

## **ForestCO2: monitorización de sumideros de carbono en masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia**

**Sanchez Pellicer, T., Martín Alcón, S., Tomé Morán, J. L., Navarro, J. A., Fernández-Landa, A.**  
Departamento de Evaluación de los Recursos Forestales, Agresta Sociedad Cooperativa, C/ Duque de Fernán  
Núñez, 2, 1º, 28012, Madrid, Agresta Sociedad Cooperativa.  
{tsanchez, smalcon, jltome, janavarro, afernandez}@agresta.org

**Resumen:** La gestión forestal es una de las actividades de compensación de emisiones contempladas en el protocolo de Kioto, pero aún no está aplicándose en España por falta de metodologías y experiencias. El proyecto LIFE ForestCO2 pretende dar un importante impulso a los sumideros de carbono generados a través de actuaciones de Gestión Forestal Sostenible como clave en la lucha contra el cambio climático y, simultáneamente, como almacenes de carbono donde organizaciones y empresas de los sectores difusos puedan invertir de forma voluntaria para compensar sus emisiones a través de la figura del crédito de CO<sub>2</sub>. La línea principal de trabajo del proyecto es la modelización del secuestro de carbono como consecuencia de actuaciones de gestión forestal en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Ait. en sus diversos depósitos: biomasa (aérea y subterránea), materia orgánica del suelo y materia orgánica muerta, mediante metodologías reconocidas por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), calibradas y precisadas a escala local. La combinación de fuentes de datos públicos, como son los datos LiDAR del PNOA y las bases de datos del cuarto Inventario Forestal Nacional, permite trabajar en grandes superficies a bajo coste, y con información de alta calidad. En este proyecto se han seleccionado estas fuentes de datos para desarrollar metodologías específicas de generación de cartografía de calidad de estación y carbono secuestrado en masas de las especies objetivo. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la modelización de la calidad de estación y la monitorización de existencias de carbono para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia. Se espera que esta metodología contribuya a que la compensación de emisiones a través de la gestión forestal pueda convertirse en una fuente de financiación para la silvicultura de estas masas forestales.

**Palabras clave:** LiDAR, calidad de estación forestal, Kioto, cambio climático, gestión forestal.

### ***ForestCO2: monitoring of carbon sinks in Pinus halepensis stands in the Region of Murcia***

**Abstract:** Forest management is one of Kyoto's offsetting mechanisms, but it is not yet being applied in Spain due to lack of methodologies and experiences. The LIFE ForestCO2 project aims to give a major impetus to the carbon sinks generated through actions of Sustainable Forest Management as a key in the fight against climate change and, simultaneously, as carbon stores where organizations and companies from the diffuse sectors can invest, on a voluntary basis, to offset their emissions through the figure of the CO<sub>2</sub> credit. The aim of the project is the modeling of carbon sequestration as a consequence of forest management activities in *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinaster* Ait stands in its different deposits: biomass (aerial and underground), soil organic matter and dead organic matter, through methodologies recognized by the panel of experts on climate change (IPCC), calibrated and improved the accuracy at the local level. The combination of public data sources, such as LiDAR data from PNOA, and databases of the fourth National Forest Inventory, allows to work in large areas at low cost, and with high quality information. In this project, these data sources have been selected to develop specific methodologies for generation of site quality and carbon sequestration cartography in the forest area occupied by the target species. This article presents the results obtained in the modeling of site index and the monitoring of carbon stocks for *Pinus halepensis* stands in the Region of Murcia. This methodology could contribute to the compensation of emissions' goal through forest management, becoming a source of funding for the silviculture of these forest stands.

**Keywords:** LiDAR, forest site quality, Kioto, climate change, forest management.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Dentro de las acciones de compensación de emisiones de gases de efecto invernadero, tanto en el protocolo de Kioto como en los acuerdos de Marrakech, la gestión forestal se planteó como una posibilidad a desarrollar. Sin embargo, mientras que otras opciones de compensación han sido ampliamente desarrolladas como la forestación/

reforestación o los cambios de uso de suelo, la gestión forestal quedó relegada a un segundo plano.

El proyecto LIFE FOREST CO2 "Cuantificación de sumideros de carbono forestal y fomento de los sistemas de compensación como herramientas de mitigación del cambio climático" trabaja en este sentido, tratando de desarrollar metodologías válidas para compensar emisiones mediante la gestión forestal. Una de las líneas

de trabajo del proyecto es la modelización del secuestro de carbono como consecuencia de actuaciones de Gestión Forestal Sostenible (podas, claras, clareos, etc.) en masas de *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Ait. españolas y francesas en sus diversos depósitos: biomasa (aérea y subterránea), materia orgánica del suelo y materia orgánica muerta, mediante cálculos reconocidos a nivel internacional (IPCC), pero precisados a escala local. Para ello, se ha apostado por la utilización de datos públicos como el LiDAR del PNOA y las parcelas del IFN4, lo que permite trabajar en grandes superficies a bajo coste, y con información de alta calidad

En este artículo se presentan los resultados sobre modelización de la biomasa y calidad de estación en el caso de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

La cartografía de biomasa y de calidad de estación se desarrolló a partir de datos LIDAR complementados con otro tipo de datos relacionados con el índice de sitio como las variables topográficas, de suelo y climáticas. Los datos de LiDAR del PNOA corresponden al vuelo del 2009 con una resolución de 0,5 pulsos/m<sup>2</sup>. Para la estimación de las variables topográficas en el área de estudio, se utilizó un modelo digital del terreno (MDT) con paso de malla de 25 m (CNIG). A partir del MDT de 25 metros de resolución se generó la cartografía de otras variables topográficas derivadas del MDT también necesarias para construir los modelos como son la pendiente, la insolación y el índice de posición topográfica. La insolación se generó utilizando la herramienta Hillshade disponible en la librería GDAL (QGIS). Para ello, se usó un azimut de 180° (mediodía solar) y un ángulo vertical o altitud correspondiente a la capital de provincia más cercana. Se usaron dos valores de altitud correspondientes a la posición del sol en verano y en invierno, obteniendo de esta forma dos ráster de insolaciones.

El índice de posición topográfica (TPI) compara la elevación de cada celda del MDT con la elevación media de una zona especificada alrededor de la celda. Los valores positivos del TPI representan puntos de mayor cota que la media de sus vecinos (crestas). Los valores negativos representan puntos de menor cota que los de su alrededor (valles) y los valores próximos a cero son o áreas planas o áreas de pendiente constante en las que la pendiente del punto es significativamente mayor que cero. La importancia del TPI se halla en que la cota de un punto no define la topografía sino la relación de esta cota con las próximas (Conejo Muñoz *et al.*, 1992).

Las variables de suelo se obtuvieron de la base de datos geográfica de suelos de Eurasia a escala 1:1.000.000 (SGDBE). Se hizo una reclasificación de las unidades de cartografía del terreno (SMU) en un código numérico dentro de la superficie de estudio, de forma que éstas puedan ser tratadas como una variable paramétrica a la hora de generar los modelos de calidad de estación. En este caso se utiliza la clasificación de suelos FAO-90 para distinguir los tipos de suelos presentes en el

área de trabajo: Petric Calcisol, Haplic Calcisol, Eutric Cambisol, Calcaric Fluvisol, Haplic Gypsisol, Mollic Leptosol, Lithic Leptosol, Water body.

Las variables de clima (temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación) se obtuvieron para tres bases de datos de clima principales para la Península Ibérica: Worldclim, con una resolución de 1 km, Atlas Climático de la España Peninsular (Gonzalo, 2010) con una resolución de 1 km y el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica (Ninyerola, 2005) con una resolución de 200 m. A partir de esas variables se generaron 19 variables bioclimáticas a través del paquete “dismo” de R (Hijmans *et al.*, 2015)

### 2.1. Procesado LiDAR de toda la superficie de trabajo

La información LiDAR fue procesada con el programa FUSION (McGaughey y Carson, 2003). Para toda la superficie de estudio se generó un modelo digital de elevaciones (MDT) de 2 metros de resolución a partir de los puntos clasificados como suelo. El MDT fue posteriormente utilizado para asignar alturas sobre el suelo a todos los retornos clasificados como vegetación (normalización de la nube de puntos). A partir de la nube de puntos normalizada se calculó una batería de 70 estadísticos de estructura de masa arbolada por encima de 2 metros en celdas de 25 m de lado, seleccionado finalmente 13 variables LiDAR: Media, Desviación estándar, Varianza, Coeficiente de variación, Rango intercuartílico, Kurtosis, Percentil del 1%, Percentil del 5%, Percentil del 25%, Percentil del 50%, Percentil del 75%, Percentil del 95%, Percentil del 99%, Fracción Cubida Cubierta y *Canopy releaf ratio*. En total se obtuvieron 41 variables predictoras para el cálculo de modelos de predicción de la biomasa y la calidad de estación de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

### 2.2. Parcelas IFN4 y campo

Para el ajuste del modelo se han utilizado parcelas del IFN4 localizadas en masas de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia.

Las parcelas del IFN se localizan en campo mediante modelos de navegador GPS básico que presentan unos errores de medición medios superiores a los 5 metros. Para la modelización de la biomasa a partir de LiDAR es conveniente utilizar precisiones submétricas de localización del centro de la parcela, de modo que fue necesario realizar un trabajo previo de recolocación de las parcelas para alcanzar esa precisión necesaria. Tras esta tarea, se hizo una selección de las parcelas que alcanzaron dicha precisión submétrica que dio como resultado una base de datos de 243 parcelas que fueron las que finalmente se utilizaron en todos los trabajos de modelización (Figura 1).

La calidad de estación de cada parcela se calculó a partir de los modelos para *Pinus halepensis* (Montero *et al.*, 2006). La biomasa se calculó como el volumen con corteza del IFN4.

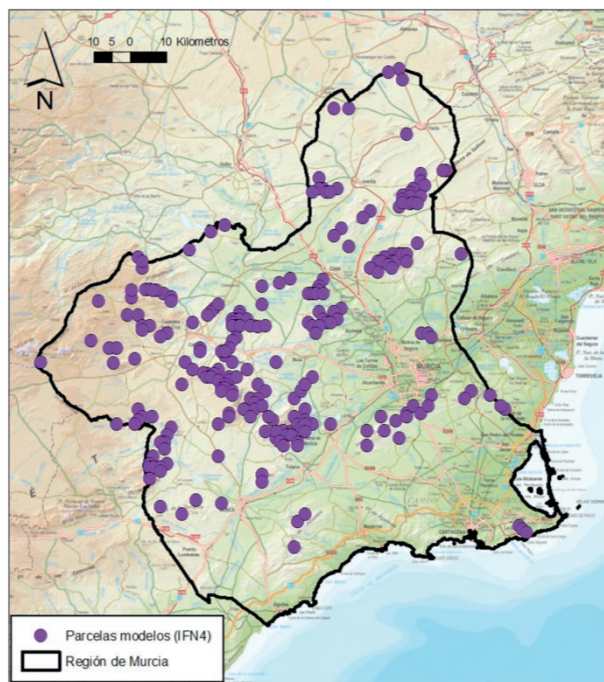


Figura 1. Localización de las parcelas del IFN4 de *Pinus halepensis* en Murcia.

### 2.3. Modelización estadística

El ajuste de modelos y la generación de cartografía se realizaron con el paquete estadístico R. Se ajustaron modelos paramétricos (regresión lineal) y no paramétricos (*Random Forest*).

Para el ajuste de modelos se utilizaron los siguientes paquetes de R: Rcmdr, stats, car, graphics, lmtest, MASS, lme4, randomForest, rUtilities, caret, ggpubr, maptools, hydroGOF. La selección de variables para optimizar la capacidad predictiva de los modelos de *Random Forest* se realizó con el paquete VSURF de R (Genuer *et al.*, 2010).

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Calidad de estación

Se construyeron distintos modelos de calidad de estación de diferentes tipos, paramétricos y no paramétricos, y se seleccionó el que mejor ajuste tuvo. Este modelo se corresponde con un modelo no paramétrico generado con *Random Forest* (Breiman, 2001.) con una selección de variables realizada mediante el paquete VSURF de R. Dicho modelo está integrado por 12 variables: 7 variables de worldclim, 2 variables climáticas de Gonzalo, 2 variables topográficas y una de insolación. En la Tabla 1 se presentan los valores de ajuste del modelo.

Tabla1. Valores de ajuste del modelo RF de calidad de estación.

RMSE	R squared	Cohen f2	Accuracy	Overfitting ratio
3,006	0,214	0,272	0,850	12,000

El modelo seleccionado se aplicó al *stack* de raster y se generó un mapa de calidades de estación para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia con una resolución de 25 metros (Figura 2).

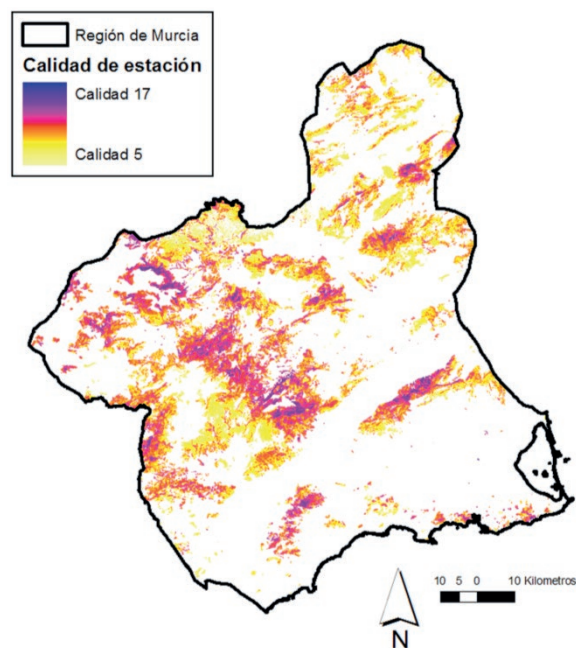


Figura 2. Cartografía de Calidad de estación en las masas de *P. halepensis* en la Región de Murcia.

### 3.2. Biomasa

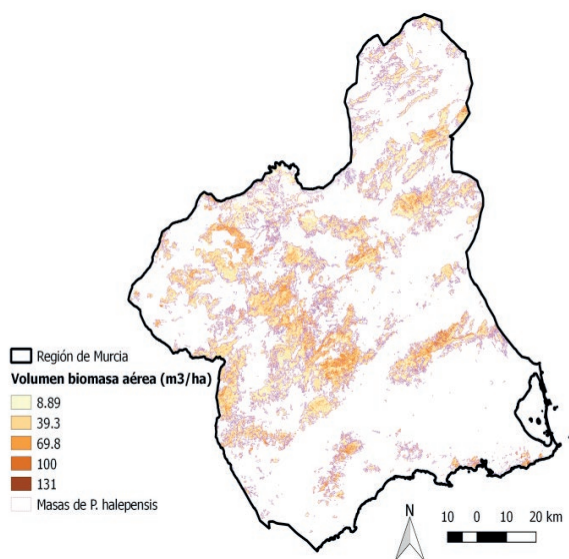
Para la biomasa también se probaron modelos de diferentes tipos y se seleccionó un modelo no paramétrico generado con *Random Forest* con una selección de variables realizada mediante el paquete VSURF de R. Dicho modelo contiene 2 variables LiDAR: un percentil bajo de alturas y un estadístico de fracción de cubierta.

En la Tabla 2 se presentan los valores de ajuste del modelo.

Tabla2. Valores de ajuste del modelo RF de biomasa.

RMSE	R squared	Cohen f2	Accuracy	Overfitting ratio
17,495	0,670	2,028	0,767	70,000

El modelo seleccionado se aplicó a su vez al *stack* de raster y se generó un mapa de biomasa ( $m^3/ha$ ) para las masas de *Pinus halepensis* en la Región de Murcia con una resolución de 25 metros (Figura 3). A su vez, se calcularon las existencias totales de biomasa a partir del raster generado con el modelo de LiDAR para el estrato de *Pinus halepensis* (257.216,08 ha) y se compararon con las existencias calculadas con todas las parcelas del IFN4 incluidas dentro de los límites de dicho estrato como otra manera adicional de validar las predicciones de LiDAR (Tabla 3).



**Tabla3.** Existencias de biomasa aérea de *P. halepensis*.

	Nº	Biomasa	Biomasa	Error de
Inventario	parcelas	(m³/ha)	Total (m³)	muestreo
				(m³)
LiDAR	243	30,04	7.727.199,67	-
IFN4	1.508	31,34	8.110.581,84	520.564,51

#### 4. DISCUSIÓN

En las diferentes pruebas realizadas se observó que las variables LiDAR, descriptoras de la estructura forestal, “engañan” al modelo de calidad de estación, ganando peso en los modelos e incluso llegando a desplazar al resto de variables. Sin embargo, al analizar el resultado de dichos modelos, se observa que en ellos la estructura llega a enmascarar a la propia calidad de estación, de manera que predicen todas las masas de menor altura dominante como de calidades bajas, no siendo capaces de discriminar aquellos enclaves con masas jóvenes y buenas calidades de estación.

Por este motivo, los modelos de calidad de estación con más sentido biológico son los que prescinden de las variables LiDAR e incorporan solamente variables ambientales (climáticas, topográficas y de insolación). No obstante, los modelos seleccionados de calidad de estación funcionan muy bien.

Respecto a los modelos de biomasa, la situación es distinta. En las diferentes pruebas realizadas se comprobó que las variables LiDAR son más que suficientes para conseguir buenos modelos predictivos, no siendo necesarias en este caso las variables ambientales. Esto se explicaría por la relación directa entre la cantidad de biomasa existente y las características estructurales del rodal, algo que no sucede con la calidad de estación, variable en la que intervienen otros factores (e.g. la edad de la masa).

Se puede concluir que es posible obtener cartografía continua de alta resolución de biomasa y calidad de estación a partir de datos de fácil acceso. Esta cartografía supone una oportunidad para mejorar la gestión forestal y el diseño de intervenciones selvícolas a escala rodal

ya que permite conocer la calidad de estación y las existencias de biomasa en rodales de pequeña superficie, allí donde la precisión de otras fuentes de datos como el IFN4 no llega (por ausencia de parcelas). En este sentido, esta cartografía generada es totalmente válida para los fines del proyecto LIFE ForestCO2.

Por otro lado, en la tabla 3 se puede comprobar que el valor de las existencias totales calculadas para todo el estrato de *Pinus halepensis* de la Región de Murcia a partir de los modelos de LiDAR está dentro del intervalo de confianza del valor calculado con todas las parcelas del IFN4 correspondientes a dicho estrato. La conclusión más importante es que se pueden conseguir resultados similares con un esfuerzo de muestreo mucho menor (243 parcelas frente a 1.508) lo que supone un importante ahorro económico. Esta cartografía de alta resolución obtenida con bajo coste puede ser fundamental en la rentabilidad de los proyectos de carbono de gestión forestal, más aún si cabe en masas de especies poco productivas sobre suelos pobres, con una lenta respuesta a los tratamientos selvícolas como es el caso del *Pinus halepensis* en la Región de Murcia.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- Breiman, L. 2001. Random forests. *Mach. learn.*, 5-32.
- Conejo Muñoz, R., Morales Bueno, R., Pérez de la Cruz, J.L., Urbano Montero, J.A. 1992. Conjuntos difusos y reconocimiento de rasgos del terreno. *II Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy*, Madrid.
- Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern. Recognition Letters*, 31(14), 2225-2236
- Gonzalo, J. 2010. *Diagnosis Fitoclimática de la España Peninsular. Hacia un modelo de clasificación funcional de la vegetación y de los ecosistemas peninsulares españoles*. Serie técnica Naturaleza y Parques Nacionales. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España.
- Hijmans, R.J., Phillips, S., Leathwick, J., Elith, J. 2015. Dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.0-12. <http://CRAN.R-project.org/package=dismo>
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978.
- McGaughey, R. J., Carson, W.W. 2003. Fusing LIDAR data, photographs, and other data using 2D and 3D visualization techniques. In: *Proceedings of Terrain Data: Applications and Visualization—Making the Connection*, October 28–30, 2003. pp. 16–24.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J.M. 2005. *Atlas Climático Digital de la Península ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica*. Univ. Autónoma de Barcelona. Bellaterra, 44 pp.
- Worldclim URL: <http://www.worldclim.org/>