

Combinando datos LiDAR e inventario forestal para identificar estados avanzados de desarrollo en bosques caducifolios

E. Palop-Navarro¹, M. J. Bañuelos¹, M. Quevedo^{1,2}

(1) Unidad Mixta de Investigación en Biodiversidad (UO-PA-CSIC), Universidad de Oviedo, Mieres, España

(2) Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Universidad de Oviedo, 33006 Oviedo, España.

* Autor de correspondencia: E. Palop [eliapalop@gmail.com].

> Recibido el 02 de abril de 2016 - Aceptado el 17 de noviembre de 2016

Palop-Navarro, E., Bañuelos, M. J., Quevedo, M. 2016. Combinando datos LiDAR e inventario forestal para identificar estados avanzados de desarrollo en bosques caducifolios. *Ecosistemas* 25(3): 35-42. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-3.04

Los bosques viejos son particularmente escasos debido a la explotación histórica de los ecosistemas forestales. Su estructura – caracterizada por múltiples especies y edades de árboles, presencia de claros, y abundante madera muerta – es particularmente difícil de recuperar tras la homogeneización derivada de la explotación forestal. Además, de ella depende la conservación de especialistas forestales como insectos saproxílicos, pícidos, etc. Caracterizar e identificar esta estructura es por tanto importante en la conservación y restauración de este tipo de bosques y sus comunidades.

La estructura y composición de los bosques ha sido recogida históricamente en los inventarios forestales. Éstos aportan información valiosa, si bien de naturaleza discreta, y pueden ser menos eficientes en zonas de difícil acceso. A este respecto, la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) aporta información tridimensional y continua de la estructura forestal, constituyendo una herramienta útil para complementar los trabajos de campo de los inventarios.

En este estudio evaluamos la posibilidad de cuantificar estados sucesionales avanzados en bosques caducifolios del norte de la Península Ibérica a partir de datos LiDAR públicos (densidad 0.5 puntos m⁻²). Primero contrastamos las variables derivadas de los datos LiDAR con las derivadas del cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4), lo que mostró la existencia de correlaciones, sobre todo, en alturas máximas y medias, aunque el ajuste varía de forma considerable con el diámetro del inventario considerado. Posteriormente construimos modelos predictivos simples para la identificación de bosques viejos en parcelas del IFN4 (variable binaria Bosque Viejo). El modelo final lo conformaron las variables LiDAR *Altura desvest* y *Altura media*² (indicadoras de estructuras heterogéneas y árboles de tamaños diversos en las etapas más avanzadas del desarrollo), junto con la dominancia de diferentes especies arbóreas en las parcelas derivadas del IFN4. Los resultados muestran que los datos LiDAR públicos disponibles en España pueden identificar estructuras forestales relacionadas con bosques caducifolios maduros.

Palabras clave: Bosques maduros; conservación; estructura forestal; sucesión secundaria; teledetección.

Palop-Navarro, E., Bañuelos, M. J., Quevedo, M. 2016. Using LiDAR and forest inventory data to identify late development stages in broad-leaved forest. *Ecosistemas* 25(3): 35-42. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-3.04

Old-growth forests are generally scarce because of historic human exploitation of forest ecosystems. Their structure – characterized by trees of varying sizes and ages, presence of forest gaps and abundant deadwood – is particularly hard to recover after homogenization derived from forest exploitation. Moreover, the conservation of forest specialists, like saproxylic insects or woodpeckers, depends on this type of structure. Characterizing and identifying this structure is therefore important for conserving and restoring this type of forests and their communities.

Forest structure and composition has been historically recorded in forest inventories. These inventories provide valuable information, albeit of discrete nature, and may be less efficient in areas of difficult access. From this regard, LiDAR (Light Detection and Ranging) technology provides tridimensional and continuous information of forest structure, making it a useful tool for complementing field work of forest inventories.

In this study we evaluated the possibility of quantifying late successional stages in broad-leaved forests in the NW corner of the Iberian Peninsula from public LiDAR data (density 0.5 points m⁻²). First, we compared LiDAR-derived variables with field-derived variables from the 4th National Forest Inventory (IFN4), which showed the existence of correlations, especially at maximum and averaged heights, though the adjustment varies considerably with the diameter of the inventory considered. Later we built simple predictive models for the identification of old-growth forests in IFN4 plots (binary variable Bosque Viejo). The final model was built by variables namely *Altura desvest* and *Altura media*² (indicators of heterogeneous structures and size varying trees in late successional stages of development), together with dominance of different tree species in plots derived from the IFN4. Results show that publically available Spanish LiDAR data can be used to identify forest structures compatible with old-growth broadleaved forests.

Key words: Old-growth forests; conservation; forest structure; secondary succession; remote sensing.

Introducción

Los bosques constituyen el hábitat de numerosas especies y son clave en el balance de carbono, proporcionando, junto a otros, múltiples servicios ecosistémicos (e.g., [Luyssaert et al. 2008](#); [Gamfeldt et al. 2013](#)). Sin embargo, éstos son ecosistemas particularmente explotados ([Laurance 2010](#)). En Europa la gran mayoría de bosques nativos son, o fueron manejados, en el pasado, provocando cambios importantes en la estructura de sus comunidades forestales ([Parviainen et al. 2000](#)). En este sentido, los bosques europeos son principalmente bosques jóvenes, con escasa variación en la estructura de edades; a grandes rasgos, una tercera parte de la superficie forestal presenta características cualitativas compatibles con los llamados bosques “maduros” o “viejos” ([Forest Europe 2015](#)). Esos términos, aunque no proporcionan información cuantitativa y son a menudo subjetivos, hacen referencia implícita a una estructura forestal con múltiples especies y edades, presencia de árboles viejos, y abundante madera muerta. Esa estructura es esencial para la conservación de especialistas forestales ([Paillet et al. 2010](#)); también es particularmente sensible a determinadas prácticas de manejo ([Paillet et al. 2015](#)), y requiere un tiempo considerable para recuperarse tras la explotación forestal ([Burrascano et al. 2013](#)). Por tanto, estudiar y cuantificar esta estructura permitirá evaluar el estado de conservación de este tipo de bosques de manera más objetiva, así como el desarrollo de prácticas de gestión adecuadas.

La recogida de información sobre la estructura forestal ha dependido históricamente del trabajo de campo, de alcance limitado cuando se trata de estudiar zonas extensas y/o remotas ([Bergen y Dronova 2007](#)). En la actualidad, sensores y otros métodos intensivos de obtención de datos pueden complementar el trabajo de campo, aportando parámetros estructurales de los bosques a escala de paisaje (e.g., [Roberts et al. 2007](#)). Concretamente, los sistemas de teledetección activa LiDAR (Light Detection and Ranging) se basan en la emisión de pulsos láser para localizar superficies; los pulsos emitidos rebotarán al incidir en una superficie generando una señal de retorno, lo que permite calcular su distancia respecto al sensor. Un pulso de luz láser puede ser reflejado parcialmente por diferentes superficies (e.g., copa de los árboles, ramas inferiores, troncos, plantas del sotobosque, y suelo), proporcionando múltiples retornos; los retornos más cercanos al sensor y por lo tanto de mayor elevación serán clasificados como primeros retornos. Esta capacidad de la tecnología LiDAR de capturar la estructura tridimensional del bosque ([Lim et al. 2003](#)) la convierte en una herramienta muy útil para caracterizar la estructura forestal ([Zimble et al. 2003](#)), y estimar estados de desarrollo ([Falkowski et al. 2009](#)).

En este estudio evaluamos la capacidad de datos LiDAR para identificar estados sucesionales, usando el Inventario Forestal

Nacional ([Aragoneses et al. 2009](#)) como referencia. Específicamente, pretendemos identificar estructuras compatibles con la presencia de bosques caducifolios “viejos”. Seguimos para ello un planteamiento de cambios estructurales reconocibles en sucesión forestal secundaria ([Fig. 1; Frelich 2002](#)), compatibles además con los datos recogidos sobre fases de desarrollo en las parcelas del inventario. Así, tras una perturbación importante, esperamos encontrar parcelas abiertas, albergando las fases iniciales de reclutamiento de especies arbóreas. Posteriormente esperamos encontrar estados caracterizados por doseles arbóreos continuos y densos, formados mayoritariamente por individuos coetáneos, impidiendo el crecimiento de nuevos individuos en estratos inferiores. La mortalidad de individuos de edades similares y las perturbaciones menores abrirán huecos en el dosel, permitiendo el crecimiento de otros individuos y especies, y dando lugar a una estructura de transición con distribución de tamaños multimodal. En los bosques más viejos, esperaríamos una estructura particularmente heterogénea, con árboles de diversas edades y tamaños, con presencia de claros y abundante madera muerta.

Material y métodos

Llevamos a cabo este estudio en bosques templados oceánicos, caducifolios, dentro de espacios protegidos de la Cordillera Cantábrica ([Fig. 2](#)). La zona tiene una larga historia de uso humano ([Muñoz Sobrino et al. 1997; Tucker y Evans 1997](#)), y el paisaje actual es un mosaico forestal muy fragmentado ([García et al. 2005](#)), dominado por hayas (*Fagus sylvatica*), robles (*Quercus spp.*) y otras especies como abedules (*Betula pubescens*), castaños (*Castanea sativa*) y avellanos (*Corylus avellana*).

Datos de inventario forestal

Partimos de datos de campo recogidos entre 2009 y 2010 en Asturias, durante el cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4, [Aragoneses et al. 2009](#)). El IFN utiliza parcelas compuestas por cuatro subparcelas concéntricas de 5, 10, 15 y 25 metros de radio, en las que se registran, respectivamente, diámetros arbóreos mínimos de 7.5, 12.5, 22.5, y 42.5 cm ([Bravo et al. 2002](#)). Los datos del IFN incluyen información sobre la composición de la vegetación arbórea, la cobertura del dosel, y diferentes parámetros estructurales (e.g., altura, diámetro) para las especies arbóreas más abundantes. Incluyen además una clasificación de estados de desarrollo para cada una de las especies principales (desde “repoblado”, donde los árboles aparecen en el estrato herbáceo y/o arbustivo, pasando por “monte bravo” y “latizal”, donde los árboles presentan un dosel continuo y denso, hasta “fustal”, con presencia de árboles de más de 20 cm de diámetro).

El área de estudio incluye 477 parcelas con datos de campo, que cubren bastante bien las superficies forestales de los espacios

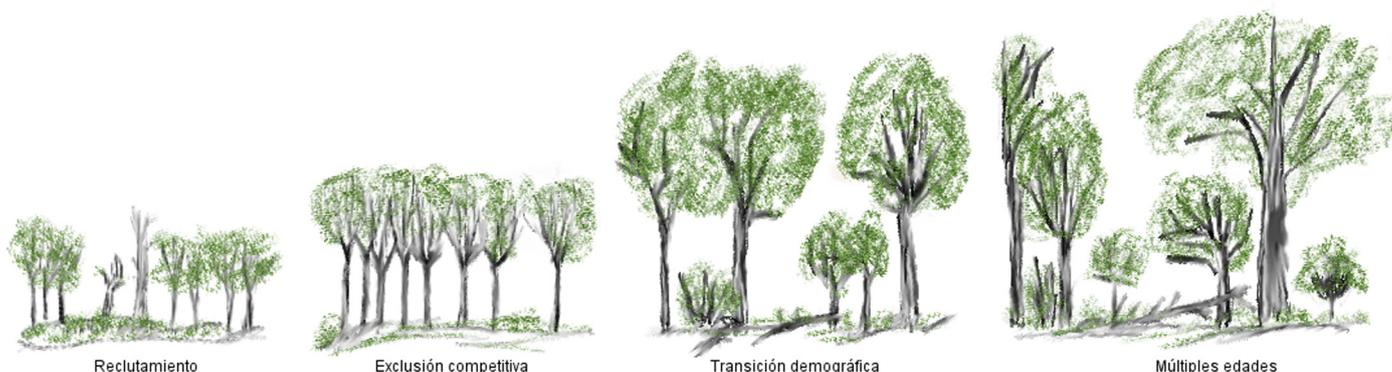


Figura 1. Esquema de transición de la estructura forestal tras la perturbación. De izquierda a derecha: fase inicial de reclutamiento, homogeneidad de edades y exclusión competitiva, transición demográfica, y estructura de múltiples edades (basado en [Frelich 2002](#)).

Figure 1. Scheme of transition in forest structure after disturbance. From left to right: initiation and recruitment, homogeneous age distribution and stem exclusion, demographic transition, and multiple-age structure (based on [Frelich 2002](#)).

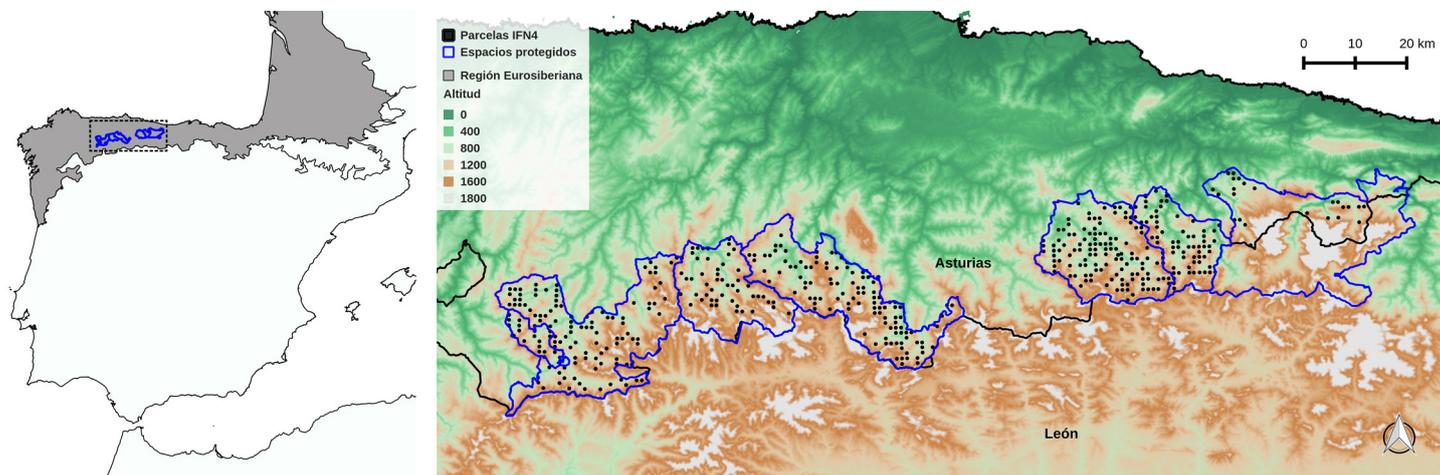


Figura 2. Área de estudio, localizada en la región Eurosiberiana (gris oscuro). La línea azul delimita espacios protegidos; de oeste a este, Muniellos, Fuentes del Narcea, Ibiás y Degaña, Somiedo, Ubiñas y La Mesa, Redes, Ponga, Picos de Europa.

Figure 2. Study area, located in the Eurosiberian region (dark gray). Blue line indicates protected areas; from west to east, Muniellos, Fuentes del Narcea, Ibiás y Degaña, Somiedo, Ubiñas y La Mesa, Redes, Ponga, Picos de Europa.

protegidos considerados (Fig. 2). Para identificar a priori las parcelas forestales en estados más avanzados, clasificamos cada parcela de forma binaria (*Bosque Viejo*, 0/1) teniendo en cuenta 1) que el estado de desarrollo de la especie dominante estuviese clasificado como fustal, y 2) la presencia de árboles con diámetros superiores a 50 cm de diámetro. Esa clasificación binaria sería equivalente a la de “fustal viejo” en la terminología de los inventarios forestales, pero no siempre queda recogida en ellos.

Datos LiDAR

Los datos LiDAR utilizados proceden del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA; <http://pnoa.ign.es/presentacion>), y en el área de estudio se tomaron en 2012. Los datos LiDAR disponibles cuentan con hasta 5 retornos, y están clasificados como puntos del suelo, vegetación baja, media o alta, y otras clases como edificaciones o ruido. Tienen una densidad de 0.5 puntos m^{-2} y una precisión altimétrica de 20 cm. De las 477 parcelas con información del IFN4 obtuvimos datos LiDAR para 475.

Utilizamos LAsTools (Isenburg 2014) para procesar la nube de puntos LiDAR y obtener los parámetros estructurales. Específicamente, la función *lasheight* permite calcular la altura de cada retorno con respecto al terreno, generando una red irregular de triángulos (TIN, por sus siglas en inglés) a partir de los retornos clasificados como suelo y calculando la distancia de cada retorno a la superficie creada. Posteriormente descartamos aquellos clasificados como edificaciones, ruido y solapados, y obtenemos para cada parcela de 25 metros de radio diversos parámetros de alturas y densidades a partir de los primeros retornos con la función *lascanopy* (Tabla 1). Para el cálculo de las variables de altura y de cobertura del dosel descartamos los retornos por debajo de 5 metros de altura. Paralelamente, a partir de la función *las2dem* construimos un modelo digital de vegetación (MDV), con celdas de 5 metros de lado, a partir de todos los primeros retornos, extrayendo el valor medio de rugosidad en cada parcela. Este valor vendría a representar el cambio espacial en las alturas totales de la parcela, no solo de la vegetación arbórea.

Análisis de datos

Construimos modelos (GLM con distribución binomial de errores) para identificar estructuras de estados avanzados en las parcelas del IFN4 (variable *Bosque Viejo*, 0/1) a partir de variables LiDAR. El cambio en la estructura forestal con el tiempo transcurrido desde perturbaciones importantes hace esperar cambios monotónicos en algunas de las variables (e.g., alturas máximas),

Tabla 1. Variables derivadas de los datos LiDAR para cada parcela de 25 metros de radio.

Table 1. LiDAR-derived variables for each 25-m radius plot.

Descripción	Variable LiDAR
Altura máxima de primeros retornos por encima de 5 metros de altura	Altura máxima
Altura media de primeros retornos por encima de 5 metros de altura	Altura media
Desviación estándar de la altura de primeros retornos por encima de 5 metros de altura	Altura desvest
Cobertura arbórea medida, como densidad de primeros retornos por encima de 5 metros	Cobertura
Permeabilidad del dosel arbóreo, medida como densidad de primeros retornos entre 0 – 1 metros de altura	Permeabilidad
Irregularidad del dosel, medido como la diferencia de altura de una celda respecto a las celdas vecinas a partir del modelo digital de vegetación (MDV)	Rugosidad

mientras que en otros casos esperaríamos máximos o mínimos en estados intermedios (e.g., cobertura del dosel). Por esa razón evaluamos también versiones cuadráticas de algunas variables.

Planteamos inicialmente modelos univariados, reteniendo aquellos con un nivel de significación < 0.05 , y ordenándolos por AIC creciente (Criterio de Información Akaike; Burnham et al. 2011). Posteriormente ajustamos modelos bivariados, seleccionando el de menor AIC. Ninguna combinación de tres variables LiDAR mejoró la parsimonia del mejor modelo bivariado. Para evitar posibles problemas de multicolinealidad, excluimos variables altamente correlacionadas usando el factor de inflación de la varianza ($VIF > 3$; Zuur et al. 2010). Para controlar la posible influencia en el modelo de especies arbóreas dominantes con distintas características de crecimiento, comprobamos 1) el comportamiento de los modelos en los subconjuntos de parcelas dominadas por hayas, robles (*Quercus petraea* y *Q. robur*) y otras especies, y 2) incluimos la variable categórica *especie3*, compuesta por los mismos niveles y obtenida de la composición de las parcelas del IFN4.

Usamos un remuestreo *bootstrap* de 1000 repeticiones para estimar el sesgo entre los coeficientes originales y los remuestreados (Guisan y Zimmermann 2000). Los valores del sesgo indican además la robustez del modelo, cuestionable en caso de sesgos importantes.

Utilizamos R en todos los análisis (R Development Core Team 2015). En el caso concreto del *bootstrap* usamos la librería *boot* (A. Canty y B. Ripley, 2015. *boot*: Bootstrap R (S-Plus) functions. R package version 1.3-17).

Resultados

De las parcelas estudiadas el 94% están clasificadas en el inventario forestal como bosque denso, y se dividen en masas homogéneas (42%) y masas heterogéneas (58%). Hayas (*Fagus sylvatica*) y robles (*Quercus spp.*) son las especies más abundantes (62% de las parcelas), mientras que abedules (*Betula pubescens*; registrada como *alba* en IFN4), castaños (*Castanea sativa*) y avellanos (*Corylus avellana*) constituyen casi equitativamente un 24%.

En general, las variables estructurales LiDAR e IFN4 muestran una correlación positiva (Apéndice 1), siendo especialmente estrecha entre las variables correspondientes a la altura máxima, y a la altura media de los árboles en la clase superior de diámetros del IFN4, 42.5 cm. En relación con el tamaño de la subparcela, el ajuste varía de forma considerable con el diámetro de inventario considerado. En cuanto a la composición arbórea, las correlaciones LiDAR – IFN4 fueron mejores en parcelas de composición homogénea, y en aquellas dominadas por *Quercus spp.*

La Tabla 2 muestra los modelos univariados con $p < 0.001$ para la variable *Bosque Viejo* a partir de las variables LiDAR, ordenados por AIC creciente. El mejor modelo para *Bosque Viejo* incluyó las variables *Altura desvest* y *Altura media*² (Likelihood Ratio Chi² = 151.6; $p < 0.0001$). No obstante, ese modelo no muestra ajustes equivalentes en subconjuntos de parcelas definidos por la especie dominante (Apéndice 2). Por ello, incluimos la categorización de especies dominantes en las parcelas, *especie3*, en el modelo final, pero no sus interacciones con *Altura desvest* ni *Altura media*² (Tabla 3; Likelihood Ratio Chi² = 248.2; $p < 0.0001$). Este modelo identifica la presencia de bosque viejo con una probabilidad similar en las parcelas dominadas por hayas y las dominadas por robles (Fig. 3), y en éstas con una probabilidad mayor que en parcelas dominadas por otras especies.

Los resultados del modelo final muestran una relación positiva entre las variables LiDAR y la presencia de estructuras de bosque viejo, tendencia que se mantiene en todos los subconjuntos de parcelas definidos por la especie dominante. Sin embargo, la variabilidad de alturas del dosel es únicamente significativa en

parcelas dominadas por hayas, siendo marginalmente significativa en el resto de parcelas, mientras que la altura media cuadrática es significativa en todas las parcelas salvo en las dominadas por robles.

Discusión

La conservación y gestión efectiva de los bosques requiere evaluar su estructura, una tarea especialmente compleja a escalas regionales o en zonas remotas. En este sentido, la tecnología LiDAR puede complementar los trabajos de campo de los inventarios forestales. Varios estudios han caracterizado la estructura del bosque y sus estados de desarrollo, principalmente en bosques de coníferas o mixtos (Zimble et al. 2003; Falkowski et al. 2009), o mediante la utilización de datos LiDAR de alta densidad (van Ewijk et al. 2011). En este estudio mostramos la capacidad de las variables LiDAR relacionadas con la altura media de los árboles y con la variabilidad de la misma, para identificar estructuras relacionadas con bosques viejos, a partir de los datos LiDAR públicos en España.

Para ello, planteamos un modelo predictivo simple que identifique la presencia de bosques viejos a partir de datos LiDAR. De las variables analizadas, las referidas a las alturas arbóreas *Altura desvest* y *Altura media*² conformaron el modelo final, que

Tabla 2. Coeficientes (\pm EE) de modelos univariados para caracterizar estructuras compatibles con fases avanzadas de desarrollo forestal (variable *Bosque Viejo*) a partir de variables LiDAR (GLM, distribución de errores binomial); $p < 0.0001$ en todos los casos.

Table 2. Coefficients (\pm EE) of univariate models to characterize structures consistent with late forest stages (variable *Bosque Viejo*) from LiDAR variables (GLM, binomial error distribution); $p < 0.0001$ in all instances.

Variable	Coeficiente	z	AIC
Altura media	0.39 \pm 0.04	9.70	492.24
Altura media ²	0.02 \pm 0.002	9.05	499.63
Altura máxima	0.23 \pm 0.02	9.48	502.51
Altura desvest	0.90 \pm 0.10	8.67	534.07
Rugosidad	0.41 \pm 0.05	7.97	558.81
Cobertura	0.03 \pm 0.003	7.67	576.09
Cobertura ²	0.0002 \pm 0.00003	7.48	578.98
Permeabilidad	-0.02 \pm 0.004	-5.79	606.6
Permeabilidad ²	-0.0002 \pm 0.00005	-5.01	614.76

Tabla 3. Modelo final para estructuras compatibles con fases avanzadas de desarrollo forestal (variable *Bosque Viejo*) a partir de datos LiDAR (GLM, distribución de errores binomial). El ajuste del modelo en la mitad superior de la tabla indica la desviación residual (RD), el porcentaje de desviación explicada (D²), y el Criterio de Información de Akaike (AIC). La mitad inferior de la tabla muestra los coeficientes y errores estándar (EE) originales y corregidos* (bootstrap; 1000 repeticiones) para las variables explicativas seleccionadas. El sesgo indica la diferencia entre los coeficientes estimados y los coeficientes corregidos.

Table 3. Final model for structures consistent with late forest stages (variable *Bosque Viejo*) from LiDAR data (GLM, binomial error distribution). The parameters of the model in the upper half indicate residual deviance (RD), percentage of explained deviance (D²), and Akaike Information Criterion (AIC). The lower half of the table shows original and corrected* coefficients and standard errors (bootstrap; 1000 replicates) for the explanatory variables. The bias indicates the difference between the estimate and the corrected coefficients.

Modelo	RD	D ²	AIC		
Modelo nulo	639				
Altura media ² + Altura desvest + especie3	391	38.8	400.8		
Parámetros	z	p	Coef. \pm EE	Coef. + EE *	Sesgo
(punto de corte)	-3.92	<0.0001	-1.78 \pm 0.46	-1.80 \pm 0.48	-0.0171
Altura media ²	3.98	<0.0001	0.009 \pm 0.002	0.009 \pm 0.002	0.0002
Altura desvest	3.33	0.0009	0.51 \pm 0.15	0.51 \pm 0.15	0.0005
especie3=otras	-8.37	<0.0001	-2.36 \pm 0.28	-2.39 \pm 0.28	-0.0244
especie3=quercus	0.31	0.7592	0.11 \pm 0.37	0.11 \pm 0.40	-0.0038

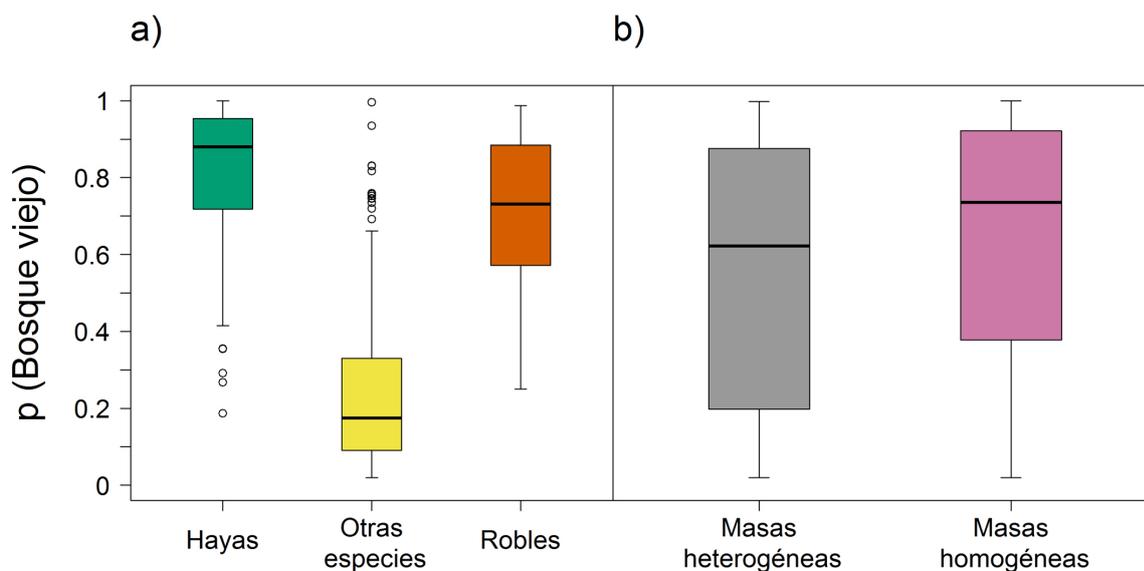


Figura 3. Diagrama de cajas del modelo final para Bosque Viejo en las parcelas del IFN4, en función (a) de la especie principal y (b) de la composición específica. Las líneas horizontales representan la mediana, las cajas cubren el rango entre los percentiles 25% y 75%, y los bigotes los valores máximo y mínimo de cada grupo.

Figure 3. Boxplot of the final model of Bosque Viejo (Old Forest) in IFN4 plots, as function of (a) the dominant species, and (b) and its specific composition. Horizontal lines represent median values, box limits span the 25th and the 75th percentiles, and whiskers the minimum and maximum values within each group.

considera, además, la especie dominante en la parcela. Este modelo es consistente con lo esperable en sucesión forestal secundaria: presencia de estructuras particularmente heterogéneas con árboles de edades y tamaños diversos en las etapas más avanzadas del desarrollo (Frelich 2002; Fig. 1). De manera adicional, las relaciones univariadas aportaron observaciones interesantes: las parcelas clasificadas como bosques viejos a partir del IFN4 están relacionadas con las variables de altura derivadas de los datos LIDAR, en concreto con una mayor altura arbórea y una mayor varianza de la misma. Por otro lado, destacamos la existencia de relaciones cuadráticas con la cobertura arbórea y con la permeabilidad, aunque de signo opuesto (Tabla 2), indicando respectivamente máximos y mínimos en estados intermedios de desarrollo del bosque. En cuanto a la rugosidad, las parcelas con características de bosque viejo en el IFN4 están relacionadas con superficies LiDAR más rugosas, es decir, con mayor irregularidad en el dosel arbóreo, posiblemente indicadores de presencia de claros en la estructura forestal.

Los resultados del modelo no mostraron diferencias notables entre parcelas del IFN4 de composición homogénea y heterogénea. En ambos casos los valores centrales fueron similares, sugiriendo prevalencia de estados intermedios-avanzados de desarrollo del bosque, si bien el rango de valores del modelo fue amplio en ambos casos (Fig. 3). En cuanto a las diferencias entre parcelas según la especie dominante, comprobamos que en las parcelas dominadas por hayas, la interpretación es similar al modelo general: los datos LiDAR identifican como estados intermedios aquellas con mayores alturas promedio (Apéndice 2) y como estados avanzados las que presentan mayores variaciones en altura. En las parcelas dominadas por robles, la relación con $Altura\ media^2$ no es significativa, lo que podría indicar una relación monótona entre el estado de desarrollo y las alturas, debida a que en estos bosques aún no se hayan recuperado los estadios más avanzados. Por último, en las parcelas dominadas por otras

especies, los bosques viejos aparecen relacionados únicamente con la altura cuadrática. Los avellanos con múltiples pies, los castaños trasmochos por acción humana, y los abedules en el límite altitudinal del bosque, principales especies de estas parcelas, nunca alcanzan alturas promedio tan altas como robles y hayas, por lo que la variación potencial en alturas también es menor.

A la hora de interpretar los resultados ayudaría contar con información histórica del uso de las parcelas. Si bien ese tipo de información es escasa, en nuestra zona de estudio existe al menos para la actual Reserva Integral de Muniellos. El bosque de Muniellos se explotó intermitentemente hasta finales de los años sesenta del siglo XX, con especial énfasis en la madera de roble. Esa información histórica ayuda sobre todo a entender los valores más altos (> 0.90) del modelo *Bosque Viejo*, encontrados en parcelas del IFN4 alejadas de los asentamientos de la explotación maderera industrial, y de las vías de saca (e.g., parcelas 1747 o 1752 del IFN4; Apéndice 3). Esas parcelas presentan además estructuras compatibles con sendas descripciones de 1940 y 1955, que identificaban la estructura forestal como “natural”, “virgen” o “clímax”, destacando además la presencia de clases diamétricas entre 0.40 y 0.80 m (Torrente 1996). Por otro lado, encontramos valores intermedios y bajos en parcelas localizadas en zonas donde tuvieron lugar las últimas cortas documentadas (e.g., parcela 1741; Torrente 1996), así como en zonas especialmente accesibles por carretera (parcela 1736; López 2014).

En general, aunque mostramos la posibilidad de combinar LiDAR e IFN4 de forma efectiva, el diseño del trabajo de campo del IFN4 en parcelas de radio variable puede estar limitando los ajustes de los modelos. Un ejemplo puede ser la relación entre alturas medias LiDAR e IFN4 (Apéndice 1): la *Altura media* LiDAR presenta un mejor ajuste con la altura media de los pies de diámetro mayor de 42.5 cm, inventariados en un radio de 25 m, que con la *Altura media* del conjunto de árboles de la parcela. Esto

puede ser debido en parte a que los diámetros menores solo son inventariados en las subparcelas más pequeñas, y por tanto no disponemos de información sobre todos ellos. En este sentido, futuros trabajos de inventario podrían orientar el muestreo a recoger la mayor cantidad de datos posible de todos los árboles presentes en la parcela, así como la cobertura de matorral y una estima de la madera muerta en el suelo. Además, el rápido desarrollo de la tecnología LiDAR y su disponibilidad plantea la posibilidad futura de utilización de datos LiDAR de mayor densidad, lo que podría suponer una mejora notable en la capacidad de modelar estructura forestal. Además, el aumento de información derivada de este tipo de inventarios posibilitaría el estudio, a escala regional, de parámetros estructurales específicos estrechamente relacionados con especies indicadoras como los escarabajos saproxilicos u otros especialistas forestales, y llevar a cabo planes de gestión que mantengan o restauren la estructura necesaria.

La validación y calibración de datos LiDAR con el trabajo de campo de los inventarios forestales permite dar un salto cualitativo de la información discreta de las parcelas a información espacialmente continua a través de modelos predictivos de estructura forestal. Esos modelos podrían facilitar la evaluación del estado de conservación de ecosistemas forestales, y ayudar en la toma de decisiones. Por ejemplo, en el caso de espacios protegidos permitiría identificar áreas candidatas para restauración ecológica, así como evaluar la eficacia de las actuaciones de restauración aplicadas.

Agradecimientos

Agradecemos al Principado de Asturias la financiación de la beca predoctoral de Elia Palop Navarro (BP11-101) dentro del Programa Severo Ochoa de ayudas predoctorales para la formación en investigación y docencia.

Referencias

- Aragoneses Domínguez, C., Gil Gutiérrez, J.A., González de Zulueta, E., Jiménez Montalvo, A.J., Sandoval Altelarrea, V., Vallejo Bombín, R. 2009. Cuarto inventario forestal nacional, mismos objetivos, nuevos retos. *V Congreso Forestal Español*, Ávila, España. (<http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/articulo/view/8160/8083>)
- Bergen, K.M., Dronova, I. 2007. Observing succession on aspen-dominated landscapes using a remote sensing-ecosystem approach. *Landscape Ecology* 22:1395-1410.
- Bravo, F., del Río, M., Pando, V., San Martín, R., Montero, G., Ordoñez, C., Cañellas, I. 2002. El diseño de las parcelas del Inventario Forestal Nacional y la estimación de variables dasométricas. Bravo, F., del Río, M., del Peso, C. (eds.), *El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la Gestión Forestal Sostenible*, pp 19- 35. Fundación General de Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., Huyvaert, K.P. 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65(1):23-35.
- Burrascano, S., Keeton, W.S., Sabatini, F.M., Blasi, C. 2013. Commonality and variability in the structural attributes of moist temperate old-growth forests: a global review. *Forest Ecology and Management* 291:458-479.
- Falkowski, M.J., Evans, J.S., Martinuzzi, S., Gessler, P.E., Hudak, A.T. 2009. Characterizing forest succession with lidar data: An evaluation for Inland Northwest, USA. *Remote Sensing of Environment* 113: 946-956.
- Forest Europe. 2015. *State of Europe's Forests 2015*. FOREST EUROPE Liaison Unit, Madrid, España.
- Frelich, L.E. 2002. *Forest dynamics and disturbance regimes: studies from temperate evergreen-deciduous forests*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- García, D., Quevedo, M., Obeso, J.R., Abajo, A. 2005. Fragmentation patterns and protection of montane forest in the Cantabrian range (NW Spain). *Forest Ecology and Management* 208:29-43.
- Gamfeldt, L., Snäll, T., Bagchi, R., Jonsson, M., Gustafsson, L., Kjellander, P., et al. 2013. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications* 4:1340.
- Guisan, A., Zimmermann, N.E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135:147-186.
- Isenburg, M. 2014. *LAStools – efficient LiDAR processing software*. (v. 151009, *unlicensed*). Gilching: rapidlasso GmbH. Disponible en: <http://rapidlasso.com/LAStools>.
- Laurance, W.F. 2010. Habitat destruction: death by a thousand cuts. Sodhi, N.S., Ehrlich, P.R. (eds.). *Conservation Biology for All*, pp 73-87. Oxford University Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B., Flood, M. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27(1):88-106.
- López, J. 2014. *La explotación de madera en el monte de Muniellos (Asturias) 1766-1973*. 2ª edn. Grupo de Desarrollo Rural Alto Narcea Muniellos, Cangas del Narcea, España.
- Luyssaert, S., Schulze, E.-D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., et al. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455:213-215.
- Muñoz Sobrino, C., Ramil-Rego, P., Rodríguez Guitián, M. 1997. Upland vegetation in the north-west Iberian Peninsula after the last glaciation: Forest history and deforestation dynamics. *Vegetation History and Archaeobotany* 6:215-233.
- Paillet, Y., Bergès, L., Hjalten, J., Odor, P., Avon, C., Bernhardt-Romermann, M., et al. 2010. Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation Biology* 24(1):101-112.
- Paillet, Y., Pernot, C., Boulanger, V., Debaive, N., Fuhr, M., Gilg, O., Gosselin, F. 2015. Quantifying the recovery of old-growth attributes in forest reserves: A first reference for France. *Forest Ecology and Management* 346:51-64.
- Parviainen, J., Bücking, W., Vanderkerkhove, K., Schuck, A., Päivinen, R. 2000. Strict forest reserves in Europe: efforts to enhance biodiversity and research on forests left for free development in Europe (EU-COST-Action E4). *Forestry* 73(2):107-118.
- R Development Core Team 2015. *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en: <http://www.r-project.org/>.
- Roberts, J.W., Tesfamichael, S., Gebreslasie, M., Van Aardt, J., Ahmed, F.B. 2007. Forest structural assessment using remote sensing technologies: an overview of the current state of the art. *Southern Hemisphere Forestry Journal* 69(3):183-203.
- Torrente, J.P. 1996. Breve historia de la Reserva Integral de Muniellos. Fernández Prieto, J., Bueno Sánchez, A. (eds.), *La Reserva Integral de Muniellos: flora y vegetación*. Principado de Asturias, Consejería de Agricultura, Oviedo, España.
- Tucker, G.E., Evans, M.I. 1997. *Habitats for birds in Europe – a conservation strategy for the wider environment*. Vol 6. BirdLife International, Cambridge, Reino Unido.
- van Ewijk, K.Y., Treitz, P.M., Scott, N.A. 2011. Characterizing Forest Succession in Central Ontario using LiDAR derived Indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 77(3):261-269
- Zimble, D.A., Evans, D.L., Carlson, G.C., Parker, R.C., Grado, S.C., Gerard, P.D. 2003. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 87:171-182.
- Zuur, A.F., Ieno, E.N., Elphick, C.S. 2010. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution* 1:3-14.

Apéndices

Apéndice 1. Correlaciones significativas (Kendall; $\alpha = 0.01$) entre variables LiDAR e IFN4 en función de la composición homogénea o heterogénea, y de la especie dominante en las parcelas de 25 m de radio.

Appendix 1. Significant correlations (Kendall; $\alpha = 0.01$) between LiDAR and IFN4 variables depending on stand type (homogeneous or heterogeneous), and dominant species in 25-m radius plots.

LiDAR	IFN4	Total (n = 475)	Homogéneas (n = 199)	Heterogéneas (n = 276)	Fagus (n = 225)	Quercus (n = 68)	Otras (n = 182)
Altura máxima	A. máxima (todos los diámetros)	0.49	0.55	0.46	0.46	0.57	0.43
Altura media	A. media (todos los diámetros)	0.39	0.51	0.28	0.31	0.35	0.38
Altura media	A. media D \geq 42.5 cm	0.53	0.60	0.48	0.53	0.60	0.41
Altura media	A. media 22.5 \leq D \leq 42.5 cm	0.49	0.58	0.43	0.42	0.59	0.52
Altura media	A. media 12.5 \leq D \leq 22.5 cm	0.33	0.37	0.28	0.23	0.45	0.45
Altura desvest	Altura desvest (todos los diámetros)	0.25	0.28	0.25	0.25	0.23	0.20
Cobertura	Fracción cabida cubierta arbórea	0.55	0.61	0.49	0.51	0.67	0.48
Permeabilidad	Fracción cabida cubierta no arbórea (FCC Total – FCC Arbórea)	0.50	0.57	0.44	0.49	0.56	0.41

Apéndice 2. Modelos para estructuras compatibles con fases avanzadas de desarrollo forestal (variable Bosque Viejo) a partir de datos LiDAR (GLM, distribución de errores binomial) desglosados en función de la especie dominante. El ajuste de los modelos muestran los coeficientes y errores estándar originales, y el Criterio de Información de Akaike (AIC).

Appendix 2. Models built for forest structures consistent with late stages of development (variable Bosque Viejo) from LiDAR data (GLM, binomial error distribution) and disaggregated depending on dominant species. The adjustment of the models show original coefficients and standard errors, and the Akaike Information Criterion (AIC).

Parcelas dominadas por hayas				
Parámetros	z	p	Coef. \pm EE	AIC
(punto de corte)	-3.21	0.00132	-2.51 \pm 0.78	162.4
Altura media ²	2.84	0.004	0.01 \pm 0.004	
Altura desvest	2.38	0.017	0.66 \pm 0.28	
Parcelas dominadas por robles				
Parámetros	z	p	Coef. \pm EE	AIC
(punto de corte)	-1.70	0.0882	-1.55 \pm 0.91	75.3
Altura media ²	0.46	0.6433	0.002 \pm 0.004	
Altura desvest	1.92	0.0549	0.75 \pm 0.39	
Parcelas dominadas por otras otras especies				
Parámetros	z	p	Coef. \pm EE	AIC
(punto de corte)	-5.85	< 0.0001	-3.76 \pm 0.64	167.3
Altura media ²	2.96	0.00311	0.01 \pm 0.003	
Altura desvest	1.65	0.09807	0.36 \pm 0.22	

Apéndice 3. Variables del modelo final para Bosque Viejo en parcelas del IFN4 localizadas dentro de la Reserva Integral de Muniellos. Las parcelas mencionadas están situadas en zonas identificables en relatos de la explotación histórica del bosque. Las coordenadas UTM de las parcelas corresponden al sistema de referencia ETRS89, 29N (EPSG 25829).

Appendix 3. Variables of the final model of Bosque Viejo (Old Forest) in IFN4 plots located within the Integral Reserve of Muniellos. The plots below are located in areas that could be identified in historical accounts of forest exploitation. UTM coordinates for the plots correspond to reference system ETRS89, 29N (EPSG 25829).

Parcela IFN4	probabilidad (Bosque viejo)	Altura media del dosel	Altura media cuadrática del dosel	Variabilidad de alturas del dosel	Especie arbórea dominante	UTM X	UTM Y
1736	0.2469	12.33	152.03	3.22	Otras (abedules)	683871	4766800
1741	0.7459	15.68	245.86	5.83	Otras (avellanos)	686852	4765782
1747	0.9959	19.70	388.09	7.34	Hayas	687841	4765803
1752	0.9614	15.91	253.13	5.05	Robles	687863	4763798