



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-149

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cartografía de alta resolución espacial de la estructura 3D de la vegetación del Parque Natural Fragas do Eume (Galicia) desde datos LiDAR

MONTALVO, J.^{1,2}, VICENTE, C.², ALONSO-BENITO, A.², MARTÍNEZ, R.^{1,2}, FERNÁNDEZ, A.² y MENCÍAS, A.²

¹ Departamento de Ecología y Biología Animal, Universidad de Vigo.

² Fundación Matrix, Investigación y Desarrollo Sostenible.

Resumen

Se describe un método avanzado para caracterizar la variabilidad espacial de la vegetación en el Parque Natural Fragas do Eume (Galicia), cuya superficie es de alrededor 90 km², y presenta alta heterogeneidad geomorfológica y de tipos de superficie arbolada, predominando el bosque mixto caducifolio y las plantaciones de eucalipto y pino. El objetivo es caracterizar los diferentes tipos de vegetación leñosa en un territorio extenso de forma sistemática, rápida y rigurosa. Se integran en una base de datos georreferenciada, datos de escáner láser aerotransportado (LiDAR) y de fotointerpretación de ortoimágenes. La altura dominante de tres tipos de vegetación arbórea (bosque caducifolio, eucaliptal y pinar) y de matorral se estima combinando ecuaciones calibradas con datos locales del Cuarto Inventario Forestal Nacional, datos LiDAR y modelización digital de alta resolución espacial (30x30 m). Los resultados obtenidos son modelos digitales de la estructura 3D de diferentes tipos de vegetación arbórea y una cartografía de toda la superficie de vegetación leñosa del parque. Los resultados preliminares sugieren la viabilidad de estimar y cartografiar la altura de la vegetación de interés para el conocimiento de la calidad de hábitats del parque, su conservación y aplicaciones a la gestión forestal.

Palabras clave

Altura, LiDAR, calidad del hábitat, dosel forestal, inventario forestal.

1. Introducción

La estructura vertical de la vegetación son atributos muy interesantes para la gestión asociada a iniciativas como el inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero o la valoración de los servicios ecosistémicos de espacios naturales protegidos (ENP). Los datos LiDAR (Light Detection and Ranging) se han convertido en una buena fuente de datos para el estudio exhaustivo de la estructura 3D de la vegetación y un apoyo a los inventarios forestales, sin embargo, el uso de LiDAR en grandes áreas tiene aún una aplicación complicada, debido a problemas de logística, costes de adquisición de los datos y a la gran cantidad de volumen de datos que hay que procesar (WULDER et al. 2012; MICHEZ et al. 2016).

Tradicionalmente, los datos provenientes de la nube de puntos LiDAR se han relacionado con las variables dasométricas obtenidas a nivel de parcela mediante ecuaciones de regresión para estimar la altura (HYYPÄ et al. 2012; MONTALVO et al. 2013; WALLACE et al. 2016), el área basimétrica (GIANNICO et al. 2016), el volumen maderable (LEVICK et al. 2016), número de pies (VALBUENA RABADÁN et al. 2016), o biomasa y contenido de carbono (JOCHM et al. 2011; ZHAO et al. 2012) y se extrapolan a toda la masa. La metodología usada hasta ahora ha dado resultados fiables en la predicción de los modelos, pero en masas mixtas los errores son mayores. Por este motivo, actualmente algunos autores han propuesto técnicas de estratificación basadas en datos LiDAR, pero apoyadas por imágenes de satélite (HEURICH & THOMA 2008; LATIFI et al. 2016).

En territorios acogidos a una figura de protección, con una complejidad orográfica y de la vegetación, el conocimiento de alta resolución espacial de la estructura de la vegetación arbórea y arbustiva es fundamental para su planificación y gestión. Hasta hace pocos años, la única fuente de información eran los inventarios forestales, sobre todo, el Inventario Forestal Nacional (IFN). En el Parque Natural Fragas do Eume (PNFE; Galicia), en el Cuarto Inventario Forestal Nacional (4IFN) se han muestreado un 32% menos de parcelas que en el 3IFN, debido fundamentalmente a la falta de financiación (ALBERDI et al. 2016). Por este motivo, el uso de los datos LiDAR se revela fundamental, para disponer de una información adecuada del estado en el que se encuentra los diferentes tipos de vegetación arbórea (TVA). El diseño e implementación de medidas de conservación de la biodiversidad en ENP se beneficia del conocimiento de la estructura 3D, que permite caracterizar y mapear los hábitats (MARTINUZZI et al. 2009; MONTESANO et al. 2013; GUO et al. 2017; GASTÓN et al. 2017).

En el presente trabajo, se aplican los datos LiDAR a una vegetación leñosa compleja en el PNFE para estimar la altura dominante como expresión de la variabilidad espacial de la calidad de hábitat e indicador potencial de otras variables de los ecosistemas forestales.

2. Objetivos

Los objetivos se refieren a un área extensa con una vegetación heterogénea en tipología, altura y estructura vertical y horizontal, y son los siguientes: (1) generar modelos y un mapa digital exhaustivo de la altura de la vegetación de alta resolución espacial; y (2) caracterizar la altura y su variabilidad espacial de diferentes tipos de vegetación arbórea.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

La zona de estudio es un espacio natural protegido de 91,04 km² situado en el noroeste de Galicia ocupando los municipios de Pontedeume, Cabanas, Monfero, A Capela y As Pontes, de la provincia de A Coruña entre las coordenadas 43°26'20" N y 43°19'8" N y 7°52'51" W y 8°7'57" W, el Parque Natural Fragas do Eume (Figura 1). Se extiende desde el nivel del mar hasta 713 m snm. El relieve se caracteriza por la presencia de valles profundos y cerrados (gargantas) de origen tectónico con ríos encajados, con una morfología de media montaña. Dominan las pendientes abiertas y más del 60% de la superficie tiene pendiente moderada a muy alta (>20%).

Geológicamente es muy heterogéneo, con presencia de gneis de la serie *Ollo de sapo*, esquisto y predominio de rocas granitoides paleozoicas, algunas afloran en laderas y cotas altas. Presenta depósitos aluviales terciarios y recubrimientos cuaternarios. En general los suelos son ácidos, de fertilidad moderada y con alta proporción de materia orgánica.

El clima es atlántico, de tipo oceánico húmedo costero (NINYEROLA et al. 2005; UAB 2005; CMA 2014), en general con temperaturas moderadas, aunque más frías hacia cotas más altas del interior (rango de temperatura media anual 10,2-15,1°C; inviernos suaves y veranos frescos), y una baja amplitud térmica anual (8,8-9,5°C). La precipitación total anual media es abundante (1.200-1.900 mm), con distribución regular (en la mayoría de la superficie, todos los meses más de 30 mm), siendo el balance hídrico positivo en la mayor parte del parque. La humedad relativa del aire es alrededor del 80% y poco variable.

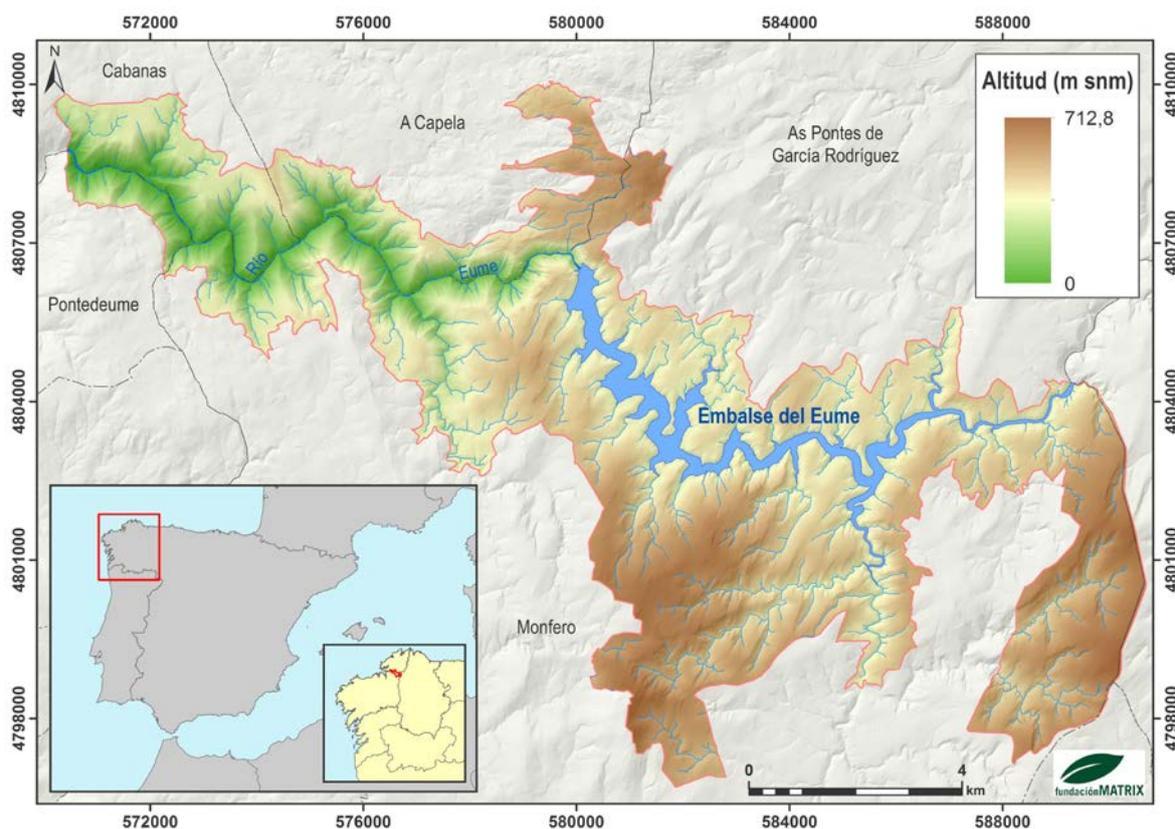


Figura 1. Mapa de situación del Parque Natural Fragas do Eume al norte de la provincia de A Coruña y modelo digital del terreno generado desde datos LiDAR.

El 54% de la superficie del PNFE es arbolada (CMA 2014). Predomina la vegetación arbórea natural de bosque caducifolio mixto o fraga (alrededor del 30% de la superficie), con presencia o dominancia de roble común (*Quercus robur*), y otras caducifolias como castaño (*Castanea sativa*), abedul (*Betula celtiberica*), peral silvestre (*Pyrus pyrastrer*), y especialmente en riberas y vaguadas húmedas por debajo de 250 m de altitud aliso (*Alnus glutinosa*), fresnos (*Fraxinus excelsior* y *F. angustifolia*), avellano (*Corylus avellana*), sauce (*Salix atrocinerea*) y laurel (*Laurus nobilis*). Con presencia puntual o menos frecuencia aparecen arce (*Acer pseudoplatanus*), olmo de montaña (*Ulmus glabra*), madroño (*Arbutus unedo*) y acebo (*Ilex aquifolium*). La fraga es un bosque relíctico de la Era Terciaria, de alto interés, que incluye el tipo de hábitat 9230 (en particular el 91E0), cuya conservación es prioritaria. Destaca la presencia de especies valiosas o raras de helechos. Existe una superficie relevante de plantaciones de eucalipto blanco (*Eucalyptus globulus*) y pino (predomina *Pinus pinaster* subsp. *atlantica*; también existe *P. radiata*), que representan aproximadamente una quinta parte de la superficie del parque. El PNFE también cuenta con extensas áreas naturales de tojal-brezal, a veces con presencia relevante de carquesa, y, en menor proporción, de prados y cultivos herbáceos. El 80% de la superficie corresponde a terrenos de propiedad privada, y el resto a montes de titularidad pública (CMA 2014).

3.2. Adquisición y procesado de datos LiDAR

El Instituto de Estudios do Territorio de la Xunta de Galicia facilitó los datos LiDAR (Light Detection And Ranging) en archivos con formato .LAS, clasificados y coordenadas del sistema de referencia geodésico ETRS89, adquiridos en enero y febrero de 2013 en un vuelo contratado ad hoc. El sensor LiDAR emite pulsos láser y registra la altura de los ecos de estos pulsos tras interceptar el terreno o la vegetación como coordenadas de una nube de puntos. El sensor aerotransportado usado es el modelo ALS 60 de Leica. El sensor escanea en líneas paralelas de 160 m de ancho con un

solapamiento transversal del 15%, un ángulo máximo de 50°, una frecuencia mínima de escaneado de 73 Hz, y una frecuencia de pulsos de 128 Hz. Registra hasta cuatro ecos por pulso, con una densidad promedio de ecos iniciales de 10,8 m⁻² (que implica una distancia entre puntos de 0,3 m), y un error típico de estimación (ETE) altimétrica $\leq 0,20$ m en la nube de puntos.

El procesado de los datos de ecos del LiDAR (más de 19×10^8) ha sido convencional, mediante clasificación automática de los puntos en ecos de suelo y de otras superficies, con una cuidadosa verificación y comprobación con ortofotografías digitales del PNOA de 2014 (con un tamaño de píxel de 0,25 m, georreferenciadas también con el sistema ETRS89). Se reclasificaron los puntos que correspondían a edificios, torretas, líneas de alta tensión y otras infraestructuras que no corresponden a ecos de vegetación.

Se ha usado un mapa digital de tipos de vegetación y usos del suelo de alta resolución espacial del PNFE, realizado mediante fotointerpretación de ortofotografías del PNOA de 2014, que delimita los siguientes tipos: bosque caducifolio, eucaliptal, pinar, tojal-brezal, prados y cultivos herbáceos. Mediante un tamaño de celda de 5x5 m, se ha generado un modelo digital del terreno (MDT) de alta resolución espacial usando puntos clasificados como suelo mediante el método de interpolación de distancia inversa ponderada, generando archivos ráster de almacenamiento de la información geográfica. Del mismo modo se ha generado un modelo digital de superficie (MDS) con un tamaño de celda de 30x30 m, usando puntos clasificados como vegetación considerando el valor máximo de todos los ecos de las celdas con vegetación arbórea (MDS_A) o tojal-brezal (MDS_T). Estos MDS incluyen la altura de la vegetación y la cota del terreno. En ambos casos se ha estimado la altura máxima de la superficie del dosel de la vegetación arbórea (H_{ML}) así: $H_{ML} = MDS - MDT$, excepto en las áreas sin vegetación leñosa, en donde se ha considerado que $H_{ML} = 0$ debido a que el error vertical de medida es mayor que la variabilidad en la altura del matorral bajo y de la vegetación herbácea baja y, por tanto, es indistinguible de los ecos de suelo.

Se ha usado el software Fusion, versión 3.60, en concreto la herramienta de procesamiento GridMetrics para estimar H_{ML} desde datos LiDAR en una muestra de parcelas circulares de 15 m de radio.

3.3. Datos de inventario forestal, calibración y generación de mapas

Se han usado datos del Cuarto Inventario Forestal Nacional (4IFN; MARM 2011a, b), en particular de 46 parcelas, 23 localizadas en el PNFE y el resto en su entorno inmediato (un área situada a una distancia de hasta tres kilómetros desde su límite, 241 km²); se muestrearon entre noviembre de 2008 y principios de marzo de 2009. El criterio de selección es que correspondan a vegetación arbórea con más del 50% de fracción de cabida cubierta y una densidad superior a 80 pies/ha. El 38% de las parcelas carecen de datos para un radio mayor de 15 m, por lo cual se usaron los de subparcelas de 15 m de radio (con una superficie idéntica o similar a la de las celdas usadas para estimar parámetros o generar los modelos digitales de vegetación derivados desde datos LiDAR).

Se han usado o estimado los siguientes parámetros en estas subparcelas: densidad de pies (d); diámetro medio de todos los árboles (D); diámetro medio de árboles dominantes (D_d); área basal (AB); altura media de los árboles dominantes (H_{Med}); altura máxima (H_M), es decir altura del árbol más alto; altura del percentil 99 de todos los árboles (H_P); fracción de cabida cubierta total (FCct); fracción de cabida cubierta arbórea (FCCa); volumen maderable del fuste principal con corteza (VCC); volumen maderable del fuste principal sin la fracción correspondiente a la corteza (VSC); y biomasa aérea (BA), en unidades de carbono (Mg C ha⁻¹), correspondiente al volumen de fuste, que es la fracción más relevante de la biomasa aérea total del ecosistema forestal. Se han usado los valores de volumen del 4IFN y datos bibliográficos de densidad básica de la madera y corteza de las especies del área de estudio o afines y un contenido de carbono del 50% en la biomasa para estimar BA.

Se ha realizado una caracterización estructural descriptiva de tres TVA: bosque caducifolio, eucaliptal y pinar. Se han evaluado sus posibles diferencias mediante el test U de Mann-Whitney, mediante comparaciones de valores dentro y fuera del PNFE para cada TVA, y entre TVA para cada área. Se han usado los valores de H_p como indicadores de la altura dominante del dosel de la vegetación arbórea en cualquier punto del PNFE ($H_{p'}$) y H_M como indicador de su altura máxima en cualquier punto del PNFE ($H_{M'}$). Por otra parte, en el área de tojal-brezal del PNFE se ha definido una muestra aleatoria correspondiente a 130 celdas de 30x30 m. En cada celda, se han usado los valores del percentil 50 de la altura de los ecos de la nube de puntos LiDAR clasificados como vegetación baja y media (H_{P-50}) y H_{ML} como indicadores de la altura dominante ($H_{P-50'}$) y máxima del dosel del tojal-brezal.

Mediante modelos de regresión no lineal se han generado ecuaciones predictivas de H_p y H_{P-50} para extrapolar a todo el ámbito de la vegetación leñosa del PNFE. Para la vegetación arbórea se ha realizado una calibración desde la muestra de parcelas del 4IFN, determinando las ecuaciones de modelos de regresión potencial entre los valores de H_p y H_M (considerada análoga a H_{ML}); estas ecuaciones permiten convertir los datos LiDAR (H_{ML} de cada TVA derivados del MDS_A) en $H_{p'}$ y su aplicación a todo el área con bosque caducifolio, eucaliptal o pinar en el PNFE. Para el tojal-brezal se ha generado un modelo de regresión potencial entre los valores de H_{P-50} y H_{ML} de la muestra de celdas de tojal-brezal, considerando la variabilidad de altura del matorral atlántico en Galicia (VEGA HIDALGO et al. 2001, 2013); la ecuación obtenida permite convertir los datos LiDAR (H_{ML} derivados del MDS_T) en $H_{P-50'}$ y su aplicación a toda el área con este TVA en el PNFE. La variabilidad espacial de la altura dominante de cada tipo de vegetación se ha estimado mediante el coeficiente de variación (CV) de todas las celdas de cada tipo.

Mediante operaciones propias de Sistemas de Información Geográfica realizadas con ArcGIS 10.4, tras la estimación de los nuevos valores de $H_{p'}$, se han exportado y extraído en todo el PNFE las áreas para cada tipo de vegetación de los diferentes rangos de altura. Así se ha realizado un inventario exhaustivo de la altura dominante en cada tipo, lo que permite evaluar la variabilidad espacial de la estructura 3D de la vegetación leñosa. Se ha generado un mapa de alta resolución espacial de la altura de la vegetación leñosa, usando las siguientes seis clases predefinidas: >30 m (arbolado muy alto); 20-30 m (arbolado alto); 10-20 m (arbolado medio-alto); 3-10 m (arbolado bajo-medio); 0,5-3 m (matorral medio-alto y arbolado muy joven); y <0,5 m (matorral bajo-muy bajo). Estas clases se ajustan a la variabilidad en los estados de desarrollo o regeneración natural de las plantaciones forestales o del bosque caducifolio, respectivamente, y altura dominante del matorral atlántico en el PNFE. La validación de la estimación de $H_{p'}$ se ha realizado de dos formas usando la muestra de 23 parcelas del PNFE. Por una parte, mediante la comparación de H_{ML} , estimada desde datos LiDAR (mediante Fusion) y H_M , derivada del 4IFN. Por otra parte, mediante la comparación de $H_{p'}$ estimada mediante las ecuaciones de calibración y H_p derivada del 4IFN.

4. Resultados

4.1. Variabilidad en estructura y biomasa de tipos de vegetación

Las parcelas del 4IFN en el PNFE y su entorno representan un gradiente altitudinal de más de 400 m snm (se sitúan entre 224 y 650 m snm) y una notable variación topográfica (rango de pendiente: 2-44%). La evaluación comparativa de la estructura y biomasa de los tres TVA arbórea en el área de estudio indica que no existen diferencias en las propiedades estructurales medias según su localización dentro o fuera del PNFE (Tabla 1).

No existen diferencias entre los diferentes TVA para la densidad de pies, el área basimétrica, el diámetro, el volumen sin corteza y la biomasa arbórea, tanto dentro como fuera del PNFE. Sin embargo, en el PNFE, el diámetro dominante (D_d) es significativamente mayor en bosque caducifolio que en plantaciones de eucalipto (11 cm más; $p < 0,01$), mientras que la altura media (H_{Med}) y la altura

del percentil 99 (H_p) son menores en bosque caducifolio (5 a 6,8 m menos, respectivamente; $p < 0,01$); no existen diferencias para estas variables entre los tipos de vegetación fuera del PNFE. Por otra parte, en el PNFE, la altura máxima (H_M) es mayor en eucaliptal (26,7 m) que en bosque caducifolio (19 m), no existiendo diferencias entre otras formaciones de vegetación dentro del PNFE o fuera del mismo. Para la FCC total no existen diferencias entre TVA dentro del PNFE; fuera del PNFE, el bosque caducifolio y pinar no difieren entre sí, pero tienen un 10% más que eucaliptal. Dentro del PNFE, la FCCa del bosque caducifolio es un 44% superior a la del pinar, no existiendo diferencias entre otras formaciones; fuera del PNFE, tampoco hay diferencias entre los tipos de vegetación. Respecto al volumen con corteza (VCC) el pinar presenta una media de 20 m³/ha más que el bosque caducifolio y las plantaciones de eucalipto; no existen diferencias entre ellos fuera del parque.

Tabla 1. Rangos de variación de las variables estudiadas en las parcelas del 4IFN.

Tipo de vegetación arbórea	Densidad (pies/ha)	Diámetro (cm)	Diámetro dominante (cm)	Área basimétrica (m ² ha ⁻¹)	Altura media (m)	Altura percentil 99 (m)
Bosque caducifolio	85 - 622	15,3 - 36,8	16,2 - 41,3	1,8 - 36,6	10,7 - 19,1	12,5 - 22,9
Eucaliptal	56 - 608	12,6 - 38,0	7,2 - 32,4	0,7 - 21,6	13,2 - 18,8	14,0 - 32,9
Pinar	71 - 410	17,5 - 40,0	20,1 - 40,8	3,6 - 35,6	13,1 - 25,5	9,5 - 27,4

Tabla 1 (cont.).

Tipo de vegetación arbórea	Altura máxima (m)	FCct (%)	FCCa (%)	VCC (m ³ ha ⁻¹)	VSC (m ³ ha ⁻¹)	BA (Mg C ha ⁻¹)
Bosque caducifolio	12,5 - 22,9	85 - 100	60 - 90	7,7 - 183,8	8 - 151,7	3,1 - 74,4
Eucaliptal	14,0 - 38,0	80 - 100	25 - 85	5,2 - 161,7	4,1 - 141,6	1,8 - 51,6
Pinar	9,5 - 29,7	90 - 100	40 - 85	23,9 - 301,3	14,9 - 246,7	4,9 - 60,1

4.2. Altura de tipos de vegetación en el Parque Natural Fragas do Eume

La Tabla 2 muestra las ecuaciones obtenidas. Para la vegetación arbórea, los datos del 4IFN permiten una calibración razonable. Los modelos potenciales reflejan que la altura dominante del dosel arbóreo puede estimarse desde la altura del árbol más alto para los tres tipos de vegetación; los altos valores de R^2 y bajos valores de ETE indican una satisfactoria exactitud de la estimación. Para el tojal-brezal, la ecuación obtenida, aunque muestra una relación también significativa, es de una fiabilidad predictiva inferior. Según los modelos de validación, existe una correlación positiva significativa tanto entre H_{ML} y $H_{M\bar{7}}$ ($R^2_{aj}=0,269$; $p < 0,01$), como entre $H_{p\bar{7}}$ y H_p ($R^2_{aj}=0,333$; $p < 0,01$).

Tabla 2. Modelos de regresión y sus atributos usados para estimar la altura de la vegetación desde datos LiDAR en el Parque Natural Fragas do Eume. H_M : altura máxima; H_{ML} : altura máxima estimada mediante LiDAR; H_p : altura del percentil 99 de todos los árboles; H_{p50} : altura del percentil 50 de los ecos de LiDAR.

Tipo de vegetación	Ecuación	R^2 ajustado	p	ETE (m)
Bosque caducifolio	$H_p = 2,88H_M^{0,608}$	0,59	<0,001	0,06
Eucaliptal	$H_p = 1,80H_M^{0,801}$	0,73	<0,001	0,05

Pinar	$H_P = 1,28H_M^{0,900}$	0,98	<0,001	0,02
Tojal-brezal	$H_{P-50} = 0,22H_{ML}^{0,667}$	0,23	<0,001	0,38

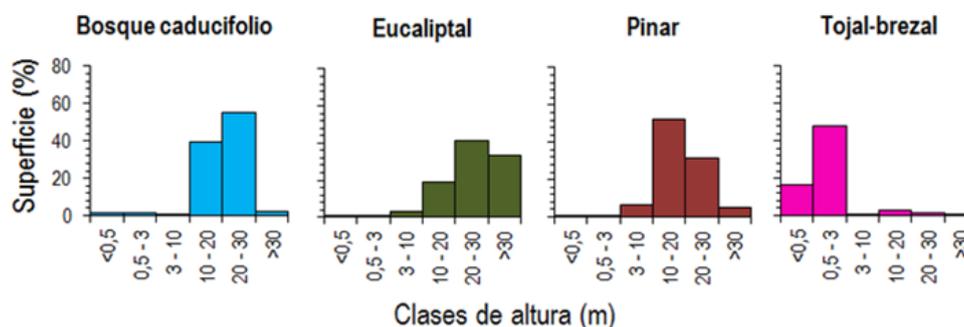


Figura 2. Inventario exhaustivo de superficie de altura de la vegetación leñosa del Parque Natural Fragas do Eume realizado desde datos LiDAR y modelos de datos de campo (vegetación arbórea).

La variabilidad espacial en la distribución de altura indica diferencias estructurales entre los TVA examinados (Figura 2). La mayor parte de la superficie de bosque caducifolio, el 55%, presenta una altura dominante del dosel entre 20 y 30 m, existiendo una fracción importante (40%) de 10 a 20 m, y es mínima (<2%) la más alta de 30 m. En cambio, el eucaliptal presenta más de un tercio de su superficie con una altura mayor de 30 m, aunque predomina (42%) una altura entre 20 y 30 m, existiendo un 6% correspondiente a fases de desarrollo juveniles (< 10 m). La altura dominante de las plantaciones de pino es 10-20 m (52%), aunque destaca casi un 40% mayor de 20 m; existe un relevante 11% correspondiente a plantaciones forestales en las primeras fases de desarrollo (<10 m). La superficie de tojal-brezal mayoritaria (72%) corresponde a un matorral medio y alto, de 0,5 a 3 m de altura dominante; un 24% es matorral bajo o muy bajo, menor de 0,5 m, al rededor del 4% de la superficie presenta valores por encima de 3 m.

El bosque caducifolio presenta la menor heterogeneidad espacial horizontal en la altura dominante del dosel arbóreo, con un CV=19,5%. Las plantaciones de eucalipto presentan la mayor variabilidad espacial (CV=30,6%), 1,6 veces más alto que el bosque caducifolio. Las plantaciones de pino presentan una variabilidad de H_P similar a las de eucalipto (CV=29,1%). Finalmente, el tojal-brezal presenta la mayor variabilidad relativa (CV=39,2%), aproximadamente el doble que el bosque caducifolio.

El mapa de altura dominante de la vegetación leñosa (Figura 3). Muestra que en el sector occidental del PNFE de cotas más bajas (Figura 1) se sitúa el área más extensa de vegetación arbórea más alta, con áreas extensas entre 20 y 30 m de altura, que corresponde a bosque caducifolio y plantaciones de eucalipto mayoritariamente. Estas últimas incluyen áreas por encima de 30 m. La vegetación arbórea en el sector oriental, de mayor altitud, ocupa mucha menor superficie, con teselas más pequeñas de la clase 20-30 m y más extensas de la clase 10-20 m. En este sector predomina el área de matorral, con manchas más pequeñas de matorral bajo correspondientes a relieves más altos. El arbolado joven es muy escaso en número de teselas y superficie total.

5. Discusión

Los resultados reflejan la viabilidad de estimar de forma exhaustiva la altura dominante de la vegetación leñosa en un territorio extenso desde datos de alta densidad. La gran similitud estructural de la vegetación arbórea dentro y fuera del PNFE expresa dos cosas. Por un lado, que las áreas más naturales y las más transformadas por aprovechamientos forestales no presentan diferencias entre sí y resultan del mosaico de usos productivos del monte característico del norte de Galicia y, en

particular, del área costera. Por otro, que el conjunto de parcelas del 4IFN es apropiado para aplicaciones locales y subraya la fiabilidad general de los modelos y del mapa digital.

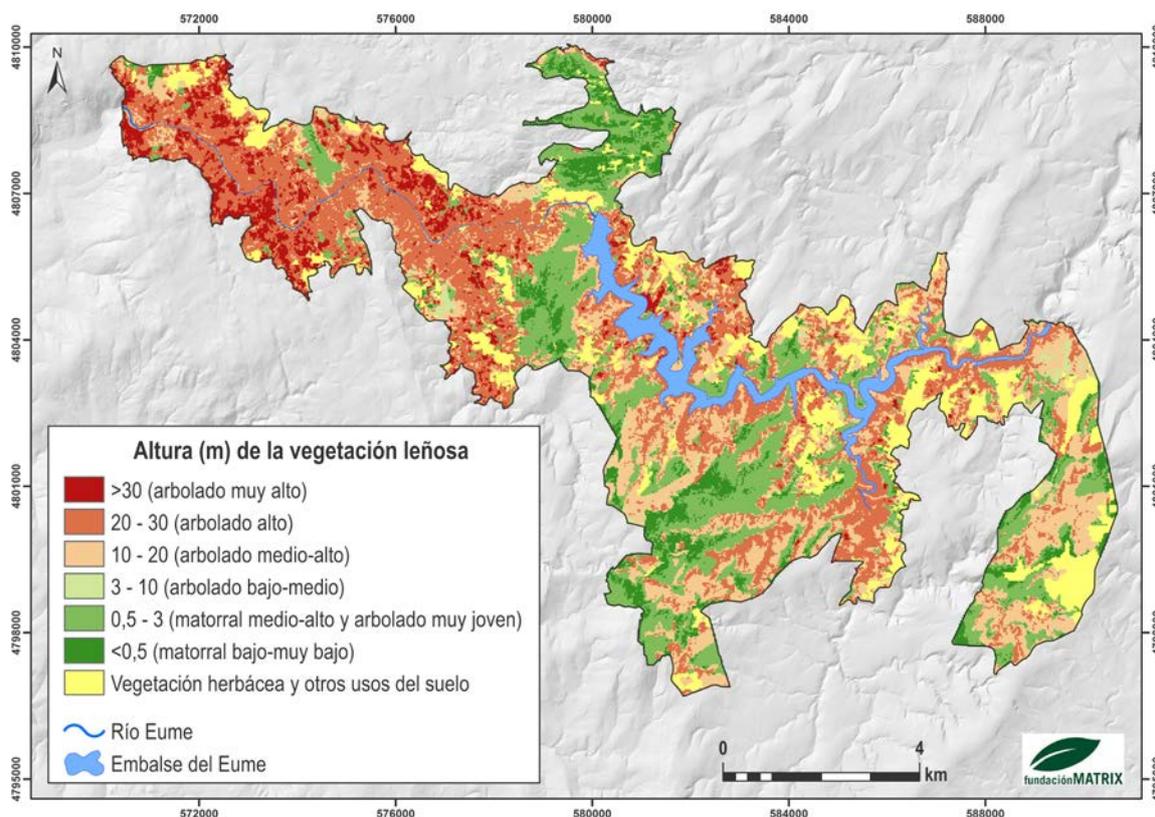


Figura 3. Mapa de altura de la vegetación leñosa del Parque Natural Fragas do Eume generado desde datos LiDAR de alta densidad de puntos y modelos de calibración de datos de campo (vegetación arbórea).

Cartografiar la altura y, por tanto, expresar la estructura 3D de la vegetación leñosa es innovador en un área extensa y en particular en un espacio natural protegido de España. Los valores de altura son coherentes con los del 4IFN en la provincia de A Coruña (MARM 2011a, b). Existen áreas con una altura superior a los 20 m en bosque caducifolio e incluso los 30 m en eucaliptal y pinar, lo que es coherente con el clima favorable para el desarrollo forestal del área.

La estimación de la altura de forma exhaustiva permite conocer la heterogeneidad espacial en la altura dominante de la vegetación de una forma estadísticamente apropiada para todo el área. Además, la variabilidad de alturas en las plantaciones forestales refleja una estructura espacial muy heterogénea de la superficie forestal, propiedad y usos muy fragmentados característicos del norte de Galicia, así como su intenso dinamismo y turnos cortos de explotación forestal. La mayor variabilidad en las plantaciones que en el bosque es coherente con esta interpretación. Existe más incertidumbre en los resultados relativos a la superficie de tojal-brezal, pero los rangos estimados son típicos con los propios del matorral atlántico (VEGA HIDALGO et al. 2001, 2013) y su variabilidad en su altura.

Tanto en la vegetación arbórea como en el tojal-brezal son posibles errores de estimación de la altura en áreas con pendiente más alta, acentuado por la altura y densidad de la vegetación, en especial en el bosque caducifolio, y en particular en algunas áreas de gargantas donde la teledetección activa está condicionada por el relieve, además de otros inherentes a la tecnología LiDAR (HODGSON & BRESNAHAN 2004; AGUILAR et al. 2010; SU & BORK 2006).

La calidad de la estimación de altura no es óptima. La diferencia de cuatro años entre los datos LiDAR y del 4IFN probablemente ha determinado diferencias entre la altura dominante. En este sentido, los valores estarían subestimados, sobre todo para el arbolado más joven en 2008 y, en particular, para eucaliptal y pinar, tipos de vegetación con tasas de crecimiento más altas, o para estos últimos por clareos u otros tratamientos selviculturales. En eucaliptal es conocida la existencia de daños de origen biótico que afectan a la estructura del dosel. Los resultados son preliminares, una aproximación indicadora de viabilidad en masas extensas y heterogéneas que requiere análisis más profundos y completos, y verificaciones adicionales de campo, para mejorar su exactitud.

La variabilidad espacial en la altura es indicador cualitativo de la distribución de la biomasa aérea de los TVA. El área más extensa y continua con mayor biomasa estaría en la parte occidental del PNFE, que corresponde mayoritariamente a bosque caducifolio y plantaciones de eucalipto. La vegetación arbórea del sector oriental, con mayor altitud presentaría una biomasa inferior. Esto es coherente con la madurez no excesiva conocida de las masas de roble y castaño en gran parte del PNFE, producto de su aprovechamiento secular. Así se desprende de sus atributos estructurales, como por ejemplo en todas las parcelas del 4IFN, $d < 40$ cm y $AB < m^2 ha^{-1}$ (Tabla 1). Para los tres TVA, los resultados también sugieren el interés de una estimación exhaustiva, así como, por ejemplo, la mayor madurez y conservación de bosque caducifolio o la presencia de plantaciones jóvenes dentro del mosaico detectado en la estructura 3D del PNFE (Figuras 2 y 3) relevante para su gestión.

Finalmente, los resultados, aunque preliminares, revelan su utilidad potencial para numerosas aplicaciones ecológicas, que incluyen la modelización y caracterización de la calidad del hábitat para especies de fauna con alta resolución espacial (VIERLING et al. 2008; EITEL et al. 2016).

6. Conclusiones

- Es viable estimar de forma exhaustiva la altura del dosel de la vegetación leñosa con alta resolución espacial y en un territorio extenso usando datos LiDAR de alta densidad de pulsos.
- Es viable caracterizar y mapear de forma exhaustiva la altura del dosel de diferentes tipos de vegetación arbórea con alta resolución espacial en un territorio extenso, heterogéneo y con un relieve complejo usando datos LiDAR.

7. Agradecimientos

Este trabajo es fruto del 'Programa de Investigación Ecológica y Territorial' de la Fundación Matrix, cofinanciado por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. El Instituto de Estudios do Territorio de la Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio de la Xunta de Galicia facilitó amablemente los datos LiDAR del área de estudio.

8. Bibliografía

AGUILAR, F.J.; MILLS, J.P.; DELGADO, J.; AGUILAR, M.A.; NEGREIROS, J.G.; PÉREZ, J.L.; 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65: 103–110.

ALBERDI, I.; SANDOVAL, V.; CONDÉS, S.; CAÑELLAS, I.; VALLEJO, R.; 2016. El Inventario Forestal Nacional español, una herramienta para el conocimiento, la gestión y la conservación de los ecosistemas forestales arbolados. *Ecosistemas* 2016, 25(3): 88-97; Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-3.10.

CMA (Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio); 2014. Plan reitor de uso e xestión do Parque Natural das Fragas do Eume. Xunta de Galicia. 157.

EITEL, J.U.H.; HÖFLE, B.; VIERLING, L.A.; ABELLÁN, A.; ASNER, G.P.; DEEMS, J.S.; GLENNIE, C.L.; JOERG, P.C.; LEWINTER, A.L.; MAGNEY, T.S.; MANDLBURGER, G.; MORTON, D.C.; MÜLLER, J.; VIERLING, K.T.; 2016. Beyond 3-D: The new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences. *Remote Sens. Environ.* 186: 372-392.

GASTÓN, A.; CIUDAD, C.; MATEO-SÁNCHEZ, M.C.; GARCÍA-VIÑAS, J.I.; LÓPEZ-LEIVA, C.; FERNÁNDEZ-LANDA, A.; MARCHAMALO, M.; CUEVAS, J.; DE LA FUENTE, B.; FORTIN, M.J.; SAURA, S.; 2017. Species' habitat use inferred from environmental variables at multiple scales: How much we gain from high-resolution vegetation data? *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 55: 1-8.

GIANNICO, V.; LAFORTEZZA, R.; JOHN, R.; SANESI, G.; PESOLA, L.; CHEN, J.; 2016. Estimating stand volume and above-ground biomass of urban forest using LiDAR. *Remote Sens.* 8, 339; doi:10.3390/rs8040339.

GUO, X.; COOPS, N.C.; TOMPALSKI, P.; NIELSEN, S.E.; BATER, C.W.; STADT, J.J.; 2017. Regional mapping of vegetation structure for biodiversity monitoring using airborne lidar data. *Ecol. Inform.* 38: 50-61.

HYPPÄ, J.; YU, X.; HYPPÄ, H.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H.; JAAKKOLA, A.; VAAJA, M.; KOSKINEN, J.; ALHO, P.; 2012. Advances in forest inventory using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing*, 2012, 4, pp. 1190-1207, doi:10.3390/rs4051190.

HEURICH, M.; THOMA, F.; 2008. Estimation of forestry stand parameters using laser scanning data in temperate, structurally rich natural European beech (*Fagus sylvatica*) and Norway spruce (*Picea abies*) forests. *Forestry* 2008, Volume 81, Issue 5, pp 645-661; DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpn038>.

HODGSON, M.; BRESNAHAN, P.; 2004. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 3: 331-339. JOCHEM, A.; HOLLAUS, M.; RUTZINGER, M.; HÖFLE, B.; 2011. Estimation of aboveground biomass in Alpine Forests: A semi-empirical approach considering canopy transparency derived from airborne LiDAR data. *Sensor* 2011, 11, pages 278-295; doi:10.3390/s110100278.

LATIFI, H.; HEURICH, M.; HARTIG, F.; MÜLLER, J.; KRZYTEK, P.; JEHL, H.; DECH, S.; 2016. Estimating over- and understorey canopy density of temperate mixed stands by airborne LiDAR data. *Forestry* 2016, Volume 89, Issue 1, pp 69-81; DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv032>.

LEVICK, S.R.; HESSENMÖLLER, D.; SCHULZE, E.D.; 2016. Scaling wood volume estimates from inventory plots to landscapes with airborne LiDAR in temperate deciduous forest. *Carbon Balance and Management* 2016, 11:7; doi: 10.1186/s13021-016-0048-7.

MARM (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO); 2011a. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y Marino. 49 p. Madrid.

MARM; 2011b. Cuarto Inventario Forestal Nacional. Galicia (A Coruña). Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente y Medio rural y Marino. 4 DVD-ROM. Madrid.

MARTINUZZI, S.; VIERLING, L.A.; GOULD, W.A.; FALKOWSKI, M.J.; EVANS, J.S.; HUDAK, A.T.; VIERLING, K.T.; 2009. Mapping snag and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. *Remote Sens. Environ.* 113: 2533-2546.

MICHEZ, A.; BAUWENS, S.; BONNET, S.; LEJEUNE, P.; 2016. Characterization of Forests with LiDAR Technology. En: BAGHDADI, N.; ZRIBI, M. (eds.): *Land Surface Remote Sensing in Agriculture and Forest Technology*. 331-362. ISTE Press-Elsevier. Amsterdam.

MONTESANO, P.M.; COOK, B.D.; SUN, G.; SIMARD, M.; NELSON, R.F.; RANSON, K.J.; ZHANG, Z.; LUTHCKE, S.; 2013. Achieving accuracy requirements for forest biomass mapping: A spaceborne data Fusion method for estimating forest biomass and LiDAR sampling error. *Remote Sens. Environ.* 130: 153-170.

MONTALVO RODRÍGUEZ, J.; FERNÁNDEZ ULLOA, A.; DURÁN AMORES, A.; LANAJA DEL BUSTO, J.M.; SÁNCHEZ JARDÓN, L.; ACOSTA GALLO, B.; MARTÍN FORES, I.; HERRERO DE JÁUREGUI, C.; 2013. Inventario exhaustivo de carbono en pinares de Coca (Segovia) mediante datos LiDAR. *6º Congreso Forestal Español, 10-14 de Junio de 2013, Vitoria-Gasteiz*. 13 p.

NINYEROLA, M.; PONS, X.; ROURE, J.M.; 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.

SU, J.; BORK, E.; 2006. Influence of Vegetation, Slope, and Lidar Sampling Angle on DEM Accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 11: 1265–1274.

UAB 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). Disponible en: <http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/mms/index.htm>

VALBUENA RABADÁN, M.A.; SANTAMARÍA PEÑA, J.; SANZ ADÁN, F.; 2016. Estimation of diameter and height of individual trees for *Pinus sylvestris* L. based on the individualizing of crowns using airborne LiDAR and the National Forest Inventory data. *Forest Systems* 2016, 25(1), e046, 11 pages; <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2016251-05790>.

VEGA HIDALGO, J.A.; PÉREZ-GOROSTIAGA RIVERO, P.; CUIÑAS OLMEDO, P.; FONTURBEL LLITERAS, M.T.; FERNÁNDEZ FILGUEIRA, M.C.; 2001. *Manual de queimas prescritas para matogueiras de Galicia*. Xunta de Galicia. 230 p.

VEGA HIDALGO, J.A.; ARELLANO PÉREZ, S.; RUIZ GONZÁLEZ, A.D.; ARELLANO MANCILLA, A.; 2013. Nuevos modelos de combustibles forestales de Galicia. *6º Congreso Forestal Español, Vitoria-Gasteiz, 10-14 de Junio de 2013*. 13 p.

VIERLING, K.T.; VIERLING, L.A.; GOULD, W.A.; MARTINUZZI, S.; CLAWGES, R.M.; 2008. Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. *Front. Ecol. Environ.* 6: 90-98.
WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKÝ, Z.; TURNER, D.; VOPENKA, P.; 2016. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of Airborne Laser Scanning and structure from Motion (SfM) point clouds. *Forests* 2016, 7, 62; doi:103390/f7030062.

WULDER, M.A.; WHITE, J.C.; NELSON, R.F.; NÆSSET, E.; ØRKA, H.O.; COOPS, N.C.; HILKER, T.; BATER, C.W.; GOBAKKEN, T.; 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, Volume 121, June 2012, Pages 196-2009. ISSN 0034-4257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>.

ZHAO, F.; GUO, Q.; KELLY, M.; 2012. Allometric equation choice impacts lidar-based forest biomass estimates: A case study from the Sierra National Forest, CA. *Agricultural and Forest Meteorology* 2012, Volume 165, Issue 15, pages 64-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.019>.