

UNA HERRAMIENTA UNIFICADA PARA ESTUDIAR LOS CULTIVOS FORESTALES DE ESPAÑA

A UNIFIED TOOL FOR STUDYING FOREST CROPS IN SPAIN

Jaime GABRIEL VEGAS¹, Maider Araceli URBON JIMÉNEZ², Ana DE LUIS REBOREDO³,
Belén PÉREZ LANCHO⁴ y Ana-Belén GIL-GONZÁLEZ⁵

¹ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España*

✉ JaimeGabrielVegas@usal.es

 <https://orcid.org/0009-0006-8923-5405>

² *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España*

✉ murbon001@usal.es

 <https://orcid.org/0009-0002-6308-4398>

³ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España*

✉ adeluis@usal.es

 <https://orcid.org/0000-0001-5354-9054>

⁴ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España*

✉ lancho@usal.es

 <https://orcid.org/0000-0002-0934-8316>

⁵ *Universidad de Salamanca. Salamanca, Castilla y León, España*

✉ abg@usal.es

 <https://orcid.org/0000-0001-7235-6151>

RESUMEN: Este trabajo presenta una herramienta integral diseñada para modelar y predecir la captura de carbono en los cultivos forestales de España, con el fin de optimizar la gestión de créditos de carbono y proyectos de reforestación. A partir del procesamiento de datos del Inventario Forestal Nacional (IFN), combinados con variables climáticas e índices vegetales, se entrenaron diversos modelos de aprendizaje automático. Los resultados destacan el rendimiento del algoritmo CatBoost, alcanzando un $R^2 > 0,84$ en la estimación de toneladas de carbono. El estudio valida la metodología mediante un caso práctico y aporta como contribución fundamental una base de datos relacional estructurada que resuelve la dispersión de la información pública.

*Jaime Gabriel Vegas, Maider Araceli Urbon Jiménez, Ana de Luis Reboredo,
Belén Pérez Lancho y Ana-Belén Gil-González
Una herramienta unificada para estudiar los cultivos forestales de España*

Palabras clave: bosques españoles; captura de carbono; reforestación; machine learning; créditos de carbono; Inventario Forestal Nacional.

ABSTRACT: This paper presents a comprehensive tool designed to model and predict carbon capture in forest crops in Spain, with the aim of optimizing the management of carbon credits and reforestation projects. Based on data processing from the National Forest Inventory (IFN), combined with climate variables and vegetation indices, various machine learning models were trained. The results highlight the performance of the CatBoost algorithm, achieving an $R^2 > 0.84$ in the estimation of carbon tons. The study validates the methodology through a case study and makes a fundamental contribution in the form of a structured relational database that resolves the dispersion of public information.

Keywords: spanish forests; carbon capture; reforestation; machine learning; carbon credits; National Forest Inventory.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, los bosques españoles han experimentado transformaciones profundas y, en ciertos aspectos, alarmantes. Si bien la superficie forestal ha aumentado debido al éxodo rural y la expansión natural de la vegetación, este crecimiento no se ha traducido necesariamente en una mejora ecológica. Persisten problemas estructurales como una diversidad limitada, la homogeneización del paisaje y la predominancia de masas monoespecíficas, las cuales presentan una alta vulnerabilidad frente a eventos catastróficos, como por ejemplo incendios [1, 3].

España se sitúa entre las regiones europeas con mayor exposición al cambio climático [6], manifestándose este fenómeno en temporadas de incendios más extensas o en una reducción en la disponibilidad hídrica [4], entre otros efectos. Estas presiones comprometen la estabilidad de los ecosistemas forestales.

En este escenario, el papel de los bosques como sumideros naturales de carbono adquiere un valor estratégico [2], al constituir la captura y el almacenamiento de CO_2 en la biomasa y el suelo un pilar fundamental de las políticas climáticas europeas. Para garantizar la credibilidad de estos mecanismos financieros y ecológicos, resulta imprescindible disponer de datos precisos y modelos robustos que cuantifiquen con rigor el carbono capturado, así como modelos predictivos que permitan orientar la toma de decisiones.

2. METODOLOGÍA

El objetivo principal es el desarrollo de una herramienta integral que permita optimizar la amortización de créditos de carbono por (re)forestación. Para ello, se ha modelado la absorción de CO_2 en cultivos forestales españoles, identificando las variables críticas que influyen en el desarrollo arbóreo.

2.1. FUENTES DE DATOS

El núcleo del conjunto de datos proviene del Inventario Forestal Nacional (IFN) [5], un registro exhaustivo y de dominio público de la evolución desde 1986 del estado de los bosques españoles. Este inventario proporciona información de campo de alto valor, incluyendo:

- *Variables edáficas* que caracterizan los suelos forestales.
- *Variables biológicas*. Conteo de pies por especie y clase diamétrica y su caracterización biológica (origen, estado...).

La predicción se realiza a nivel de parcela y especie arbórea, abarcando un conjunto de datos de aproximadamente 50 000 parcelas y cerca de 200 especies. Dado que los datos del IFN se encuentran georreferenciados, ha sido posible enriquecer el modelo cruzando esta información con bases de datos meteorológicas e índices de vegetación satelitales.

3. RESULTADOS

Se llevó a cabo una comparativa exhaustiva de diversos algoritmos de aprendizaje automático, obteniendo el modelo basado en *CatBoost* el mejor rendimiento: explica más del 84 % de la variabilidad ($R^2 > 0,84$) en las toneladas de carbono capturadas por cultivo forestal.

El análisis de errores muestra que las desviaciones medias del modelo son bajas en comparación con la variabilidad natural de la variable objetivo. Esto indica que, a pesar de la alta heterogeneidad inherente a las parcelas forestales, el modelo mantiene un error promedio estable, validando su utilidad para estimaciones a largo plazo (Tabla 1).

Tabla 1. Métricas del modelo y estadísticos de la variable objetivo: carbono (aéreo y radical) en toneladas capturado por el cultivo forestal

Métricas		Estadísticos	
Indicador	Valor	Indicador	Valor
R^2	0,845	Media	24,6 tC
RMSE	13,8 tC	Desv. est.	35,8 tC
MAE	6,7 tC	Máximo	420,5 tC

3.1. CASO DE ESTUDIO: ÁLAVA

A modo de validación práctica, se presenta un caso de estudio en una parcela ubicada en la provincia de Álava (Figura 1). Se compararon plantaciones de pino y roble con una densidad de 500 pies/ha y un horizonte de predicción de 30 años.



Figura 1. Parcela de estudio ubicada en la provincia de Álava

El análisis automático de la ubicación identifica un clima húmedo, pendiente moderada (10-15°) y orientación oeste. Los indicadores satelitales corroboran una alta productividad histórica, con índices EVI y NDII favorables. Los resultados (Tabla 2) muestran mayor captura para pinos ($\approx 66 \text{ tCO}_2$) frente a robles ($\approx 54 \text{ tCO}_2$), coherente con las tasas de crecimiento de coníferas en zonas húmedas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados confirman la viabilidad del objetivo planteado, demostrando que se dispone de recursos suficientes a nivel nacional para este tipo de modelado. Una contribución fundamental del proyecto ha sido el procesamiento del Inventario Forestal Nacional (IFN). Si bien estos datos del MITECO son públicos y de gran calidad, su formato original presenta barreras significativas (dispersión, nomenclatura confusa).

Tabla 2. Predicción comparativa de captura de CO_2 a 30 años

Especie	Densidad (pies/ha)	Captura est. (tCO_2)
Pino (<i>Pinus</i>)	500	≈ 66
Roble (<i>Quercus robur</i>)	500	≈ 54

Este trabajo ha solventado dichas dificultades mediante la recopilación, depuración, reestructuración relacional y documentación exhaustiva de la información, transformando un recurso complejo en una base de datos SQL accesible y manejable para futuros trabajos de investigación.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del Proyecto de Cátedra Internacional sobre Inteligencia Artificial Fiable y Reto Demográfico dentro de la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA). Referencia: TSI-100933-2023-0001. Financiado por la Secretaría de Estado para la Digitalización y la Inteligencia Artificial y por la Unión Europea (NextGenerationEU).

6. REFERENCIAS

1. Agencia SINC. (2016, 17 de marzo). *La homogeneización de los árboles reduce la funcionalidad de los bosques*. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/La-homogeneizacion-de-los-arboles-reduce-la-funcionalidad-de-los-bosques>
2. European Commission. (2021). *New EU forest strategy for 2030* (COM(2021) 572 final). European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0572>
3. European Commission. (2022, 5 de octubre). *Abandoned agriculture in Valencia region (Spain): Transition to woodland and scrubland over a 50 year period*. Science for Environment Policy. https://environment.ec.europa.eu/news/abandoned-agriculture-valencia-region-spain-transition-woodland-and-scrubland-over-50-year-period-2022-10-05_en
4. Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2022). *Tendencias regionales de los fenómenos extremos en el informe del IPCC de 2021*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
5. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Inventario forestal nacional: Memoria metodológica*. Gobierno de España. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/estadisticas/inventarios-nacionales/IFN-Metodolog%C3%ADa.pdf>
6. Sanz, M. J., & del Castillo, E. G. (2020). *Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.