CONAMA 2026

APLICACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE SUMIDEROS DE CO_2

(RPAS-CO_2)

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Alejandro Ojeda Salvador. Jefe de obra Unidad Territorial 2. TRAGSA.

Otros Autores:

Rafael Mª Navarro Cerrillo. Catedrático de Universidad, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba.

Mª Ángeles Varo Martinez. Profesora Sustituta Interina, Departamento de Ingeniería Gráfica y Geomática, Universidad de Córdoba.

Andrés Baietto. Profesor, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de la República, Uruguay.

Guillermo Palacios González. Profesor Ayudante. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba.

José Antonio Millán Eslava. Encargado de Obras. TRAGSA.

María Gómez-Lobo Moya, Técnico Superior. Gerencia de I+D. TRAGSA

Juan Antonio Gil Suarez. Técnico Medio. Gerencia de I+D. TRAGSATEC.

Laura María Luquero Ramos. Jefe de departamento- Gerencia de I+D. TRAGSA.

Rosa María Paya Navarro. Jefe de Grupo de Obras. Gerencia de Baleares. TRAGSA.

María Monica Pozuelo Dominguez. Gerente Baleares. Grupo TRAGSA

Índice

1. Resumen 1

2. Antecedentes 2

2.1. Los ecosistemas forestales como sumideros de carbono 2

2.2. Selvicultura del carbono y necesidad de seguimiento 3

3. Objetivos 3

3.1. Objetivos específicos 4

4. Metodología 4

4.1. Diseño multiescala y fuentes de información 4

4.2. Tipificación forestal y estimación de biomasa 6

4.3. Muestreo y modelización del Carbono Orgánico del Suelo (COS) 7

4.4. LiDAR-RPAS e inventario local 8

4.5. Escenarios selvícolas y evaluación 10

5. Resultados 11

5.1. Tipos forestales y biomasa regional 11

5.2. Carbono orgánico del suelo 13

5.3. Desempeño del LiDAR-RPAS 15

5.4. Escenarios de gestión 16

5.5. Integración en la planificación y prevención de incendios 18

6. Limitaciones y líneas de mejora 19

7. Conclusiones 20

8. Bibliografía 21

1. Resumen

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático mediante la captura y el almacenamiento de carbono en la biomasa y en el carbono orgánico del suelo (COS). La cuantificación de estos sumideros requiere integrar inventarios forestales, muestreos de campo y tecnologías de teledetección.

RPAS-CO_2 es un proyecto de innovación del Grupo Tragsa, desarrollado con el apoyo del Govern de les Illes Balears y la colaboración científica de la Universidad de Córdoba. Su objetivo es desarrollar una metodología operativa y multiescala para estimar las reservas de carbono forestal, evaluar el efecto de la gestión selvícola sobre su capacidad de secuestro y facilitar la aplicación de los resultados en la planificación forestal de las Illes Balears.

El proyecto se estructura en tres líneas de trabajo: modelización y cartografía de biomasa mediante la integración del Inventario Forestal Nacional, el Mapa Forestal de España y datos LiDAR-PNOA; estimación espacial del carbono orgánico del suelo (COS) a partir de bases de datos edáficas, muestreos de campo y aprendizaje automático; y evaluación de distintos escenarios selvícolas en la Comuna de Bunyola, Mallorca.

Los modelos insulares mostraron una capacidad predictiva moderada, coherente con la heterogeneidad de los ecosistemas mediterráneos. Para la biomasa aérea, el algoritmo Gradient Boosting Machine alcanzó valores de R^2 de 0,53 en pinares de pino carrasco y 0,56 en encinares. En la modelización del COS se obtuvieron valores de R^2 de hasta 0,67 en encinares. La cartografía reflejó valores de biomasa aérea entre 14 y 230 Mg ha^{-1} y COS entre 35 y 75 Mg C ha^{-1}. Además, aproximadamente el 60 % del COS almacenado hasta 40 cm de profundidad se concentró en los primeros 20 cm.

A escala local, los datos adquiridos con un RPAS DJI Matrice 350 RTK equipado con sensor LiDAR Zenmuse L2 permitieron caracterizar con mayor detalle la estructura forestal. Los modelos Random Forest alcanzaron valores de R^2 de 0,8 para la biomasa, el área basimétrica y el diámetro medio cuadrático, de 0,7 para la densidad y de 0,9 para la altura dominante. Estos resultados confirman el potencial del LiDAR-RPAS para inventarios de precisión, identificación de árboles individuales y planificación selvícola.

La comparación entre los escenarios de no intervención, selvicultura preventiva y selvicultura del carbono mostró que la gestión activa reduce inicialmente la biomasa en pie, pero favorece el crecimiento de los árboles remanentes, mejora la estabilidad de las masas y refuerza su respuesta frente a perturbaciones. En el caso analizado, la selvicultura del carbono presentó el mejor balance global de secuestro y valorización económica.

La metodología también puede contribuir a la prevención de incendios. La combinación de LiDAR-PNOA, LiDAR-RPAS, Sentinel-2 e inventarios forestales permite caracterizar la carga y continuidad del combustible, localizar acumulaciones y orientar desbroces, clareos, claras, cortafuegos y áreas auxiliares. Su incorporación futura permitiría evaluar conjuntamente las existencias de carbono, la capacidad de captura y la vulnerabilidad frente al fuego, aunque la cuantificación de emisiones evitadas exigiría modelizar la probabilidad, propagación, severidad y consumo del combustible.

Finalmente, los resultados de biomasa, COS y estructura forestal se han integrado en un visor cartográfico para facilitar su consulta y aplicación en la toma de decisiones. En conjunto, RPAS-CO_2 demuestra el potencial de combinar inventarios, LiDAR, RPAS, muestreo edáfico y modelización para mejorar la cuantificación y el seguimiento de los sumideros de carbono, y avanzar hacia una gestión forestal activa que compatibilice mitigación, adaptación, prevención de incendios y conservación de los ecosistemas mediterráneos.

2. Antecedentes

2.1. Los ecosistemas forestales como sumideros de carbono

Los ecosistemas forestales desempeñan un papel fundamental en el ciclo global del carbono. Mediante la fotosíntesis, la vegetación retira dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera y almacena el carbono (C) en la biomasa aérea y subterránea, la madera muerta, la hojarasca y el suelo. Por esta razón, los bosques constituyen sumideros relevantes y contribuyen a la mitigación del cambio climático (Percy et al., 2003; Sedjo & Sohngen, 2012).

El carbono fijado en los tejidos vegetales permanece almacenado durante periodos variables. Cuando la biomasa muere, una parte vuelve a la atmósfera mediante la respiración y la descomposición, mientras que otra se incorpora a la materia orgánica del suelo mediante procesos de humificación y mineralización. El resultado es un equilibrio dinámico entre captación, almacenamiento y liberación, condicionado por el clima, la composición de la masa, las propiedades edáficas, la gestión y las perturbaciones.

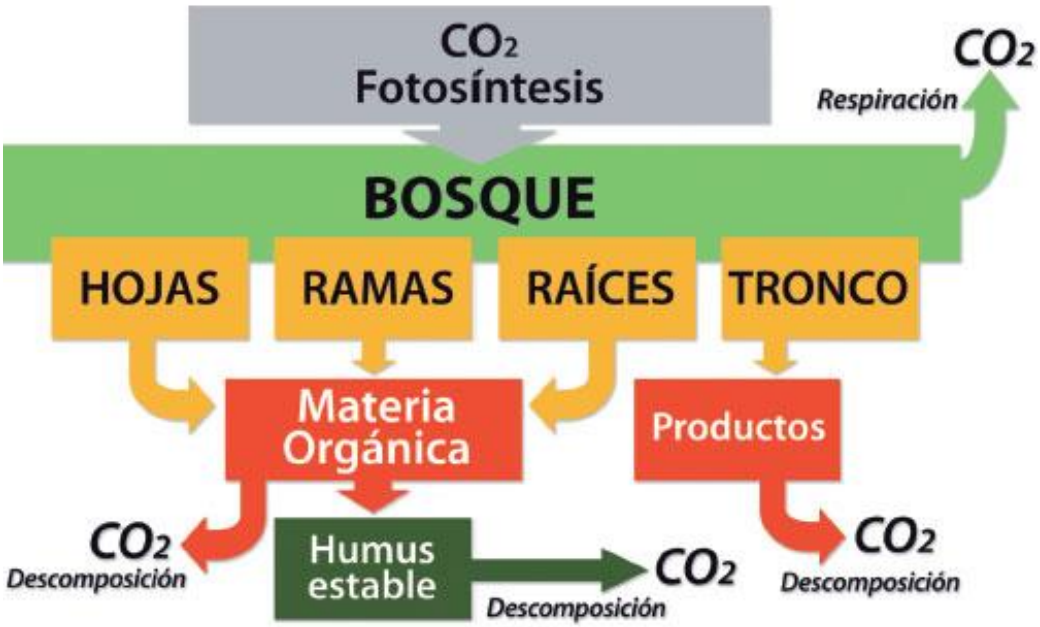


Figura 1. Flujo simplificado del carbono en un ecosistema forestal.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

La capacidad de almacenamiento no es ilimitada ni permanente. Incendios, sequías, erosión, plagas, aprovechamientos o cambios de uso pueden reducir los depósitos y transformar temporalmente un

sumidero en una fuente de emisiones. En los bosques mediterráneos, esta vulnerabilidad obliga a interpretar conjuntamente el stock existente, el crecimiento, la estabilidad de la masa y el riesgo de reversión.

El carbono orgánico del suelo (COS) constituye uno de los principales depósitos de los ecosistemas forestales. Su acumulación depende de las entradas de hojarasca y raíces, la textura, la densidad aparente, la humedad, la temperatura y la actividad biológica. Por ello, una actuación que modifique la biomasa, la entrada de materia orgánica, la erosión o el microclima puede alterar el balance del conjunto del ecosistema (Lal, 2005).

2.2. Selvicultura del carbono y necesidad de seguimiento

La selvicultura del carbono comprende las actuaciones orientadas a optimizar el balance de carbono, reforzar la permanencia de los sumideros y aumentar su resiliencia frente a perturbaciones. Su finalidad no consiste únicamente en maximizar la biomasa en pie en un momento concreto, sino en compatibilizar almacenamiento, crecimiento, conservación del suelo, prevención de incendios y producción de bienes forestales de larga duración (D'Amato et al., 2011; Navarro-Cerrillo et al., 2022).

En este contexto, determinadas intervenciones selvícolas pueden implicar una reducción inicial de las existencias de carbono en la biomasa, pero también favorecer el crecimiento de los árboles remanentes, reducir la competencia por los recursos y contribuir a mejorar la estabilidad de las masas forestales. Por ello, la evaluación de estas actuaciones debe considerar tanto las reservas iniciales como su evolución temporal y los posibles efectos sobre los distintos compartimentos de carbono.

La aplicación operativa de este enfoque exige conocer las existencias iniciales, su distribución entre compartimentos y su evolución temporal. Los inventarios de campo siguen siendo la referencia para calibrar y validar las estimaciones, pero su integración con el Inventario Forestal Nacional (IFN), PNOA-LiDAR, imágenes de satélite y LiDAR embarcado en plataformas RPAS (Remotely Piloted Aircraft System por sus siglas en inglés) permite ampliar la cobertura, aumentar la resolución espacial y establecer un seguimiento más frecuente (Navarro-Cerrillo et al., 2018).

En este contexto, el proyecto RPAS-CO_2 se desarrolla en el marco de las actividades de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del Grupo TRAGSA, contando con la colaboración científica de la Universidad de Córdoba y el apoyo del Govern de les Illes Balears y con el objetivo de avanzar en la aplicación de nuevas tecnologías para la cuantificación y el seguimiento de los sumideros forestales de carbono. El proyecto aborda las Illes Balears como territorio demostrativo y, en concreto, la Comuna de Bunyola, en Mallorca, como monte piloto para evaluar escenarios selvícolas y el potencial del inventario de precisión. Su planteamiento responde a la necesidad de disponer de una metodología multiescala, trazable y transferible a la planificación forestal.

3. Objetivos

El objetivo general del proyecto fue desarrollar una metodología operativa y multiescala para estimar las reservas de carbono forestal, mediante la integración de inventarios forestales, tecnologías de teledetección y técnicas de modelización, evaluar el efecto de la gestión selvícola sobre su capacidad de secuestro y facilitar la incorporación de los resultados a la planificación forestal de las Illes Balears.

3.1. Objetivos específicos

El objetivo general se desarrolló a través de tres objetivos específicos (Tabla 1).

Tabla 1. Objetivos específicos del proyecto RPAS CO2
Fuente: Alejandro Ojeda. TRAGSA

Línea	Finalidad
Objetivo 1. Biomasa forestal	Modelizar la biomasa total de los principales sistemas forestales de las Illes Balears y desarrollar mapas espacialmente explícitos, con especial atención a las masas de *Pinus halepensis*, mediante la integración del IFN4, el Mapa Forestal de España y las métricas PNOA-LiDAR.
Objetivo 2. Carbono orgánico del suelo	Estimar el COS mediante bases de datos edáficas, muestreos de campo y variables ambientales, y generar cartografía continua para las principales formaciones forestales.
Objetivo 3. Gestión selvícola	Modelizar y comparar el efecto de distintos escenarios de gestión sobre las reservas de carbono, el crecimiento de las masas y su equivalencia en CO_2, tomando como caso piloto la Comuna de Bunyola.
Objetivo transversal. Inventario de precisión	Evaluar la capacidad del LiDAR-RPAS para caracterizar la estructura de la masa, estimar variables dasométricas e identificar árboles individuales como apoyo a la selvicultura de precisión.

La formulación combina una escala regional, dirigida a caracterizar los patrones de biomasa y COS en el archipiélago, con una escala local de alta resolución orientada al inventario, la modelización selvícola y el seguimiento.

4. Metodología

4.1. Diseño multiescala y fuentes de información

La metodología integró información territorial, inventarios forestales, muestras de suelo, datos LiDAR y modelización estadística. La unidad regional se utilizó para tipificar formaciones y generar cartografía; la escala de monte permitió evaluar alternativas de gestión; la parcela proporcionó datos de calibración y validación; y la escala de árbol se abordó mediante LiDAR-RPAS (Figura 1, Tabla 2).

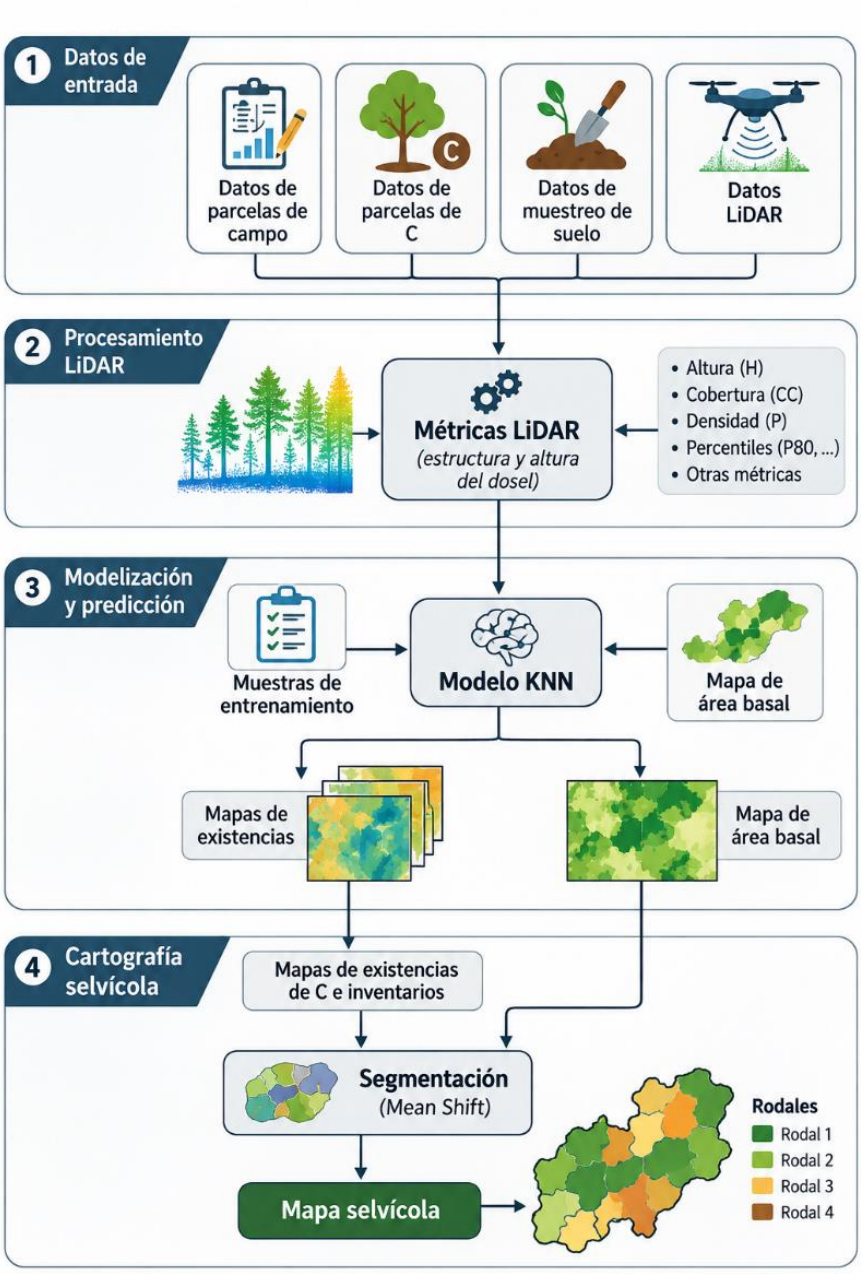


Figura 2. Esquema general del flujo de trabajo con LiDAR-RPAS.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

A escala regional, la estimación de biomasa se basó en la integración de los datos del Cuarto Inventario forestal (IFN4), el Mapa Forestal de España (MFE) y las métricas derivadas de las nubes de puntos LiDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Para la caracterización del carbono orgánico del suelo (COS), se combinaron fuentes de información edáfica, como SoilGrids, variables ambientales y muestreos de campo. Por su parte, el análisis a escala local se desarrolló en la Comuna de Bunyola (Mallorca), donde se integraron inventarios forestales y datos LiDAR-RPAS de alta resolución para caracterizar la estructura de las masas y evaluar diferentes alternativas de gestión selvícola.

Tabla 2. Escalas de trabajo, fuentes de información y productos obtenidos con cada una de ellas.
Fuente: Alejandro Ojeda. TRAGSA

Escala	Fuentes	Producto
Regional	IFN4, MFE25, PNOA-LiDAR, SoilGrids y cartografía ambiental	Tipologías y mapas de biomasa y COS
Monte	Proyecto de ordenación, rodales y parcelas de inventario	Escenarios selvícolas y balance de carbono
Parcela	Inventario dasométrico y muestreo de suelo 0-40 cm	Calibración y validación
Árbol	LiDAR-RPAS	Altura, copa, posición y selección de árboles

4.2. Tipificación forestal y estimación de biomasa

La tipificación forestal se apoyó en las parcelas del IFN4 y en el área basimétrica por especie. La clasificación TWINSPAN permitió identificar unidades homogéneas y relacionarlas con las coberturas del Mapa Forestal de España. La biomasa individual se calculó mediante ecuaciones alométricas específicas para las especies forestales estudiadas (Ruiz-Peinado et al., 2011, 2012) y se agregó a escala de parcela la materia seca por hectárea (Mg ha^{-1}).

Las estimaciones de biomasa obtenidas a partir de las parcelas del IFN4 se utilizaron como variable de respuesta para el desarrollo de los modelos predictivos. Como variables explicativas se emplearon métricas derivadas de las nubes de puntos, incluyendo estadísticos de altura, percentiles, dispersión y densidad de retornos, así como variables topográficas. Los modelos se desarrollaron diferenciando las principales formaciones forestales, con el fin de considerar las diferencias de composición específica y estructura existentes entre ellas.

Se compararon diferentes algoritmos de aprendizaje automático, incluyendo Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Gradient Boosting Machine (GBM) y k-nearest neighbors (k-NN) mediante procedimientos de validación cruzada. La selección de los modelos se basó en el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y la coherencia espacial de las predicciones. Finalmente, los modelos seleccionados se aplicaron a las coberturas espaciales de las variables predictoras para generar cartografía continua de biomasa forestal en las principales formaciones estudiadas de las Illes Balears (Figura 3).

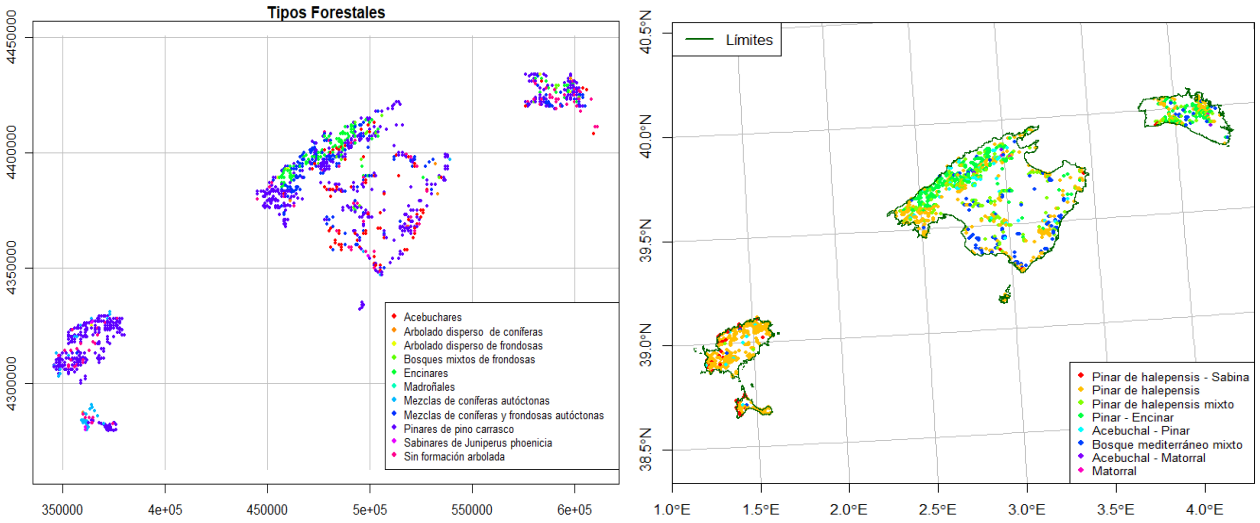


Figura 3. Tipos forestales analizados en las Illes Balears.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

4.3. Muestreo y modelización del Carbono Orgánico del Suelo (COS)

La estimación del carbono orgánico del suelo (COS) se abordó mediante la integración de información edáfica, variables ambientales, datos de teledetección y muestras de campo, con el objetivo de caracterizar su distribución espacial en los principales sistemas forestales de las Illes Balears.

A escala regional, se analizaron distintas fuentes de información sobre las reservas de COS, incluyendo SoilGrids 2.0, el Banco de Datos de la Naturaleza (BDN) del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y la cartografía de carbono del suelo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Estas fuentes permitieron caracterizar y comparar las estimaciones de COS correspondientes a los principales tipos forestales del archipiélago.

Para desarrollar los modelos de distribución espacial del COS, se extrajeron los valores estimados por SoilGrids en las localizaciones de las parcelas del IFN4, utilizándolos como variable de respuesta. Como variables predictoras se emplearon métricas estructurales de la vegetación a partir de LiDAR-PNOA, junto con variables fisiográficas, como la elevación. Se compararon diferentes algoritmos de aprendizaje automático, incluyendo Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Gradient Boosting Machine (GBM) y k-nearest neighbors (k-NN), mediante validación cruzada de diez particiones. La selección de los modelos se basó en el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Los modelos seleccionados se aplicaron posteriormente para generar cartografía continua de las reservas estimadas de COS.

De forma complementaria, se realizaron muestreos de campo en parcelas de aproximadamente 450 m² y se segmentó, cuando la morfología del suelo lo permitió, en cuatro intervalos: 0-10, 10-20, 20-30 y 30-40 cm. Se retiró la hojarasca superficial y se utilizó una barrena metálica calibrada (Figura 4). Las muestras se secaron al aire, se codificaron y se trasladaron al laboratorio de la Universidad de Córdoba.



Figura 4. Barrena estandarizada utilizada para el muestreo del COS.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

El procesado incluyó la separación de materia orgánica particulada, el tamizado a 2 mm, la cuantificación de gravas y finos, la determinación de la densidad aparente y el análisis del carbono orgánico. Las existencias de COS se calcularon considerando la concentración de carbono, la densidad aparente, el espesor y la corrección por elementos gruesos. Estas mediciones permitieron caracterizar las reservas de carbono edáfico y su distribución vertical en los montes muestreados, complementando la información obtenida mediante la modelización regional.

4.4. LiDAR-RPAS e inventario local

En el monte Comuna de Bunyola se empleó un DJI Matrice 350 RTK equipado con un sensor LiDAR Zenmuse L2 para la adquisición de información de alta resolución sobre la estructura de las masas forestales. La misión de referencia se planificó a una altura de 70 m sobre el terreno, una velocidad de vuelo de 6 m s^{-1}, un solape lateral del 70 % y una frecuencia de adquisición de 240 kHz, utilizando posicionamiento RTK (Figura 5).

El procesamiento de los datos en DJI Terra permitió obtener la nube de puntos clasificada, el modelo digital del terreno, el modelo digital de superficie, el modelo de altura de la vegetación y el ortomosaico. A partir de las nubes de puntos se extrajeron métricas relacionadas con la altura y la distribución vertical de la vegetación, que permitieron caracterizar la estructura de las masas forestales a escala de parcela y rodal (Figura 6).



Figura 5. Plataforma RPAS utilizada en las campañas de campo.
Fuente: Alejandro Ojeda. TRAGSA

Las métricas derivadas de LiDAR-RPAS se relacionaron con las variables dasométricas y las estimaciones de biomasa obtenidas a partir de los inventarios forestales, con el objetivo de desarrollar modelos predictivos de las principales características estructurales de las masas. Se analizaron variables como la biomasa, el área basimétrica, el diámetro medio cuadrático, la densidad del arbolado, la altura dominante y la densidad del subpiso, evaluando la capacidad predictiva de los modelos mediante estadísticos de ajuste como el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

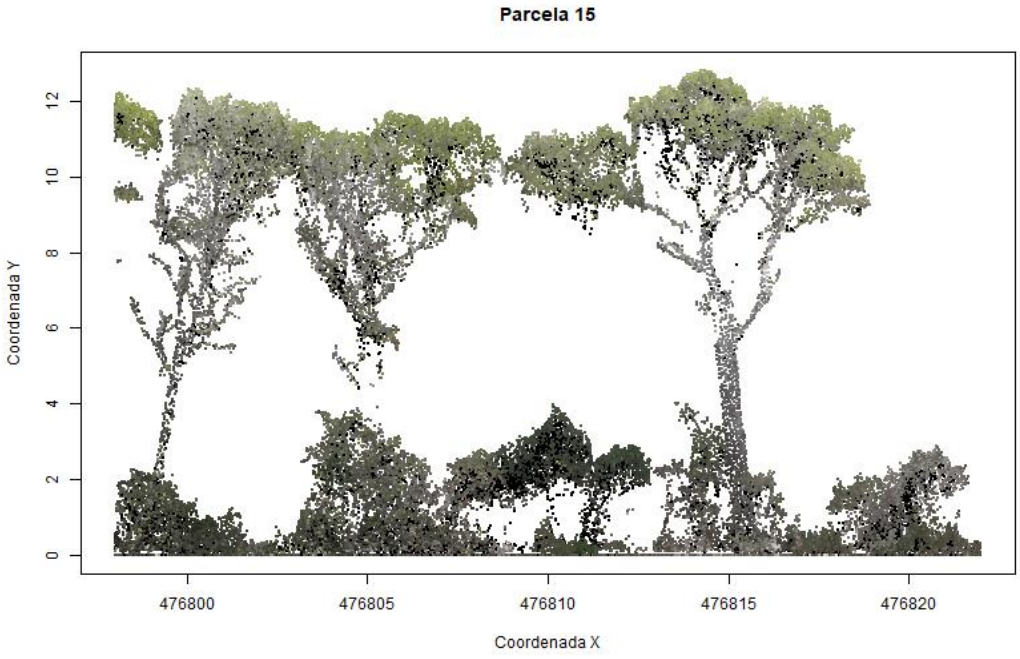


Figura 6. Nube de puntos RPAS.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

De forma complementaria, la segmentación individual de copas permitió identificar árboles y analizar sus características estructurales, proporcionando información de apoyo para la selección de árboles del porvenir y la identificación de competidores directos (Figura 6). Esta aproximación permitió evaluar el potencial de la tecnología LiDAR-RPAS como herramienta de inventario forestal de precisión y de apoyo a la planificación de tratamientos selvícolas (Wallace et al., 2016).

4.5. Escenarios selvícolas y evaluación

La evaluación del efecto de la gestión selvícola sobre las reservas de carbono se llevó a cabo en el monte Comuna de Bunyola (Mallorca), seleccionado como área demostrativa para analizar diferentes estrategias de gestión forestal orientadas a la conservación y mejora de los sumideros de carbono. El análisis se centró en las principales formaciones de pino carrasco (*Pinus halepensis*) y masas mixtas de pino carrasco y encina (*Quercus ilex*), considerando sus características estructurales y las actuaciones selvícolas previstas.

Como información de partida se utilizó el inventario forestal del Proyecto de Ordenación Forestal (PROF) de la Comuna de Bunyola, que proporciona información dasométrica y cartográfica sobre los distintos estratos y rodales del monte. Se consideraron variables como la densidad de pies, el área basimétrica, los diámetros y las alturas del arbolado, así como la composición específica y los tratamientos selvícolas previstos. Esta información permitió caracterizar las condiciones iniciales de las masas y establecer una base común para comparar las alternativas de gestión.

Se analizaron tres escenarios selvícolas:

- No intervención: escenario de referencia que representa la evolución de las masas forestales en ausencia de tratamientos selvícolas.
- Selvicultura preventiva: escenario basado en las actuaciones contempladas en el Proyecto de Ordenación Forestal (PROF), orientadas principalmente a reducir la competencia, mejorar la estructura de las masas y contribuir a la prevención de incendios forestales.
- Selvicultura del carbono: escenario que plantea tratamientos específicos dirigidos a favorecer el crecimiento y el vigor del arbolado remanente, buscando optimizar el balance de carbono a lo largo del tiempo.

La comparación de los escenarios se realizó considerando las modificaciones previstas en la estructura de las masas y sus implicaciones sobre las reservas de carbono. El análisis incluyó biomasa extraída, el carbono remanente, el crecimiento modelizado, la aportación del suelo y su conversión a CO_2 equivalente. Asimismo, se contempló la valoración económica del carbono, con el fin de explorar las posibles implicaciones de las alternativas de gestión para el desarrollo de proyectos forestales de absorción y compensación de emisiones.

Los resultados se interpretaron como simulaciones *ex ante*, condicionadas por los supuestos de crecimiento, las extracciones y la evolución de los distintos reservorios de carbono. Por tanto, las estimaciones económicas no representan créditos de carbono emitidos ni ingresos garantizados, sino una aproximación al potencial de las diferentes estrategias de gestión selvícola.

5. Resultados

5.1. Tipos forestales y biomasa regional

Los pinares de pino carrasco constituyeron la formación dominante, con el 54,6 % de las parcelas IFN4 analizadas. Las mezclas de coníferas y frondosas representaron el 13,2 %, los encinares el 9,5 %, el matorral el 8,4 %, los acebuchales el 7,4 % y los sabinares el 3,5 %. Esta distribución confirma una elevada heterogeneidad y la necesidad de estratificar la modelización por formación (Tabla 3).

Tabla 3. Distribución de las parcelas del IFN4 analizadas según la formación forestal.
Fuente: Alejandro Ojeda. TRAGSA

Formación	Parcelas	Porcentaje
Pinar de pino carrasco	588	54,6 %
Mezcla de coníferas y frondosas	142	13,2 %
Encinar	102	9,5 %
Matorral	90	8,4 %
Acebuchal	80	7,4 %
Sabinar	38	3,5 %

Entre los algoritmos evaluados, GBM presentó los mejores resultados para las principales formaciones estudiadas. En los pinares, alcanzó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,53 y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 32,66 Mg ha^{-1}; mientras que en los encinares se alcanzó un R^2 de 0,56 y RMSE de 46,19 Mg ha^{-1}. Estos valores reflejan una capacidad predictiva moderada, que permite caracterizar las diferencias generales de biomasa entre masas forestales (Figura 7).

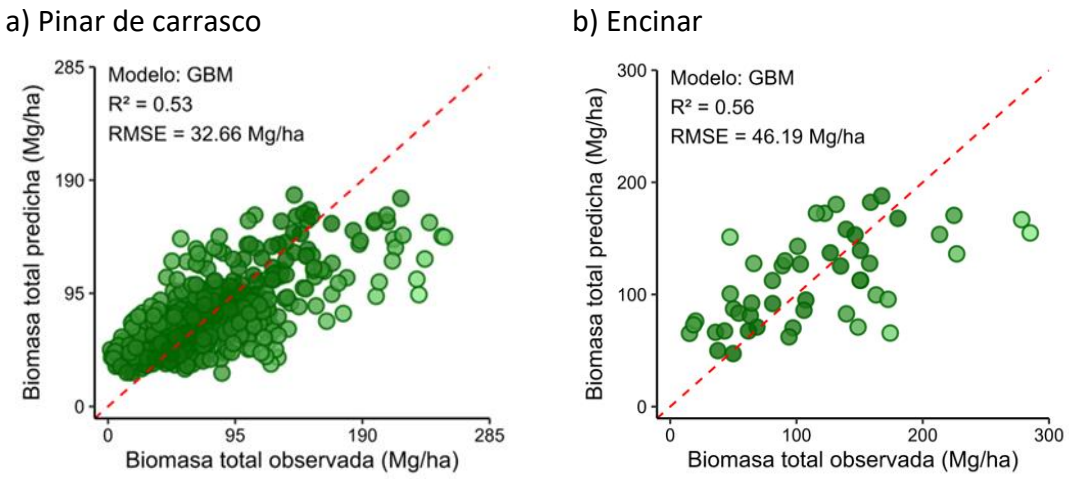


Figura 7. Relación entre los valores observados y predichos de biomasa forestal mediante los modelos GBM para (a) pinares de *Pinus halepensis* y (b) encinares de *Quercus ilex* en las Illes Balears.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

El análisis de la importancia de variables predictoras mostró que tanto las características topográficas como la estructura vertical de la vegetación desempeñaron un papel relevante en la estimación de la biomasa. En

los pinares de carrasco, la elevación fue la variable de mayor importancia relativa (25,3 %), seguida del percentil 80 de altura (14,3 %), la altura media (13,3 %) y la asimetría de la distribución de alturas (10,3 %). En los encinares, adquirieron mayor relevancia las variables relacionadas con las alturas máximas y la distribución vertical de los retornos. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad de las métricas LiDAR para caracterizar la estructura de las masas forestales y su relación con la biomasa acumulada.

No obstante, ninguno de los modelos alcanzó valores de R^2 superiores a 0,60, lo que evidencia ciertas limitaciones para la estimación precisa de biomasa a escala de parcela. Entre los factores que pueden explicar estos resultados destacan la heterogeneidad estructural de las masas mediterráneas, las diferencias en la composición específica y el desfase temporal entre la adquisición de los datos LiDAR y los inventarios de campo, que no fue corregido durante la modelización.

La aplicación espacial de los modelos seleccionados permitió generar cartografía continua de biomasa forestal para las principales formaciones estudiadas. Los valores estimados de biomasa aérea oscilaron aproximadamente entre 14 y 230 Mg ha^{-1} (Figura 8) Las mayores acumulaciones se asociaron a masas forestales densas y relativamente maduras, mientras que los valores más reducidos se localizaron en formaciones jóvenes, degradadas o fragmentadas.

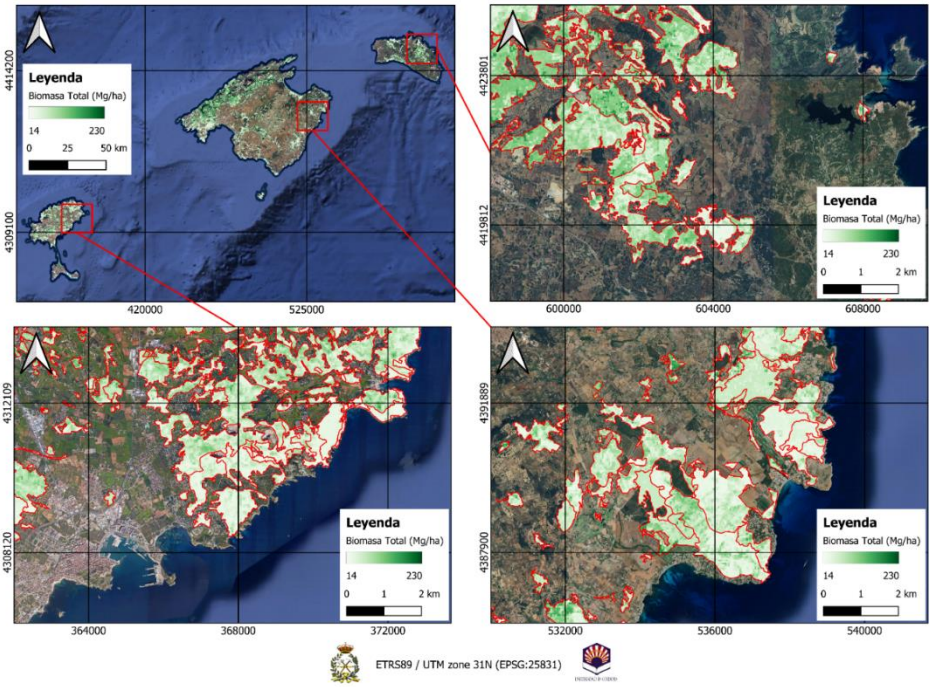


Figura 8. Distribución espacial de biomasa forestal estimada mediante los modelos predictivos en las Illes Balears. Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

La cartografía obtenida constituye una herramienta de apoyo para la planificación forestal y la identificación de áreas prioritarias de gestión. Sin embargo, debido a la incertidumbre de los modelos regionales, su utilización en actuaciones que requieran estimaciones precisas a escala de parcela debe complementarse con inventarios y procedimientos de calibración local.

5.2. Carbono orgánico del suelo

La caracterización regional del carbono orgánico del suelo mostró diferencias entre las principales formaciones forestales de las Illes Balears y entre las fuentes de información edáfica analizadas. Las estimaciones de SoilGrids 2.0 y FAO presentaron una concordancia general, mientras que el Banco de Datos de la Naturaleza (BDN) proporcionó valores habitualmente inferiores y una mayor variabilidad. Las masas mixtas de encinar-pinar registraron las mayores reservas medias de COS en los primeros 30 cm del suelo, con valores de 59,6 Mg C ha^{-1} según SoilGrids, 53,5 Mg C ha^{-1} según el BDN y 57,6 Mg C ha^{-1} según la FAO. Estas diferencias ponen de manifiesto la influencia de la fuente de información utilizada y la incertidumbre asociada a las estimaciones regionales (Tabla 4).

Los modelos regionales desarrollados mediante la integración de las estimaciones de SoilGrids y las variables derivadas de LiDAR-PNOA mostraron diferencias en su capacidad de ajuste según el tipo forestal. El algoritmo GBM presentó los mejores resultados para las tres formaciones estudiadas, con coeficientes de determinación (R^2) de 0,45 en pinares de pino carrasco, 0,58 en pinares mixtos y 0,67 en encinares, y valores de RMSE comprendidos entre 5,55 y 6,01 Mg C ha^{-1}.

Tabla 4. Resultados de los modelos GBM para la estimación de carbono orgánico del suelo en las principales formaciones forestales de las Illes Balears.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Formación	R^2	RMSE (Mg C ha^{-1})
Pinar de pino carrasco	0,45	5,71
Pinar mixto	0,58	6,01
Encinar	0,67	5,55

La elevación fue uno de los principales predictores de las reservas estimadas de COS, especialmente en los encinares, donde alcanzó una importancia relativa del 74,9 %. Este resultado sugiere una asociación entre los gradientes topográficos, las condiciones ambientales y la distribución del carbono edáfico. No obstante, la importancia de esta variable no implica necesariamente una relación causal directa, ya que el COS también depende de factores como la textura, la humedad, la mineralogía, la actividad biológica y la historia de uso del suelo.

La aplicación espacial de los modelos seleccionados permitió generar cartografía continua de las reservas de COS para los principales sistemas forestales del archipiélago. Los valores estimados oscilaron aproximadamente entre 35 y 75 Mg C ha^{-1}, mostrando una distribución heterogénea relacionada con las características ambientales y forestales del territorio (Figura 9).

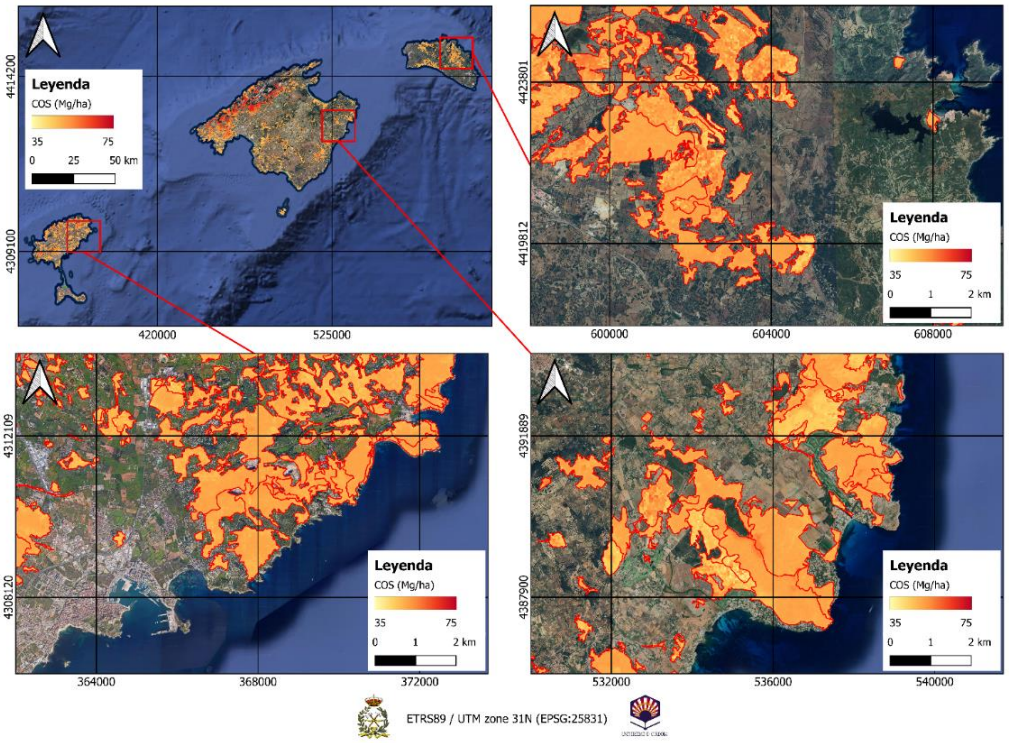


Figura 9. Distribución espacial de las reservas estimadas de COS en las Illes Balears.

Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Por su parte, los muestreos de campo permitieron caracterizar la distribución vertical del carbono edáfico. Las reservas medias estimadas fueron de 21,3 Mg C ha^{-1} en el intervalo de 0-10 cm, 17,9 Mg C ha^{-1} entre 10 y 20 cm, 18,3 Mg C ha^{-1} entre 20 y 30 cm y 13,3 Mg C ha^{-1} entre 30 y 40 cm. En conjunto, los primeros 20 cm concentraron aproximadamente el 55 % de las reservas medias estimadas hasta los 40 cm de profundidad (Figura 10).

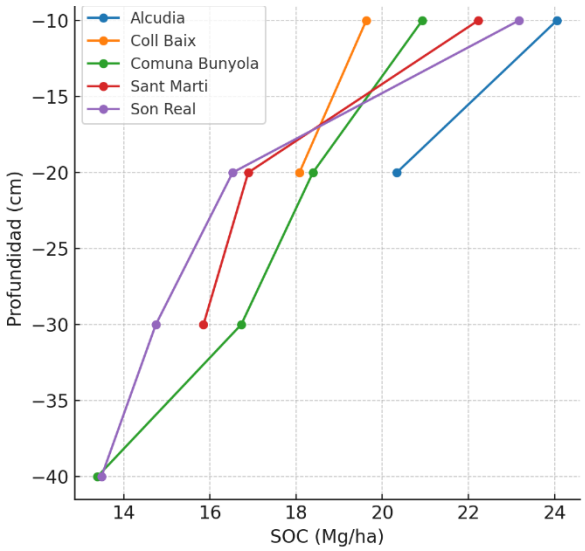


Figura 10. Distribución del COS en función de la profundidad en los montes muestreados.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Estos resultados evidencian la importancia de los horizontes superficiales del suelo como reservorio de carbono y la necesidad de considerar su conservación en la planificación selvícola. En particular, las actuaciones que alteren la cubierta vegetal, la estructura del suelo o los procesos erosivos pueden afectar a la estabilidad de este reservorio, por lo que resulta fundamental integrar el COS en la evaluación de las estrategias de gestión forestal.

5.3. Desempeño del LiDAR-RPAS

Los modelos desarrollados a partir de los datos LiDAR-RPAS adquiridos en la Comuna de Bunyola mostraron una elevada capacidad para estimar las principales variables dasométricas de las masas forestales. La calibración local permitió obtener mejores ajustes que los modelos regionales, destacando el algoritmo Random Forest (RF), que alcanzó coeficientes de determinación (R^2) de 0,80 para la biomasa, el área basimétrica y el diámetro cuadrático medio; de 0,70 para la densidad del arbolado; y de 0,90 para la altura dominante (Tabla 5, Figura 11).

Tabla 5. Resultados de los modelos de estimación de variables dasométricas mediante datos LiDAR-RPAS. Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Variable	R^2	RMSE
Biomasa	0,80	25,75 Mg ha^{-1}
Área basimétrica	0,80	3,75 m^2 ha^{-1}
Diámetro cuadrático medio	0,80	2,61 cm
Densidad	0,70	81,85 pies ha^{-1}
Altura dominante	0,90	0,51 m
Densidad de subpiso	0,60	46,61 pies ha^{-1}

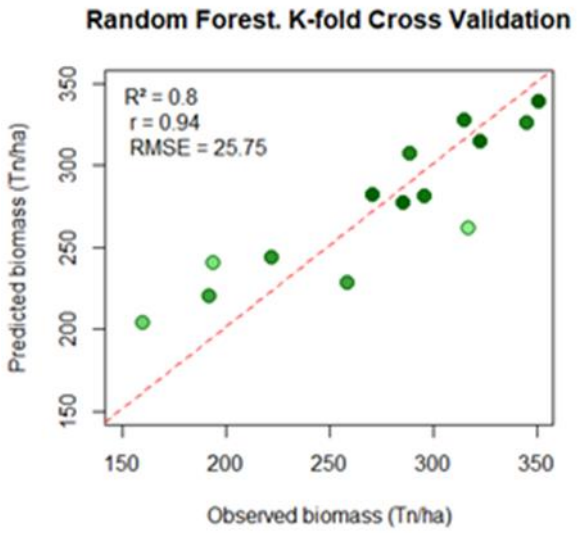


Figura 11. Relación entre los valores observados y estimados mediante el modelo basado en datos LiDAR-RPAS para la validación de las estimaciones de biomasa forestal.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

De forma complementaria, se evaluó la capacidad de los datos LiDAR-RPAS para estimar el carbono orgánico del suelo (COS) mediante modelos de aprendizaje automático ajustados con información de campo. El modelo Random Forest presentó una elevada correlación entre los valores observados y predichos (r = 0,95), con un RMSE de 7,54 Mg C ha^{-1}. Estos resultados sugieren que las métricas estructurales y topográficas derivadas de LiDAR-RPAS pueden aportar información indirecta relevante para caracterizar la variabilidad espacial del carbono edáfico.

No obstante, debe señalarse que la tecnología LiDAR no mide directamente el COS, sino que proporciona variables relacionadas con la estructura de la vegetación y las condiciones ambientales que pueden estar asociadas a su distribución. Por ello, la aplicación de estos modelos requiere mediciones edáficas de referencia y procedimientos adecuados de validación.

En conjunto, los resultados respaldan el potencial del LiDAR-RPAS para desarrollar inventarios forestales de precisión, mejorar la caracterización estructural de las masas y apoyar la identificación de árboles individuales y el señalamiento selvícola. Sin embargo, la campaña no dispuso de puntos de control terrestre independientes para validar la precisión geométrica de los productos generados. Futuras campañas deberían incorporar puntos de chequeo, documentar la calidad del posicionamiento GNSS/IMU y mantener parcelas permanentes correctamente georreferenciadas para facilitar el seguimiento temporal.

5.4. Escenarios de gestión

La comparación de los escenarios selvícolas evaluados en la Comuna de Bunyola mostró diferencias en las extracciones de biomasa, el crecimiento estimado y el balance de carbono de las masas forestales (Tabla 6). En términos generales, la gestión activa implica una reducción inicial de la biomasa en pie, pero puede favorecer el crecimiento de los árboles remanentes, disminuir la competencia por los recursos y mejorar la estabilidad de las masas frente a determinadas perturbaciones.

El escenario sin intervención mantuvo las mayores existencias inmediatas de biomasa en pie, aunque sin incorporar actuaciones específicas para reducir la competencia o el riesgo de incendios. Por su parte, la selvicultura preventiva planteó un compromiso entre la reducción del combustible, el mantenimiento de las reservas de carbono y la mejora de la estructura forestal. Finalmente, el escenario de selvicultura del carbono se orientó a favorecer el crecimiento del arbolado remanente y obtuvo el mayor balance de carbono modelizado entre las alternativas analizadas.

Tabla 6. Comparación cualitativa de los escenarios selvícolas en la Comuna de Bunyola.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Escenario	Interpretación
No intervención	Mayor stock inmediato en pie, con mayor competencia y sin reducción específica del riesgo.
Selvicultura preventiva	Compromiso entre reducción del combustible, mantenimiento del sumidero y crecimiento.
Selvicultura del carbono	Mayor balance modelizado, condicionado por el seguimiento y la validación de los supuestos.

Los resultados cuantitativos mostraron que el escenario sin intervención presentó un crecimiento de carbono estimado de 2.429,6 Mg C, frente a los 3.574,8 Mg C de la selvicultura preventiva y los 3.985,5 Mg C de la selvicultura del carbono. Estos dos últimos escenarios contemplaron extracciones de biomasa de 4.593,2 y 5.530,7 Mg, respectivamente (Tabla 7). Al incorporar las cantidades de COS consideradas en el análisis, el balance modelizado alcanzó 2.429,6 Mg C en el escenario sin intervención, 3.930,8 Mg C en la selvicultura preventiva y 4.414,2 Mg C en la selvicultura del carbono. Estos valores equivalen aproximadamente a 8.892,5, 14.386,7 y 16.155,9 Mg de CO_2, respectivamente.

Tabla 7. Resultados cuantitativos de los escenarios selvícolas evaluados en la Comuna de Bunyola.
Fuente: Navarro Cerrillo et al. (2025).

Indicador	Sin intervención	Selvicultura preventiva	Selvicultura del carbono
Biomasa extraída (Mg)	0,0	4593,2	5530,7
Crecimiento de carbono estimado (Mg C)	2429,6	3574,8	3985,5
COS considerado en el balance (Mg C)	0	356	428,7
Crecimiento + COS (Mg C)	2429,6	3930,8	4414,2
CO_2 equivalente (Mg CO_2 eq)	8892,5	14386,77	16155,9

Estos resultados muestran como las actuaciones selvícolas orientadas a mejorar el crecimiento y la estructura de las masas pueden incrementar el potencial de acumulación de carbono durante el periodo analizado. No

obstante, su interpretación debe considerar que las intervenciones también implican extracciones de biomasa y una reducción inicial de las existencias de carbono en el arbolado.

Asimismo, la contribución del COS al balance depende de los supuestos empleados en la modelización y no debe interpretarse como un incremento medido directamente tras la aplicación de los tratamientos. La comparación de escenarios representa, por tanto, una evaluación *ex ante*, cuyos resultados están condicionados por el crecimiento previsto, el destino de la biomasa extraída, la permanencia del carbono almacenado y la evolución de las condiciones ambientales.

Desde el punto de vista de su posible valorización, el escenario de selvicultura del carbono presentó el resultado modelizado más favorable. Sin embargo, las estimaciones no representan créditos de carbono certificados ni ingresos garantizados, ya que su eventual incorporación a proyectos de compensación requeriría establecer una línea base, demostrar la adicionalidad, considerar los riesgos de reversión y aplicar procedimientos adecuados de seguimiento y verificación.

5.5. Integración en la planificación y prevención de incendios

Los resultados obtenidos en RPAS-CO_2 ponen de manifiesto el potencial de integrar información procedente de inventarios forestales, LiDAR-PNOA, LiDAR-RPAS e imágenes satelitales para mejorar la planificación y gestión de los sistemas forestales. La cartografía de biomasa y carbono orgánico del suelo, junto con la caracterización de la estructura de las masas, proporciona información espacialmente explícita que puede facilitar la identificación de áreas prioritarias de actuación y la evaluación de diferentes alternativas selvícolas.

En particular, la combinación de datos LiDAR y Sentinel-2 permite caracterizar aspectos de la estructura vertical y horizontal de la vegetación relacionados con la distribución y continuidad de los combustibles forestales. Esta información puede contribuir a localizar zonas con elevada acumulación de vegetación y orientar la planificación de actuaciones preventivas, como desbroces, clareos, claras, cortafuegos y áreas auxiliares. De este modo, la metodología desarrollada ofrece posibilidades para integrar los objetivos de conservación y mejora de los sumideros de carbono con la prevención de incendios forestales.

No obstante, la caracterización de la vegetación y de sus reservas de carbono no permite cuantificar directamente las emisiones evitadas por las actuaciones preventivas. Para ello sería necesario incorporar modelos específicos de comportamiento del fuego que considerasen la probabilidad de ocurrencia, la propagación, la severidad del incendio y el consumo de combustible, así como evaluar los efectos de los tratamientos sobre estos procesos.

Con el objetivo de facilitar la consulta y utilización de los resultados, los productos cartográficos generados se han incorporado a un visor geoespacial orientado a apoyar la planificación forestal. Esta herramienta permite reunir información procedente de diferentes fuentes y escalas de análisis, favoreciendo la visualización de la distribución espacial de la biomasa, el carbono edáfico y otras variables forestales relevantes.

La utilidad de este tipo de herramientas depende también de que la información se presente de forma trazable y comprensible, identificando la fuente, fecha, resolución espacial, unidades e incertidumbre de los datos. Su desarrollo y actualización constituyen una vía para mejorar la transferencia de los resultados de investigación hacia la gestión forestal y facilitar la toma de decisiones basada en información espacial.

6. Limitaciones y líneas de mejora

Aunque los resultados obtenidos demuestran el potencial de la integración de inventarios forestales, tecnologías LiDAR y técnicas de modelización para la cuantificación de las reservas de carbono, la metodología desarrollada presenta determinadas limitaciones que deben considerarse para su aplicación operativa y transferencia a otros ámbitos forestales.

Entre las principales limitaciones destacan el desfase temporal entre los inventarios de campo y los datos LiDAR-PNOA, la capacidad predictiva moderada de algunos modelos regionales, la estimación indirecta del carbono orgánico del suelo y la ausencia de puntos de control terrestre independientes para evaluar la precisión geométrica de los productos LiDAR-RPAS (Tabla 8). Asimismo, la evaluación de los escenarios selvícolas está condicionada por los supuestos de crecimiento, la evolución de los reservorios de carbono y las hipótesis económicas consideradas.

Tabla 8. Principales limitaciones metodológicas identificadas en el proyecto RPAS-CO2 y propuestas de mejora
Fuente: Alejandro Ojeda

Limitación	Efecto	Mejora
Desfase IFN-LiDAR	Menor correspondencia entre estructura y biomasa	Sincronizar inventario y vuelo o actualizar crecimiento
Ajuste regional moderado	Incertidumbre a escala de parcela	Usar el mapa para priorización y calibrar localmente
COS inferido con variables proxy	Riesgo de sobreinterpretación	Aumentar muestreo y variables edáficas
Ausencia de control geométrico independiente	Precisión absoluta no demostrada	Incorporar GCP y puntos de chequeo
Escenarios económicos sensibles	Resultados dependientes del precio	Aplicar análisis de sensibilidad y costes de MRV

La principal aportación de RPAS-CO_2 es el desarrollo de una metodología multiescala que conecta inventarios de campo, información edáfica, teledetección y modelización con la planificación selvícola. Como líneas de mejora, se plantea reforzar la calibración y validación de los modelos mediante nuevas mediciones de campo, incorporar parcelas permanentes y campañas periódicas de seguimiento, mejorar la caracterización del carbono edáfico y avanzar hacia procedimientos que permitan cuantificar la incertidumbre asociada a las estimaciones.

Estas actuaciones permitirían consolidar progresivamente un sistema de medición, reporte y verificación (MRV) de las reservas y los cambios de carbono forestal, facilitando la evaluación de los efectos de la gestión selvícola y su posible aplicación futura en proyectos de absorción y compensación de emisiones.

7. Conclusiones

El proyecto RPAS-CO_2 ha permitido desarrollar y evaluar una metodología multiescala para la cuantificación de las reservas de carbono en los ecosistemas forestales de las Illes Balears, mediante la integración de inventarios forestales, tecnologías LiDAR, sensores embarcados en RPAS y técnicas de aprendizaje automático. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el potencial de estas herramientas para mejorar la caracterización de los sumideros forestales y proporcionar información de apoyo a la gestión sostenible de los bosques.

A escala regional, la integración de los datos del Inventario Forestal Nacional con las métricas derivadas de LiDAR-PNOA permitió desarrollar modelos predictivos y generar cartografía de biomasa forestal. Aunque los modelos presentaron una capacidad predictiva moderada, permitieron caracterizar la variabilidad espacial de las existencias de biomasa en las principales formaciones forestales del archipiélago. Asimismo, la incorporación del carbono orgánico del suelo (COS) permitió ampliar la evaluación de las reservas de carbono forestal, evidenciando la importancia de los horizontes superficiales y la necesidad de mejorar la validación de las estimaciones mediante mediciones edáficas.

A escala local, la aplicación de tecnología LiDAR-RPAS en el monte Comuna de Bunyola permitió desarrollar modelos con una elevada capacidad predictiva para variables como la biomasa, el área basimétrica y la altura dominante. Estos resultados destacan el potencial de esta tecnología para realizar inventarios forestales de precisión y apoyar la planificación de tratamientos selvícolas.

La comparación de diferentes escenarios de gestión mostró que las actuaciones selvícolas pueden modificar tanto las existencias de carbono como su evolución prevista. En el caso analizado, el escenario de selvicultura del carbono presentó el balance modelizado más favorable, aunque estos resultados deben interpretarse teniendo en cuenta los supuestos de crecimiento, las extracciones de biomasa y la evolución de los distintos reservorios.

En conjunto, RPAS-CO_2 establece una base metodológica para integrar la cuantificación de carbono en la planificación forestal, facilitando la evaluación de diferentes alternativas de gestión y el desarrollo futuro de sistemas de seguimiento que contribuyan a compatibilizar la mitigación del cambio climático, la conservación de los ecosistemas forestales y la prevención de perturbaciones.

8. Bibliografía

[1] D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Fraver, S., & Palik, B. J. (2011). Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. Forest Ecology and Management, 262(5), 803-816. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.014

[2] Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 220(1-3), 242-258. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015

[3] Navarro Cerrillo, R. M., Varo Martínez, M. A., Ojeda Salvador, A., Baietto, A., & Palacios González, G. (2025). Aplicación de nuevas tecnologías para la cuantificación de sumideros de carbono (RPAS-CO_2). TRAGSA.

[4] Navarro-Cerrillo, R. M., Duque-Lazo, J., Rodríguez-Vallejo, C., Varo-Martínez, M. Á., & Palacios-Rodríguez, G. (2018). Airborne laser scanning cartography of on-site carbon stocks as a basis for the silviculture of Pinus halepensis plantations. Remote Sensing, 10(10), 1660. https://doi.org/10.3390/rs10101660

[5] Navarro-Cerrillo, R. M., Ruiz-Gómez, F. J., Camarero, J. J., Castillo, V., Barberá, G. G., Palacios-Rodríguez, G., Navarro, F. B., Blanco, J. A., Imbert, J. B., Cachinero-Vivar, A. M., Molina, A. J., & del Campo, A. D. (2022). Long-term carbon sequestration in pine forests under different silvicultural and climatic regimes in Spain. Forests, 13(3), 450. https://doi.org/10.3390/f13030450

[6] Percy, K. E., Jandl, R., Hall, J. P., & Lavigne, M. (2003). El papel de los bosques en el ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono. International Union of Forest Research Organizations.

[7] Ruiz-Peinado, R., del Río, M., & Montero, G. (2011). New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. Forest Systems, 20(1), 176-188. https://doi.org/10.5424/fs/2011201-11643

[8] Ruiz-Peinado, R., Montero, G., & del Río, M. (2012). Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. Forest Systems, 21(1), 42-52. https://doi.org/10.5424/fs/2112211-02193

[9] Sedjo, R., & Sohngen, B. (2012). Carbon sequestration in forests and soils. Annual Review of Resource Economics, 4, 127-144. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-083110-115941

[10] Wallace, L., Lucieer, A., Malenovský, Z., Turner, D., & Vopěnka, P. (2016). Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion. Forests, 7(3), 62. https://doi.org/10.3390/f7030062

CONAMA 2026