan signos de significancia similares, lo que demuestra una relación coherente entre las variables y la eficiencia en la mayoría de las especificaciones. Sin embargo, el modelo *loglog* muestra algunas diferencias en comparación con los demás, lo que indica que este modelo maneja de forma diferente la heterogeneidad de las variables.

Los coeficientes para la región Sur-Oeste son significativamente más altos en los modelos *logit* y *probit*, con valores de 2.32 y 1.21 respectivamente, lo que indica mayor impacto e influencia en la eficiencia en comparación con los otros coeficientes. Para el resto de las regiones, también se observa un comportamiento similar, con coeficientes más altos en los modelos *logit* y *probit*.

La variable PIB es la que presenta los valores más cercanos a cero en comparación con las otras variables. En el modelo *logit*, en promedio, un aumento de 1000 millones de dólares en el PIB de 2020 se asocia a un incremento de 0.00625 en el valor de eficiencia. Sin embargo, para los modelos *probit* y *cloglog*, este mismo aumento en el PIB se relaciona con la disminución del valor de eficiencia de 0.0331 y 0.0383, respectivamente, ya que los valores son negativos. Esto puede explicarse porque el análisis realizado hasta el año 2020 incluye una mayor cantidad de países eficientes con valores menores de PIB, lo que explica que esta variable tenga un impacto limitado sobre la eficiencia. Como resultado, el PIB presenta un débil poder explicativo sobre la eficiencia en el contexto del análisis realizado.

La ubicación geográfica, debido a las características particulares de cada zona, es una de las principales variables que influyen en la eficiencia de la industria de la madera en rollo en la Unión Europea.

Los resultados de este trabajo son relevantes para las personas y entidades gubernamentales involucradas en el sector forestal, así como para aquellos interesados en aplicar mejores prácticas que contribuyan a la producción sostenible de madera en rollo y promuevan una gestión forestal responsable.

### 6.2.1 Sugerencias y aspectos a considerar para la mejora de la eficiencia en la industria europea de la madera

Los diferentes tipos de bosques existentes en la Unión reflejan su diversidad geoclimática, que incluye bosques boreales, bosques alpinos de coníferas, entre otros (Parlamento Europeo, 2023). Las regiones alpinas de Europa central y occidental, así como las regiones boreales del norte, con sus extensas áreas montañosas, poseen condiciones naturales que podrían favorecer su competitividad en el mercado mundial. Sin embargo, esta competitividad se ve influenciada por países como Rusia, Brasil, Estados Unidos, Canadá, China, Australia y la República Democrática del Congo, que poseen más de 100 millones de hectáreas cada uno (Ritchie, 2021).

Por otro lado, el uso de especies de rápido crecimiento, como el pino y el eucalipto es una estrategia efectiva en países como Argentina, Brasil, España y Portugal, ya que estas plantaciones satisfacen gran parte la demanda del sector industrial (ElDiarioAR, 2023). Sin embargo, se recomienda mantener un equilibrio en la proporción de plantaciones de estas especies, alternándolas con especies de crecimiento moderado o lento, con el fin de contribuir a la conservación de hábitats diversos (flora y fauna) y reducir el impacto sobre los ecosistemas. La implementación de estas prácticas en otras regiones de la UE podría mejorar la productividad y sostenibilidad del sector (Ayala et al., 2010).

Para competir en mercados internacionales, es esencial mantener un equilibrio entre la calidad de los productos, la eficiencia logística y las relaciones comerciales (Diario del Exportador, 2025). El uso de tecnología y herramientas digitales en la gestión forestal, como las que utiliza Países Bajos para monitorear el impacto ambiental y los procesos de transformación de la madera, puede aumentar la eficiencia y reducir costos (konicaminolta, 2025).

Por otro lado, a excepción del Reino Unido, los países que presentan mayores valores de PIB en este estudio son aquellos que tienen mayor eficiencia. Esto puede dar indicios de que esta variable de estudio podría contribuir a una mejor eficiencia en la industria de madera en rollo, no solo por su capacidad de inversión, sino también por el buen uso que hacen de sus recursos.

# 7 CONCLUSIONES

Este informe evalúa la eficiencia relativa del sector forestal de 28 países de UE durante el periodo 2010-2020. Se analizan los factores que influyen en dicha eficiencia y se comparan los resultados obtenidos con los del estudio que abarca el periodo 2010-2015. Para ello, se utiliza el modelo DEA SBM orientado a la producción, tomando como entradas las personas empleadas a tiempo completo (EMP), bosque disponible para suministro de madera (BDSM) y las existencias iniciales en crecimiento (EX\_I). Como salidas la producción de madera en rollo (PROD), el valor agregado bruto (VAB) y las existencias finales de crecimiento (EX\_F).

El modelo DEA determina que 17 de los 28 países evaluados son eficientes, mientras que el resto presenta déficit en la producción. Los países que más contribuyen, en términos absolutos a estos déficits son Bulgaria, Grecia y Letonia. Los países con valores de eficiencia relativa más bajos son Estonia, Letonia, Eslovaquia y Bulgaria.

El estudio identifica las holguras de producción, que miden los déficits adicionales en los *outputs* (VAB, PROD y EX\_F) y que deben ajustarse para alcanzar la eficiencia. Estas holguras indican áreas específicas de mejora, mostrando cuánto podría aumentar la producción sin necesidad de emplear recursos adicionales. Bulgaria, uno de los países con menor eficiencia, registra las mayores holguras en VAB y EX\_F. Además, el modelo entrega los valores del coeficiente lambda, que representan combinaciones convexas y permiten entender cómo una DMU ineficiente se compara con aquellas eficientes que sirven como referencia.

De los 9 países considerados como modelos de referencia, Países Bajos destaca por su combinación óptima de entradas y salidas, convirtiéndose en una referencia clave para mejores prácticas. En particular, este país se presenta como el principal modelo de referencia para Irlanda, Estonia, Hungría, Croacia y Eslovaquia. También se calculan los objetivos de mejora, que representan los valores ajustados que los países deben alcanzar para volverse eficiente.

En la segunda etapa, se estimaron cuatro modelos de regresión fraccional para evaluar el comportamiento y la validez de los resultados. Se analiza la relación entre la eficiencia y las variables exógenas (PIB, TIERRA, TEMP, PRECIP, REGION) para evaluar la consistencia en los resultados. El estudio proporciona estimaciones cuantitativas de los efectos parciales de cada uno de los factores de estudio, lo que respalda los resultados en cada modelo.

Los modelos de regresión fraccional muestran que las variables más significativas para la eficiencia son las regiones geográficas, la superficie terrestre (TIERRA) y la temperatura (TEMP). La región Sur-Oeste muestra el mayor impacto positivo sobre la eficiencia, seguida por las regiones Centro-Oeste, Norte (2,4457) y Centro-Este (2,0138), todas con coeficientes positivos y estadísticamente significativos. La superficie terrestre (TIERRA) tiene un impacto considerable e indica que una mayor disponibilidad de tierra está asociada con una mayor eficiencia forestal. La temperatura (TEMP) también es un factor clave para la eficiencia en este modelo.

Las cuatro especificaciones de regresión fraccionaria mostraron coherencia en los signos y la significancia de los coeficientes, evidenciando una relación consistente entre las variables y la eficiencia. El modelo *loglog* destaca por tener el mejor ajuste, explica mejor la variabilidad de la eficiencia forestal en comparación con los otros modelos.

En el análisis hasta 2015, el PIB y las regiones del Norte y Europa Central Occidental eran especialmente significativas. Sin embargo, al extender el estudio hasta 2020, que incluye más países eficientes, las regiones continúan siendo significativas, pero el impacto del PIB sobre la eficiencia resulta más limitado.

La UE ha adoptado políticas forestales internacionales como la División Forestal de la FAO, el Comité de Bosques de la UNECE, los Foros de las Naciones Unidas sobre bosques (UNFF), entre otros acuerdos con el objetivo de mejorar la gestión forestal (Portal de apoyo a las políticas y la gobernanza, 2025).

Este estudio evalúa el sector de la madera en Europa para establecer un marco de referencia que guíe las estrategias forestales de la UE, políticas nacionales y acciones dentro de este sector, con el fin de promover la economía circular mediante prácticas de gestión, inversiones en tecnología, reforestación, desarrollo de nuevos productos e iniciativas económicas.

La identificación de Países Bajos como principal modelo de referencia, junto con los países que lograron mejorar su eficiencia entre 2015 y 2020, proporcionan información valiosa para implementar buenas prácticas en el sector forestal. Para mejorar la eficiencia en la producción de madera en rollo, fortalecer la competitividad del mercado y garantizar la sostenibilidad ambiental, los países de la UE deben enfocarse en aumentar las variables de salida, optimizar la gestión de recursos e implementar estrategias y acuerdos gubernamentales efectivos.

## 8 REFERENCIAS

---

- Akay, A. O. (2023). Wood harvesting efficiency analysis of regional forest directorates in Turkey: k-means clustering and data envelopment analysis approach. *International Journal of Forest Engineering*, 34(2), 176-189.
- Alinvest Verde. El sector forestal-maderero de Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, 2024. Disponible en: <https://alinvest-verde.eu/wp-content/uploads/2024/12/El-sector-forestal-maderero.pdf>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].
- Amirteimoori, A., Cezar, A., Zadmiraie, M., & Susaeta, A. (2024). Environmental performance evaluation in the forest sector: An extended stochastic data envelopment analysis approach. *Socio-Economic Planning Sciences*, 94, 101943.
- Amirteimoori, A., Banker, R. D., Zadmiraie, M., & Susaeta, A. (2023). Managerial ability and productivity growth in the European forest sector. *European Journal of Forest Research*, 142(5), 1029-1043.
- A Rocha. Recursos de educación ambiental para escuelas en los Países Bajos (2021). En: *A Rocha* [en línea]. Disponible en: <https://arocha.org/es/proyectos/recursos-de-educacion-ambiental/>. [Consulta: 10 de enero de 2025].
- Banco Mundial. Climate Change Knowledge Portal For Development Practitioners and Policy Makers. En: The World Bank Group [en línea]. Disponible en: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>. [Consulta: 13 de julio de 2024].
- Bioeconomía.info. (2020). Holanda: asociatividad, economía circular y biocombustibles. En: BioEconomía.info [en línea]. 26 de junio de 2020. Disponible en; <https://www.bioeconomia.info/2020/06/26/holanda-asociatividad-economia-circular-y-biocombustibles/>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].
- Byun, S. Y., Yoo, D. I., & Koo, J. C. (2024). Analysis of the Factors Influencing the Efficiency of Natural Recreation Forest Management. *Journal of Korean Society of Forest Science*, 113(2), 153-163.
- Chen, N., Qin, F., Zhai, Y., Cao, H., Zhang, R., & Cao, F. (2020). Evaluation of coordinated development of forestry management efficiency and forest ecological security: A spatiotemporal empirical study based on China's provinces. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121042.
- Comisión Europea, Comunicación de la comisión al parlamento europeo, el consejo, el comité económico y social europeo y el comité de las regiones, 2013. Disponible en: [https://www.asturias.es/Asturias/descargas/PDF\\_TEMAS/Europa/documentos\\_clave/2013\\_09\\_20\\_Bosques-Nueva%20Estrategia%20Forestal.pdf](https://www.asturias.es/Asturias/descargas/PDF_TEMAS/Europa/documentos_clave/2013_09_20_Bosques-Nueva%20Estrategia%20Forestal.pdf). [Consulta: 13 de marzo de 2025].
- Comisión Europea, Pacto Verde Europeo: la Comisión propone una nueva estrategia para proteger y restaurar los bosques de la UE (2021). En: *Comisión Europea* [en línea]. 16 de julio de 2021. Disponible en: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip\\_21\\_3723](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_21_3723). [Consulta: 13 de marzo de 2025].
- COMTRADE (Naciones Unidas UN). Principales exportadores de productos forestales [en línea]. En: UN Comtrade Plus [en línea]. Disponible en: <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow?Frequency=A&Flows=X&CommodityCodes=44&Partners=0&Reporters=all&period=2023&AggregateBy=none&BreakdownMode=plus>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].
- Consilium (2024), Consejo de la Unión Europea, Objetivo 55 (Fit for 55). En: Consejo de la Unión Europea [en línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].

Consilium (2024), Consejo de la Unión Europea, Pacto Verde Europeo. En: *Consejo de la Unión Europea* [en línea]. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].

CO2 Revolution, Aumenta la masa forestal en Europa (2024). En: *CO2 Revolution* [en línea]. Disponible en: <https://co2revolution.es/aumenta-la-masa-forestal-en-europa/>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].

Diario del Exportador (2025). La calidad como factor decisivo del éxito de una empresa en los Negocios Internacionales. En: *Diario del Exportador* [en línea]. 30 de agosto de 2017. Disponible en: <https://www.diariodelexportador.com/2017/08/la-calidad-como-factor-decisivo-del.html> [Consulta: 13 de marzo de 2025].

Distrito Forestal, 2024. El estado de los bosques 2024. En: *Distrito Forestal* [en línea]. Disponible en: [https://distritoforestal.es/images/el\\_estado\\_de\\_los\\_bosques\\_2024.pdf](https://distritoforestal.es/images/el_estado_de_los_bosques_2024.pdf). [Consulta: 14 de marzo de 2025].

European Forest Institute (2025). Questions sobre los bosques – Cuestión 4: ¿Cómo se gestionan los bosques en Europa? Disponible en: [https://efi.int/forestquestions/q4\\_es](https://efi.int/forestquestions/q4_es) Efficiency of Micro and Small Wood-Processing Enterprises in the EU—Evidence from DEA and Fractional Regression Analysis. *Forests*, 15(1), 58.

Ekos (2024) Sostenibilidad. Holanda crea la primera biorrefinería que transforma cáscaras de naranja en productos ecológicos. En: *Ekosnegocios* [en línea]. 13 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://ekosnegocios.com/articulo/holanda-crea-la-primera-biorrefineria-que-transforma-cascaras-de-naranja-en-productos-ecologicos> [Consulta: 13 de marzo de 2025].

El diario AR (2023). Sudamérica: una región plantadora de árboles, pero solo de dos especies. En: *elDiarioAR* [en línea]. Disponible en: [https://www.eldiarioar.com/sociedad/medio-ambiente/sudamerica-region-plantadora-arboles-especies\\_1\\_10537956.html](https://www.eldiarioar.com/sociedad/medio-ambiente/sudamerica-region-plantadora-arboles-especies_1_10537956.html). [Consulta: 13 de marzo de 2025].

El País (2024). Bajo las baldosas, un vergel: levantar cemento para reverdecer ciudades. En: *El País* [en línea]. 28 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2024-12-28/bajo-las-baldosas-un-vergel-levantar-cemento-para-reverdecer-ciudades.html> [Consulta: 13 de marzo de 2025].

Elyse Mills (2015). La bioeconomía. Tni. Disponible en: [https://www.tni.org/files/publication-downloads/tni\\_la\\_bioeconomia\\_guia\\_basica.pdf](https://www.tni.org/files/publication-downloads/tni_la_bioeconomia_guia_basica.pdf). [Consulta: 14 de marzo de 2025].

EUROSTAT. Database: GDP and main components (output, expenditure and income) [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama\\_10\\_gdp\\_custom\\_13355795/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_gdp_custom_13355795/default/table?lang=en). [Consulta: 1 de agosto de 2024].

EUROSTAT. Forests in the EU: key figures. En: *Eurostat News* [en línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/edn-20240321-1>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

EUROSTAT. Forests, forestry and logging [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Forests,\\_forestry\\_and\\_logging](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Forests,_forestry_and_logging). [Consulta: 1 de agosto de 2024].

EUROSTAT. PIB (GDP and main components (output, expenditure and income)) [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama\\_10\\_gdp\\_custom\\_14754153/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nama_10_gdp_custom_14754153/default/table?lang=en) [Consulta: 1 de agosto de 2024].

EUROSTAT. Wood products - production and trade [en línea]. Disponible en: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood\\_products\\_-\\_production\\_and\\_trade](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade). [Consulta: 1 de agosto de 2024].

EUROSTAT, 2024. Wood products - production and trade. En: *Eurostat* [en línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/52477.pdf>. [consulta: 1 de agosto de 2024].

ExportaPymes, 2002 La Haya. El Mercado Holandés de la Madera (2002). En: *Exportapymes* [en línea]. [https://www.exportapymes.com/documentos/productos/Pe1275\\_holanda\\_madera.pdf](https://www.exportapymes.com/documentos/productos/Pe1275_holanda_madera.pdf). [consulta: 14 de marzo de 2025].

FAO (2015). Año internacional de los suelos. Suelos sanos para una vida sana. Los bosques y suelos forestales contribuyen de manera esencial a la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial [en línea] Disponible en: <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FAO. El estado de los bosques del mundo (2024) [en línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/542dc735-5ab6-41e0-9ea6-1e492ee4afda/content/src/html/non-timber-forest-products.html#gsc.tab=0> [Consulta: 1 de agosto de 2024].

Versión resumida de El estado de los bosques del mundo (2022). Vías forestales hacia la recuperación verde y la creación de economías inclusivas, resilientes y sostenibles [en línea]. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/ae9ddbe0-c37f-4f38-81d9-70029c182479/content>. [Consulta: 13 de marzo de 2025].

FAO. Food and Agriculture Organization, 2015. FAO yearbook of forest products [en línea]. Disponible es: <http://www.fao.org/3/a-i7304m.pdf>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/00041007-4dea-43c8-8682-7b5dd7cb4f00/content>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FAOSTAT, Forestal Producción y Comercio, Datos (2023) [en línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/es/#data/FO>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FAO. Tierras y Aguas: Integrated Landscape Management. Disponible en: <https://www.fao.org/land-water/overview/integrated-landscape-management/es/>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FAO. The State of the World's Forests 2020: Forests, biodiversity and people [en línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/state-of-forests>. [Consulta: 1 de agosto de 2024].

FSC. Explora los bosques de los Países Bajos [en línea]. Disponible en: <https://fsc.org/es/explora-los-bosques-de-los-paises-bajos>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Fundación Biodiversidad, 2024. El estado de los bosques del mundo. En: *IEEB* [en línea]. Disponible en: [https://ieeb.fundacion-biodiversidad.es/sites/default/files/2024\\_el\\_estado\\_de\\_los\\_bosques\\_del\\_mundo\\_0.pdf](https://ieeb.fundacion-biodiversidad.es/sites/default/files/2024_el_estado_de_los_bosques_del_mundo_0.pdf). [consulta: 14 de marzo de 2025].

Gaceta Holandesa (2020). Holanda empieza a reforestar parte de los bosques talados [en línea]. Disponible en: <https://www.gacetaholandesa.com/noticias/holanda-empieza-a-reforestar-parte-de-los-bosques-talados/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Gamazo Chillón, Juna Carlos, “Importancia del sector forestal y su (posible) valoración económica”, *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros* 263 (2024): 122-174.

Gobierno De España. Las tecnologías que potencian la industria forestal de precisión [en línea]. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/blog/las-tecnologias-que-potencian-la-industria-forestal-de-precision>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Guía Blog Holandesa (2024). Biodiversidad de Holanda [en línea]. Disponible en: <https://blog-holanda.com/historia-y-geografia-de-holanda/biodiversidad-de-holanda/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Gutiérrez, E., & Lozano, S. (2013). Avoidable damage assessment of forest fires in European countries: an efficient frontier approach. *European journal of forest research*, 132, 9-21.

Gutiérrez, E., & Lozano, S. (2022). Cross-country comparison of the efficiency of the European forest sector and second stage DEA approach. *Annals of operations Research*, 314(2), 471-496.

HablamosDeEuropa, Estrategia Forestal de la Unión Europea (2013) [en línea]. Disponible en: <https://www.hablamosdeeuropa.es/es/Paginas/Noticias/Estrategia-Forestal-de-la-Uni%C3%B3n-Europea.aspx>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Hannah Ritchie (2021) - "Forest area" [en línea]. Disponible en: OurWorldinData.org. <https://ourworldindata.org/forest-area>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Holland Circular Hotspot, 2018. Lo circular se vuelve global. En: *Holland Circular Hotspot* [en línea]. Disponible en: <https://hollandcircularhotspot.nl/wp-content/uploads/2020/07/Cat%C3%A1logo-Holanda-FINAL.pdf> [consulta: 14 de marzo de 2025].

Horto Info (2023). En Holanda desarrollan un invernadero totalmente autónomo, controlado por inteligencia artificial [en línea]. 14 de julio de 2023. Disponible en: <https://hortoinfo.es/en-holanda-desarrollan-un-invernadero-totalmente-autonomo-controlado-por-inteligencia-artificial/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Huang, X. J., An, R., Yu, M. M., & He, F. F. (2022). Tourism efficiency decomposition and assessment of forest parks in China using dynamic network data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132405.

ILOSTAT. (2022). El sector forestal emplea a 33 millones de personas en todo el mundo, según nuevas estimaciones mundiales [en línea]. Disponible en: <https://ilostat.ilo.org/es/blog/forest-sector-employs-33-million-around-the-world-according-to-new-global-estimates/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Interlace Hub. Plan Tree (Plan Boom) - Países Bajos [en línea]. Última actualización: 30 de agosto de 2023. Disponible en: [https://interlace-hub.com/es/plan-tree-plan-boom-pa%C3%ADses-bajos#:~:text=La%20iniciativa%20nacional%20%22Plan%20Tree,m%C3%A1s%20bello%2C%20verde%20y%20saludable](https://interlace-hub.com/es/plan-tree-plan-boom-pa%C3%ADses-bajos#:~:text=La%20iniciativa%20nacional%20%22Plan%20Tree,m%C3%A1s%20bello%2C%20verde%20y%20saludable.). [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Jin, M., Chen, N., Wang, S., & Cao, F. (2023). Does forestry industry integration promote total factor productivity of forestry industry? Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137767.

Kao, C. (2010). Malmquist productivity index based on common-weights DEA: The case of Taiwan forests after reorganization. *Omega*, 38(6), 484-491.

Konica Minolta. Agricultura digital: Cómo utilizan los floricultores neerlandeses la agricultura de precisión [en línea]. Disponible en: <https://www.konicaminolta.es/es-es/rethink-work/herramientas/agricultura-digital-como-utilizan-los-floricultores-neerlandeses-la-agricultura-de-precision>. [Consulta: 10 de agosto de 2024].

Liang, C., Wei, X., Meng, J., & Chen, W. (2022). How to improve forest carbon sequestration output performance: An evidence from state-owned forest farms in China. *Forests*, 13(5), 778.

Li, L., Hao, T., & Chi, T. (2017). Evaluation on China's forestry resources efficiency based on big data. *Journal of Cleaner Production*, 142, 513-523.

Li, M., Wang, X., Agyeman, F. O., Gao, Y., & Sarfraz, M. (2023). Efficiency evaluation and the impact factors of sustainable forestry development in China: adoption of super-efficiency data envelopment analysis and malmquist index methods. *Forests*, 14(5), 909.

LÓPEZ, Juan Carlos, AINIA. Las biorrefinerías, una apuesta firme hacia la (bio)economía circular. En: *AINIA News* [en línea]. Disponible en: <https://www.ainia.com/ainia-news/biorrefinerias-apuesta-firme-bioeconomia-circular/> [consulta: 25 enero 2025].

Młynarski, W., Prędko, A., & Kaliszewski, A. (2021). Efficiency and factors influencing it in forest districts in southern Poland: Application of Data Envelopment Analysis. *Forest Policy and Economics*, 130, 102530.

Mohammadi Limaie, S. (2020). Efficiency analysis of forest management units considering economics and carbon dynamic: A data envelopment analysis (DEA) approach. *Austrian Journal of forest science*, 137(3), 199-222.

Madera Sostenible. La superficie forestal europea aumentó un 9% en los últimos 30 años [en línea]. Por Juanma Miranda, 22 de febrero de 2021. Disponible en: <https://madera-sostenible.com/panorama/la-superficie-forestal-europea-aumento-un-9-en-los-ultimos-30-anos/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico (Miteco). Política Forestal Internacional [en línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/politica-forestal/planificacion-forestal/politica-forestal-internacional/index.html>. [Consulta: 10 de agosto de 2024].

Neykov, N., Křišťáková, S., Hajdúchová, I., Sedliáčiková, M., Antov, P., & Giertliová, B. (2021). Economic efficiency of forest enterprises—Empirical study based on data envelopment analysis. *Forests*, 12(4), 462.

Neykov, N., Kitchoukov, E., Antov, P., Dobrichiov, I., Halalisan, A. F., & Trichkov, N. (2024, April). Technical Efficiency Assessment of Land Transactions in Forest Areas Under Consolidation Campaign in Bulgarian South Western State Enterprise. In *Management, Innovation and Entrepreneurship in Challenging Global Times: Proceedings of the 16th International Symposium in Management (SIM 2021)* (pp. 491-497). Cham: *Springer International Publishing*.

Neykov, N., Sedliacikova, M., Antov, P., Potkány, M., Kitchoukov, E., Halalisan, A. F., & Poláková, N. (2023). Efficiency of Micro and Small Wood-Processing Enterprises in the EU—Evidence from DEA and Fractional Regression Analysis. *Forests*, 15(1), 58.

NOS. Los Países Bajos tienen 1,6 millones de árboles más y eso es sólo el comienzo [en línea]. Domingo 5 de julio de 2020, 16:42. Disponible en: <https://nos.nl/artikel/2339646-nederland-heeft-er-1-6-miljoen-bomen-bij-en-dat-is-nog-maar-het-begin>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Noticias ONU. Mirada global Historias humanas. El cambio climático y la alta demanda de madera presionan cada vez más a los bosques. [22 de julio de 2024, Cambio climático y medioambiente]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2024/07/1531416#:~:text=Las%20proyecciones%20indican%20que%20la,49%25%20entre%202020%20y%202050>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Obi, O. F. (2018). Using advanced analysis techniques to benchmark forest harvesting systems: a study of the New Zealand forest industry.

Obi, O. F., & Visser, R. (2017). Operational efficiency analysis of New Zealand timber harvesting contractors using data envelopment analysis. *International Journal of Forest Engineering*, 28(2), 85-93.

Obi, O. F., & Visser, R. (2020). Productivity measurement of New Zealand forest harvesting sector using the DEA-Malmquist index. *International Journal of Forest Engineering*, 31(3), 224-232.

Parlamento Europeo, 2022. Estrategia de la UE a favor de los Bosques para 2030 [en línea]. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0310\\_ES.pdf](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0310_ES.pdf). [consulta: 14 de marzo de 2025].

Parlamento Europeo, 2022. La UE y los bosques. Disponible en: [https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/es/FTU\\_3.2.11.pdf](https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/es/FTU_3.2.11.pdf). [consulta: 14 de marzo de 2025].

Parlamento Europeo. La Unión Europea y los bosques. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/105/la-union-europea-y-los-bosques#:~:text=El%20paisaje%20forestal%20europeo%2C%20un,de%20la%20superficie%20forestal%20mundial>). [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Parlamento Europeo (2023). La Unión Europea y los bosques [en línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/105/la-union-europea-y-los-bosques>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Parlamento Europeo (2025). La política de medio ambiente de la UE se centra en mejorar la calidad del aire, la protección de la biodiversidad y la sostenibilidad. La legislación busca reducir la contaminación, promover la economía circular y gestionar los recursos naturales de manera responsable. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/section/193/la-politica-de-medio-ambiente>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Posit Team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Version 2023.12.1.402., from <https://www.posit.co/>

Ramalho, J. J. S. (2015). *frm: Regression analysis of fractional responses*. R package version 1.2.2, Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=frm>.

Radio Prague International (2024). Los bosques checos se encuentran entre los más enfermos de Europa. Disponible en: <https://espanol.radio.cz/los-bosques-chechos-se-encuentran-entre-los-mas-enfermos-de-europa-8590797>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

RedPac (2020), La evolución de las explotaciones forestales pasa por la innovación ambiental y tecnológica [En línea]. Disponible en: <https://redpac.es/noticia/la-evolucion-las-explotaciones-forestales-pasa-por-la-innovacion-ambiental-y-tecnologica>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

Sari, D. P., Handayani, N. U., Ulkhaq, M. M., Budiawan, W., Maharani, D. L., & Ardi, F. (2018). A data envelopment analysis approach for assessing the efficiency of small and medium-sized wood-furniture enterprises: a case study. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 204, p. 01015). EDP Sciences.

Shahi, S. K., & Dia, M. (2021). Comparison of Ontario's roundwood and recycled fibre pulp and paper mills' performance using data Envelopment analysis. *Journal of Management Analytics*, 8(2), 222-251.

Shahi, S. K., & Dia, M. (2019). Efficiency measurement of Ontario's sawmills using bootstrap data envelopment analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 26(5-6), 272-295.

Shah, W. U. H., Hao, G., Yan, H., Shen, J., & Yasmeen, R. (2024). Forestry Resource Efficiency, Total Factor Productivity Change, and Regional Technological Heterogeneity in China. *Forests*, 15(1), 152.

Staňková, M., Popelová, P., & Pipiška, T. (2023). Assessing the efficiency of the forestry sector in EU countries. *Forestry Studies*, 78(1), 1-13.

Strange, N., Bogetoft, P., Aalmo, G. O., Talbot, B., Holt, A. H., & Astrup, R. (2021). Applications of DEA and SFA in benchmarking studies in forestry: state-of-the-art and future directions. *International Journal of Forest Engineering*, 32(sup1), 87-96.

Sun, C., Marcille, K. C., & Daniels, J. M. (2021). A Performance Analysis of Sawmills in Oregon from 2003 to 2017. *Forest Science*, 67(4), 398-411.

Susaeta, A., Gutiérrez, E., & Lozano, S. (2023). Profit-efficiency analysis of forest ecosystem services in the southeastern US. *Ecosystem Services*, 64, 101567.

Tan, J., Su, X., & Wang, R. (2023). Exploring the measurement of regional forestry eco-efficiency and influencing factors in China based on the super-efficient DEA-tobit two stage model. *Forests*, 14(2), 300.

TierrasHolandesas (2024). Países Bajos recibe apoyo financiero de la UE para producción de hidrógeno removable [en línea]. 1 de agosto de 2024. Disponible en: <https://tierrasholandesas.nl/index.php/2024/08/01/ue-ayuda-hidrogeno-verde-paises-bajos/>. [Consulta: 14 de marzo de 2025].

UNFCCC, 2022. Manual para el sector del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) (2003). En: *UNFCCC* [en línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/11-bis-handbook-on-lulucf-sector.pdf>. [consulta: 14 de marzo de 2025].

Villa Caro, G. Análisis por envoltura de datos (DEA): nuevos modelos y aplicaciones [tesis doctoral]. Dialnet [en línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=23106>.

Yang, H., Yuan, T., Zhang, X., & Li, S. (2016). A decade trend of total factor productivity of key state-owned forestry enterprises in China. *Forests*, 7(5), 97.

Zhao, M., Dong, S., Xia, B., Li, Y., Li, Z., & Chen, W. (2022). Effective and Sustainable Managed Protected Areas: Evaluation and Driving Factors of Eco-Efficiency of China's Forest Parks. *Forests*, 13(9), 1406.

## Anexo 1: Holguras de producción (2010-2015 y 2010-2020)

	Déficit estimado según periodo	
	2010-2015	2010-2020
Corteza para producción de madera en rollo PROD (m3)	619,1 X 10 <sup>6</sup>	119,3 X 10 <sup>6</sup>
Valor añadido bruto VAB (millones de €)	46.980,10	667.584,30
Corteza para el material de crecimiento final EX_F (m3)	242,6 X 10 <sup>6</sup>	270 X 10 <sup>6</sup>

## Anexo 2: Holguras de producción (2010-2015, 2016-2020 y 2010-2020)

	Déficit estimado según periodo		
	2010-2015	2016-2020	2010-2020
Corteza para producción de madera en rollo PROD (m3)	619,1 X 10 <sup>6</sup>	252,2 X 10 <sup>6</sup>	119,3 X 10 <sup>6</sup>
Valor añadido bruto VAB (millones de €)	46.980,10	513.725,70	667.584,30
Corteza para el material de crecimiento final EX_F (m3)	242,6 X 10 <sup>6</sup>	1277,6 X 10 <sup>6</sup>	270 X 10 <sup>6</sup>

## Anexo 3: Países de referencia y valores lambdas para proyectar los países ineficientes (2010-2015)

DMU	LAMBDA						
	REPÚBLICA CHECA	DINAMARCA	ALEMANIA	CHIPRE	AUSTRIA	PORTUGAL	SUECIA
Bulgaria	0,558	0	0	0	0,064	0,379	0
Estonia	0	0,586	0	0	0,247	0,140	0,028
Grecia	0	0	0	0,723	0	0,217	0,060
España	0	0	0	0	0	0,642	0,358
Francia	0	0	0,376	0	0	0,040	0,584
Croacia	0,259	0,379	0	0	0,134	0,227	0
Italia	0	0	0,188	0	0	0,569	0,243
Letonia	0	0	0,093	0	0,176	0,730	0
Lituania	0,152	0,336	0	0	0,216	0,296	0
Hungría	0,387	0,280	0	0	0	0,333	0
Polonia	0	0	0,586	0	0	0,362	0,052
Rumanía	0	0	0,281	0	0,246	0,472	0
Eslovaquia	0,584	0,286	0	0	0	0,129	0
Reino Unido	0	0	0,075	0	0,266	0,659	0

## Anexo 4: Código del modelo en Rstudio – FASE 1

```
# Instalar paquetes necesarios
install.packages("dear")
install.packages("dplyr")
install.packages("ggplot2")
library(dear)
library(dplyr)
library(ggplot2)

# Carga de los datos desde el archivo de Excel
datos<-read.csv2("SBM_Model_2010_2020.csv", header=TRUE)
head(datos)

# Extracción de las entradas y salidas para visualizar
entradas <- as.matrix(datos[, c('EMPL', 'BDSM', 'EX_I')])
salidas <- as.matrix(datos[, c('PROD', 'VAB', 'EX_F')])

# Crear un objeto de datos para análisis DEA
# Make_deadata: crea objetos de datos para usar en eficiencias DEA
# ni(3entradas), no(3 salidas), 1 DMU, posición input 3,4,5, posición output 6,7,8
modeloDEA <- make_deadata(datadea=datos, ni = 3, no = 3, dmus = 1, inputs = c(3,4,5), outputs = c(6,7,8))

# Realizar el análisis DEA-SBM
resultado <- model_sbmeff(datadea = modeloDEA, orientation = "oo", rts = "vrs")
summary(resultado)

# RESULTADO DE PUNTUACIÓN EFICIENCIA Y HOLGURAS DE PRODUCCIÓN
df = summary(resultado)

# Obtener los datos en un archivo excel.
library("openxlsx")
write.xlsx(df, "Resultados_2010_2020.xlsx")

# Extraer valores eficiencia - Si los datos no dan, instalar nuevamente dear
eficiencia <- eficiencias(resultado)
eficiencia

# Obtener objetivos (TARGET)
objetivo <- targets(resultado)
objetivo

# Obtener las holguras
slacks <- slacks(resultado)
print(slacks)

#Agregar los valores de eficiencia a los datos originales
datos <- cbind(datos, eficiencia)

#Media
mean_eficiencia <- mean(eficiencia)
print(paste("Eficiencia promedio:", mean_eficiencia))

# Calcular los cuantiles y el IQR
Q1 <- quantile(eficiencia, 0.25)
Q3 <- quantile(eficiencia, 0.75)
IQR <- Q3 - Q1

# Determinar los límites para los valores atípicos (mavericks)
lower_whisker <- Q1 - 1.5 * IQR
upper_whisker <- Q3 + 1.5 * IQR

# Identificar los países ineficientes
datos$eficiente <- ifelse(datos$eficiencia < 0.999, "Ineficiente", "Eficiente")

#Tablas de eficientes e ineficientes
ineficientes <- datos %>% filter(eficiente == "Ineficiente") #Si no ejecuta, volver a instalar "dplyr"
eficientes <- datos %>% filter(eficiente == "Eficiente")
```

## Anexo 5: Código del modelo en Rstudio – FASE 1 – Diagrama de dispersión

```
# Cargar los datos
datos<-read.csv2("Diagr_dispersion.csv", header=TRUE)
head(datos)

#Gráfico de valor individual de la eficiencia de los países de cada región forestal europea.
Diagrama_region <- ggplot(datos, aes(X = REGION, y = EFF)) +
  geom_point(aes(color = REGION), size = 3) +
  geom_text(aes(label = PAIS), vjust = -1, hjust = 0.5, size = 3) +
  labs(title = "Eficiencia de País según Región",
        x = "Región",
        y = "Eficiencia") +
  theme_minimal()

Diagrama_region

#Misma dispersión, evitando que los datos se solapen y representando el valor mediano.
Diagrama_region <- ggplot(datos, aes(X = REGION, y = EFF)) +
  geom_dotplot(aes(fill = REGION), binaxis = 'y', stackdir = 'center', dotsize = 0.8, binwidth = 0.02) +
  geom_text_repel(aes(label = PAIS),
                 size = 3,
                 box.padding = 0.2, # Espacio alrededor de las etiquetas
                 point.padding = 0.1, # Espacio entre la etiqueta y el punto
                 max.overlaps = Inf, # Para evitar eliminar etiquetas en casos de superposición
                 segment.color = 'transparent') + # Color de las líneas que conectan las etiquetas con los puntos
  stat_summary(fun = median, geom = "point",
              shape = 4, size = 5, color = "red") + # Agregar el símbolo de mediana
  labs(title = "Eficiencia por País y Región",
        x = "Región",
        y = "Eficiencia") +
  theme_minimal()

Diagrama_region
```

## Anexo 6: Código del modelo en Rstudio – FASE 1 – Diagrama de caja de las variables de entrada y salida observada de los países ineficientes

```
#Librería y datos
install.packages("faraway")
library(faraway)
library(readxl)

Inputsoutputsinef <- datos<-read.csv2("Boxplot_Ineficientes_2010_2020.csv", header=TRUE)

par(mfrow=c(2,3)) # Posición gráficos. 2 filas y 3 columnas, muestra 6 gráficos.

### BOXPLOT EMPL ###

boxplot(data_file$EMPL,data=data_file, main="EMPL",ylim=c(4, 431), cex=1.5, col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1)
stripchart(c(32.63,327.5,35.75,8.8,116.5,36.5,37.4,99.2), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(21.82), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(32.63,327.5,35.75,8.8,116.5,36.5,37.4,99.2) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=21.82 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)

### BOXPLOT BDSM ###

boxplot(data_file$BDSM,data=data_file, main="BDSM", ylim=c(200,145000), cex=1.5, col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1)
stripchart(c(7516.93,28251.69,6689.19,451,41076.91,13394.06,121639.57,13690.52), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(3831.39), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(7516.93,28251.69,6689.19,451,41076.91,13394.06,121639.57,13690.52) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=3831.39 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)
```

```

### BOXPLOT EX_I ###
boxplot(data_file$EX_I,data=data_file, main="EX_I",ylim=c(40000, 2150000), cex=1.5,col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1)
stripchart(c(160840,629972,103175,3462,1070728,375570,981500,407998), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(59224), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(160840,629972,103175,3462,1070728,375570,981500,407998) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=59224 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)

### BOXPLOT PROD ###
boxplot(data_file$PROD,data=data_file,main="PROD",ylim=c(0, 350000), cex=1.5,col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1 )
stripchart(c(60794.96,222774,37671.76,115.47,195872.35,46669.96,128249.18,50875.4), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(29422.39), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(60794.96,222774,37671.76,115.47,195872.35,46669.96,128249.18,50875.4) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=29422.39 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)

### BOXPLOT VAB ###
boxplot(data_file$VAB,data=data_file, main="VAB", ylim=c(0, 70000),cex=1.5,col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1)
stripchart(c(16836.64,13157.31,20872.43,1664.73,22291.72,3883.83,12995.6,20444.2), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(67634.55), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(16836.64,13157.31,20872.43,1664.73,22291.72,3883.83,12995.6,20444.2) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=67634.55 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)

### BOXPLOT EX_F ###
boxplot(data_file$EX_F, data=data_file, main="EX_F", ylim=c(0, 2300000), cex=1.5, col="lightgray", outcol="red", outpch=1.5, outcex=1)
stripchart(c(168629.08,678934.78,127029,3740.39,1180486,329863.82,1040589,413675.52), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="blue", pch=16, cex=1)
stripchart(c(65359.55), vertical = TRUE, add=TRUE, method = "jitter",col="black", pch=8, cex=1.5, lwd=2)

offset_x <- c(-0.25, -0.1, 0.025, 0.10, 0.25, 0.25, 0.35, 0.4)
offset_y <- c(5, 5, 5, 5, 5, 5, 5, 5)

#Agregar etiquetas
text(x=0.8 + offset_x,
     y=c(168629.08,678934.78,127029,3740.39,1180486,329863.82,1040589,413675.52) + offset_y,
     labels=c("BE", "CZ", "DK", "CY", "AT", "SI","NO","CH"),
     pos=3, cex=0.9)

text(x=1.05, y=65359.55 + 5, labels="NL", pos=2.5, col="blue", cex=1)

```

## Anexo 7: Código del modelo en Rstudio – FASE 2

```

#Instala y carga la librería necesaria

#install.packages("C:/Users/maria/OneDrive/Esitorio/frm_1.2.2.tar.gz", repos = NULL, type = "source")
install.packages("frm")
library(frm)
library(lmtest)
library(ggplot2)

# Cargar los datos (asumiendo que tienes un archivo CSV)
datos<-read.csv2("DATOS_FASE2_MJ_Tipif.csv", header=TRUE)
datos

#Facilita la referencia de columnas sin necesidad de llamarlas: datos$columna
attach(datos)

#fix(datos) #Para editar datos directos de la bbdd.
y <- EFF

#combinando las variables en un nuevo objeto llamado X
X <- cbind(PIB, Reg1, Reg2, Reg3, Reg4, TIERRA, TEMP, PRECIP)

#Modelo de regresión
linear <- lm(y~X)

#para obtener los valores ajustados de un modelo de regresión
fitobs<-fitted(linear)
fitobs

```

```

#count <- length(which(fitobs >1)&&(fitobs <0)) #caracter fraccional?????
linear <- lm(y~X-1)

#MCO
summary(linear)

### % of fitted values out of range [0,1] ###

# Obtener los valores ajustados para un modelo (puede ser lineal o un modelo de regresión fraccional)
fitted_values <- predict(linear)
fitted_values

# Contar cuántos valores están fuera del rango [0,1]
out_of_range <- sum(fitted_values < 0 | fitted_values > 1)

# Calcular el porcentaje de valores fuera del rango
percentage_out_of_range <- (out_of_range / length(fitted_values)) * 100

# Mostrar el porcentaje
cat("Porcentaje de valores ajustados fuera del rango [0,1]:", percentage_out_of_range, "%\n")

#Librería para verificar supuestos de mod regresión lineal.
#Normalidad, homocedasticidad, igualdad de varianzas, ausencia multicolinealidad.

library(gvlma)
gvmodel <- gvlma(linear)
summary(gvmodel) #Resultados página 21

#HIPÓTESIS DEL MODELO

#Normalidad "Test Shapiro"
shapiro.test(linear$residuals)

#Autocorrelación/Independencia
dwtest(linear)

#Linealidad
library(lmtest)
raintest(linear)

#RESET test:
resettest(y ~ X-1 , power=2, type="regressor")

#MODELO REGRESION FRACCIONAL

a1P1 <- frm(y,X,linkf="logit", intercept=F) #FRM LOGIT (estimate)
frm.reset(a1P1,2)

a1Pp <- frm(y,X,linkf="probit",intercept=F) #FRM PROBIT (estimate)
frm.reset(a1Pp,2)

a1Plog <- frm(y,X,linkf="loglog",intercept=F) #FRM LOGLOG (estimate)
frm.reset(a1Plog,2)

a1Pclog <- frm(y,X,linkf="cloglog",intercept=F) #FRM CLOGLOG (estimate)
frm.reset(a1Pclog,2)

##### MEDIA MUESTRAL DE LOS EFECTOS PARCIALES

# Ajustar los modelos fraccionales

a1P1 <- frm(y, X, linkf = "logit", intercept = F)
a1Pp <- frm(y, X, linkf = "probit", intercept = F)
a1Plog <- frm(y, X, linkf = "loglog", intercept = F)
a1Pclog <- frm(y, X, linkf = "cloglog", intercept = F)

# Función para calcular efectos parciales para un modelo dado
calcular_efectos_parciales <- function(modelo, linkf) {
  predicciones <- modelo$yhat # Valores ajustados (predicciones)
  coeficientes <- modelo$p # Coeficientes del modelo
  efectos_parciales <- matrix(NA, nrow = length(predicciones), ncol = length(coeficientes))

  if (linkf == "logit") {
    # Para el modelo Logit
    for (i in 1:length(coeficientes)) {
      efectos_parciales[, i] <- coeficientes[i] * predicciones * (1 - predicciones)
    }
  } else if (linkf == "probit") {
    # Para el modelo Probit (usamos la densidad de la normal estándar)
    for (i in 1:length(coeficientes)) {
      predicciones_probit <- modelo$xbhat # Usamos las predicciones lineales del modelo (xbhat)
      efectos_parciales[, i] <- coeficientes[i] * dnorm(predicciones_probit)
    }
  } else if (linkf == "loglog") {
    # Para el modelo LogLog
    for (i in 1:length(coeficientes)) {
      efectos_parciales[, i] <- coeficientes[i] * predicciones * log(predicciones)
    }
  } else if (linkf == "cloglog") {
    # Para el modelo ClogLog
    for (i in 1:length(coeficientes)) {
      efectos_parciales[, i] <- coeficientes[i] * (1 - exp(-predicciones)) * exp(-predicciones)
    }
  }
}

```

```

# Media muestral de los efectos parciales para cada variable
media_efectos_parciales <- colMeans(efectos_parciales)
return(media_efectos_parciales)
}

# Calcular la media muestral de los efectos parciales para cada modelo
media_logit <- calcular_efectos_parciales(a1P1, "logit")
media_probit <- calcular_efectos_parciales(a1Pp, "probit")
media_loglog <- calcular_efectos_parciales(a1Plog, "loglog")
media_cloglog <- calcular_efectos_parciales(a1Pclog, "cloglog")

# Crear una tabla con los resultados
media_efectos_parciales_tabla <- data.frame(
  Variables = a1P1$x.names, # Usamos los nombres de las variables desde uno de los modelos (por ejemplo, el modelo Logit)
  Logit = media_logit,
  Probit = media_probit,
  LogLog = media_loglog,
  CLogLog = media_cloglog
)

# Mostrar la tabla
print(media_efectos_parciales_tabla)

# Desactiva la notación científica
options(scipen = 999)
print(media_efectos_parciales_tabla)

```

# GLOSARIO

<b>AELC</b>	
Asociación Europea de Libre Comercio.	1
<b>BCC</b>	
Retornos a escala variable.	4
<b>BDSM</b>	
Variable bosque disponible para suministro de madera.	ix
<b>CCR</b>	
Retornos a escala constante.	4
<b>DEA</b>	
Data Envelopment Analysis. Análisis envolvente de datos	ix
<b>DMU</b>	
Decision-Making Unit. Unidad de toma de decisiones.	ix
<b>Eficiencia relativa</b>	
Mide el rendimiento de una unidad en comparación con las mejores.	ix
<b>EMP</b>	
Variable personas empleadas a tiempo completo.	ix
<b>EX_F</b>	
Variable existencias finales de crecimiento.	ix
<b>EX_I</b>	
Variable existencias iniciales en crecimiento.	ix
<b>FAO</b>	
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.	2
<b>GEI</b>	
Emisiones de gases de efecto invernadero.	2
<b>Holguras</b>	
Exceso de insumos o déficit de productos en un proceso.	ix
<b>inputs</b>	
Variables de entrada	ix
<b>outputs</b>	
Variables de salida	ix
<b>PIB</b>	
Variable producto interno bruto.	ix
<b>PRECIP</b>	
Variable Promedio de precipitación mensual durante un año.	ix
<b>PROD</b>	
Variable producción de madera en rollo.	ix
<b>Protocolo Kioto</b>	
Acuerdo internacional que busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para combatir el cambio climático.	2
<b>REGION</b>	
Variable dummy, corresponde a las diferentes zonas de Europa (Norte, Centro-Oeste, Centro-Este, Sur-Oeste).	ix
<b>SBM</b>	
Slack-Based Measure. Medida Basada en Holguras.	ix
<b>TEMP</b>	
Variable Temperatura media del aire calculada a lo largo de un año, promediando las temperaturas mensuales.	ix
<b>TIERRA</b>	
Variable Área terrestre, excluyendo cuerpos de agua interiores como lagos y ríos.	ix
<b>UE</b>	
Unión Europea.	1
<b>UNECE</b>	
Comité de Bosques y de la Industria Forestal de la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas.	40
<b>UNFF</b>	
Foros de las Naciones Unidas sobre bosques.	40
<b>VAB</b>	
Variable valor agregado bruto.	ix

