# Estimación y cartografía de parámetros ecológicos y forestales en tres especies (Quercus ilex L. subsp ilex, Fagus sylvatica L. y Pinus halepensis L.) con datos LiDAR Estimation and mapping forest and ecological parameters for three tree species (Quercus ilex L. subsp. ilex, Fagus sylvatica L. and Pinus halepensis L.) with LIDAR data

V. Zaldo<sup>1</sup>, G. Moré<sup>2</sup> y X. Pons<sup>1,2</sup> victor.zaldo@uab.es

<sup>1</sup> Dep. de Geografía. Edifici B. Universitat Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra <sup>2</sup> Centre de Recerca Ecològica y Aplicacions Forestals (CREAF). Edifici C. Univ. Autònoma de Barcelona. 08193 Bellaterra

Recibido el 22 de marzo de 2010, aceptado el 24 de agosto de 2010

#### RESUMEN

Se ha estudiado la idoneidad de los datos Li-DAR (Light Detection And Ranging) para estimar parámetros ecológicos y forestales para tres especies (encina, haya y pino) dentro de una zona de Cataluña. Se muestrearon un total de 50 parcelas de las cuales 14 eran para encinas, 18 para hayas y 18 para pinares. Los pulsos LiDAR se modelizaron mediante estadísticos (percentiles, mediana, media, desviación estándar y coeficiente de penetración), que sirvieron como variables independientes en los modelos de regresión. El tratamiento realizado mostró buen ajuste a nivel de parcela, pero la densidad de datos LiDAR es insuficiente para la obtención de modelos a nivel árbol. Además, los resultados sugieren el uso de modelos generales, ya que las diferencias entre las tres especies forestales no fueron significativas. Los parámetros forestales que mejor se consiguieron estimar fueron la altura ( $R^2 = 0.923$ ), la biomasa de madera  $(R^2 = 0.815)$  y el volumen de copa  $(R^2 = 0.758)$ . Finalmente se generaron modelos digitales para estos tres parámetros. Los resultados fueron satisfactorios y sugieren el uso operativo de los datos LiDAR para la generación de cartografía forestal.

### ABSTRACT

The suitability of LiDAR data to estimate ecological forest parameters for three species (holm oak, beech and pine) has been studied in an area of Catalonia. A total of 50 plots were sampled, 14 were for oaks, 18 for beechs and 18 for pines. LiDAR pulses were modeled by statistical (percentile, median, mean, standard deviation and coefficient of penetration), which were used as independent variables in regression models. This treatment yields good agreement at plot level, but the density of LiDAR data was insufficient to obtain good adjustment at tree level. Furthermore, the results suggest the use of general models, since differences among the three forest species were not significant. The best forest parameters were the height ( $R^2 = 0.923$ ), wood biomass ( $R^2 = 0.815$ ) and crown volume ( $R^2 = 0.815$ ). Digital models for ecological forest parameters were generated. The results were satisfactory and provide new reasons for the generation of forest maps with LiDAR data.

PALABRAS CLAVE: LiDAR, parámetros ecológicos, cartografía forestal, altura, biomasa, volumen de copa.

# **INTRODUCIÓN Y OBJETIVOS**

El estudio de los bosques es de gran importancia para el conocimiento de las potencialidades forestales del territorio. Cataluña cuenta con 1.2 millones de hectáreas de bosques, lo cual representa un 38% de su superficie total (Burriel et al., 2000-2004). Se hace, pues, patente la necesidad de contar con información precisa del estado de los montes y de conocer los parámetros ecológicos y forestales que los caracterizan. La estimación de estos parámetros permite obtener cartografía forestal de tipo cuantitativo que es importante para modelar la biomasa y el carbono fijado en los ecosistemas forestales. A su vez, también sirve como entrada para la elaboración de modelos de incendio (Riaño et al., 2003) y de modelos predictivos de la distribución de especies (Rodríguez et al., 2007). A lo largo de décadas, las instituciones y los centros de investigación han ido realizando inventarios forestales para obtener información de estos parámetros ecológicos y forestales, pero estos estudios implican métodos bastante costosos en términos de tiempo y dinero. Esto ha llevado a explorar otras metodologías más rápidas y menos costosas, como el uso de sistemas de teledetección. Así, se han realizado estudios intentando estimar parámetros forestales, mediante el uso de imágenes de satélite (Anderson et al., 1993; Salvador & Pons, 1998; Vázquez de la Cueva, 2008) o de imágenes de sensores aeroportados (Salvador et al., 1997; Baulies & Pons, 1995). En varios de estos casos los ajustes de los modelos no permitieron generar predicciones cuantitativas. Actualmente con la tecnología Li-DAR (*Light Detection And Ranging*) se puede empezar a captar para luego representar de manera cada vez más precisa la estructura tridimensional (x, y, z) de un bosque. El LiDAR incorpora un láser pulsado de alta potencia como fuente de radiación electromagnética y detecta los pulsos reflejados. La distancia se determina como el tiempo de retardo de cada uno de los retornos con respecto al pulso inicial (Wehr & Lohr, 1999). De esta manera la tecnología LiKEY WORDS: LiDAR, ecological parameters, forest mapping, height, biomass, crown volume.

DAR ofrece la novedosa posibilidad de obtener información detallada de la estructura vertical de las cubiertas forestales. Los estudios LiDAR se han aplicado en bosques tropicales (Nelson et al., 1997), bosques de taiga (Naesset, 1997) y bosques caducifolios del norte de Europa (Hill & Thomson, 2005); sin embargo son escasos en bosques mediterráneos caracterizados por su alta complejidad (Maselli & Chiesi, 2006; García et al., 2010). El objetivo principal de este estudio es determinar la aplicación de los datos Li-DAR para la estimación de variables forestales (altura, altura de la base de la copa, volumen de copa, DBH (Diameter at Breast Height), biomasa de madera y biomasa de hojas) en encinares, hayedos y pinares para una zona de Cataluña y generar cartografía cuantitativa de estas variables. Para ello se analizará la idoneidad de la metodología de trabajo tanto a nivel de árbol como de parcela, se evaluará la importancia de la separación por especies en los modelos de regresión y se determinara el mejor estimador LiDAR para cada variable a través del coeficiente de determinación ( $\mathbb{R}^2$ ).

# MATERIAL Y MÉTODOS

## Área de estudio

La zona de estudio se sitúa sobre una zona de Cataluña (long: 2° 20' lat: 41° 46') que discurre por el Parque Natural de Sant Llorenç del Munt i l'Obac y el Parque Natural del Montseny (Fig. 1). El vuelo LiDAR tiene una longitud de unos 65 km y una anchura de 1 km. La altura media del terreno de estudio es de 617 m, variando entre 232 y 1.527 m. El área de estudio presenta una gran diversidad de especies vegetales, siendo relevantes los extensos pinares de pino carrasco (Pinus halepensis L.). También pueden encontrarse encinares (Quercus ilex L. subsp ilex) y alcornocales (Quercus suber L.). Además, en las zonas más elevadas hay gran presencia de hayedos (Fagus sylvatica L.) y castañares (Castanea sativa Mill.). En este estudio nos centraremos en



Figura 1. Localización del vuelo LiDAR en Cataluña.

la obtención de variables para las tres especies forestales más abundantes *Pinus halepensis*, *Quercus ilex subsp ilex* y *Fagus sylvatica*.

#### Datos de campo

Coincidente en el tiempo con la obtención de los datos LiDAR se realizó una campaña de toma de datos de campo para obtener parámetros dasométricos en la zona de trabajo. El muestro que se realizó entre los meses de octubre y diciembre del 2007, fue diseñado especialmente para este trabajo y llevado a cabo por personal técnico del CREAF (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals). Los datos obtenidos consistieron en un muestreo discreto en el espacio basado en parcelas circulares con un radio entre 10-15 m para los hayedos y entre 8-10 m para los pinares y encinares. Las diferencias en el tamaño de las parcelas se deben a las diferencias en la densidad de pies de las distintas especies: para tener un número representativo de árboles por parcela, en los hayedos se tuvieron que usar radios mayores que en los pinares y encinares. Se obtuvieron medidas ecológicas y forestales de todos lo árboles que se encontraban dentro de cada parcela. Así, se consiguió información para un total de 6.197 árboles en 50 parcelas repartidas por las diferentes áreas de muestreo (3.518 individuos de Fagus sylvatica en 18 parcelas, 1.022 individuos de Pinus halepensis en 18 parcelas y 1.657 individuos de Quercus ilex en 14 parcelas). Se realizó una

localización de cada árbol gracias al uso distanciómetros digitales y a su ubicación sobre ortofotografías 1:5.000 e imágenes CASI. De esta manera se consiguió una georeferenciación fina de los árboles muestreados para conseguir minimizar la propagación de errores que se produce debido a la indeterminación de la posición de cada árbol y se evito la localización mediante el uso del GPS ya que bajo dosel forestal este sistema tienden a producir errores 1,5 a 3 veces mayores de lo normal (Popescu et al., 2003). Las parcelas se seleccionaron previamente a través de ortofotomapas 1:5.000 y una imagen CASI en zonas aparentemente puras cerca de caminos. La georeferenciación de los árboles se conseguía ubicando una referencia en los ortofotomapas 1:5.000 y luego usando un distanciómetro. Se tomaron medidas estructurales a nivel de árbol y éstas se extrapolaron a nivel de parcela (Tabla 1). Las medidas de altura, altura de la base y DBH se calcularon directamente en el campo. Las medidas de biomasa de madera y biomasa de hojas se obtuvieron a partir de ecuaciones alométricas diseñadas especialmente para este estudio usando muestras de campo de hojas y ramas en parcelas cercanas pero distintas a las parcelas donde se realizaron las otras medidas de inventario (Gracia et al., 2004). Los informes de las ecuaciones alometricas fueron altamente significativos para las tres especies (F. sylvatica r<sup>2</sup>: 0,992, p < 0,0001; *P.halepensis* r<sup>2</sup>: 0,986, p < 0.0001 y Q. ilex r<sup>2</sup>: 0.952, p < 0.0001). Para el volumen de copa, se usó una aproximación de estudios anteriores (Riaño et al., 2004). Esta aproximación, requiere del cálculo de la superficie de la copa, que en este caso se calculó a través de las medidas de campo del radio de la copa en los cuatro puntos cardinales.

#### **Datos LiDAR**

El área de estudio fue sobrevolada el 20/10/2007 utilizando un equipo LiDAR de la firma Optech modelo ALTM3025 propiedad del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC). Se sobrevolaron un total de 6.694 ha; la altura media de vuelo fue de 1.494 m sobre el nivel del mar, con un ángulo máximo de escaneo de  $\pm 20^\circ$ , una frecuencia de barrido de 200 Hz, un *swath* de 580 m, una densidad de puntos de aproximadamente

Danématua favostal		Árbol	Parcela					
Parametro lorestal	Unidad	Método	Unidad	Método				
Altura	m	Campo (Distanciómetro)	m	Media de los 10 árboles más altos				
Altura base de la copa	m	Campo (Distanciómetro)	m	Media				
Volumen de copa	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	(Riaño et al., 2004)	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	Sumatorio				
DBH	cm	Campo	cm	Sumatorio				
Biomasa de madera	kg	Ecuaciones alométricas	T/Ha	Ecuaciones alométricas				
Biomasa de hojas	kg	Ecuaciones alométricas	T/Ha	Ecuaciones alométricas				

Tabla 1. Parámetros forestales a nivel de árbol y de parcela.

 $0.5 \text{ puntos/m}^2 \text{ y}$  dos retornos registrados por cada pulso emitido. Se realizaron tres pasadas, con solape. Los datos LiDAR utilizados incluyen las coordenadas (x, y, z) en proyección UTM, huso 31N, en el sistema ED50 de dos retornos, así como la intensidad de cada retorno. El valor del *Root Mean Square Error* (RMSE) para el ajuste de los puntos láser obtenidos por el ICC fue de 0,033 m. Para todas las consideraciones altimétricas se usó el Modelo Digital de Terreno (MDT) derivado de los datos LiDAR a 2 m de resolución.

#### **Resolución espacial**

A fin de determinar cual es la resolución espacial óptima para la obtención de modelos forestales a partir de un LiDAR con densidad de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, se establecieron dos niveles de estudio: el árbol y la parcela. El árbol correspondía al individuo que se había medido en campo y la parcela a la parcela seleccionada que englobaba a todos los individuos. Se generaron dos bases vectoriales de polígonos; una para cada una de las copas de los árboles y otra para las parcelas que englobaban a dichos árboles. El proceso de creación de la base vectorial de las copas de los árboles se realizó a partir de las medidas de campo de la posición central del árbol y del radio de capa copa en los cuatro puntos cardinales y cuatro puntos más que se calcularon suponiendo un polígono octogonal para las copas de los árboles. La base vectorial de las parcelas se obtuvo a través de aplicar un buffer al punto central de la parcela con su radio correspondiente.

#### Análisis estadístico de los datos LiDAR

De los datos LiDAR, que contenían más de 84 millones de registros, se seleccionaron únicamente los datos LiDAR para los árboles y las parcelas de las cuales se tenían datos de campo. Para ello se usó la cartografía vectorial generada a partir de los datos de campo de las copas de los árboles y de las parcelas muestreadas, para así poder extraer los puntos LiDAR correspondientes a cada nivel de estudio: el árbol y la parcela (Fig. 2). La extracción de puntos del fichero original en formato LAS i los procesos posteriores se realizó con el software MiraMon (Pons, 2010).



**Figura 2.** Polígonos de las copas de los árboles (color) de las parcelas (fondo en negro) y puntos LiDAR.

Se utilizaron todos los pulsos del vuelo Li-DAR, tanto el primer pulso como el segundo, ya que los parámetros forestales de árboles que se encontraban en el dosel inferior, podían estar explicados por la información presente en este segundo pulso. Para obtener la altura sobre el terreno (Altura LiDAR), se realizó una resta de la z LiDAR menos la z del MDT. El MDT fue generado por el ICC con los mismos datos del vuelo LiDAR y a partir de la selección de los puntos pertenecientes al suelo mediante un algoritmo de clasificación (Axelsson, 1999) y la posterior interpolación de dichos puntos. Una vez obtenidos los datos LiDAR para los árboles correspondientes a las medidas de campo, se realizó un análisis exploratorio de los datos LiDAR para poder determinar tendencias y tipos de distribución. Se realizaron histogramas con la Altura LiDAR por especie. Los histogramas fueron ajustados mediante funciones de densidad (Figs. 3 y 4). El perfil altimétrico de densidad indica cuántos puntos de retorno hay en cada rango de altitudes. En los pinares se ha obtenido mayor penetración del Li-DAR que en los encinares y en los hayedos. Los bosques de Pinus halepensis se suelen encontrar sobre suelos poco evolucionados en ambientes áridos, lo que determina unas formaciones abiertas y, en consecuencia, gran parte de los puntos LiDAR en estos bosques corresponden al suelo. Se detectó que por debajo de 5 m de altura, en los hayedos no hay rebotes de los pulsos LiDAR, lo que se relaciona con la escasa presencia de sotobosque en estas formaciones debido la estructu-



Figura 3. Funciones de densidad del retorno LiDAR por árbol.



Figura 4. Funciones de densidad del retorno LiDAR por parcela.

ra de copas y hojas de los hayedos, que aprovechan al máximo la radiación incidente limitando así la presencia de luz en el sotobosque. Por su parte los encinares se representan como bosques densos donde la frecuencia de rebotes LiDAR es alta pero con individuos bajos.

Los datos de Altura LiDAR sin procesar no se ajustaron a ningún modelo de distribución estadística conocido. Por lo tanto se optó por usar estadísticos no paramétricos (mediana y percentiles), aunque también se calcularon algunos estadísticos paramétricos (media y desviación estándar) al igual que realizan en otros estudios (Nelson et al., 1997; Ziegler et al., 2000). Se parametrizó la nube de puntos LiDAR, para así crear diferentes variables, que explicasen mejor las características forestales. Las variables LiDAR que se generaron fueron: Altura máxima (Máximo), Altura media (Media), Desviación estándar (Sd), Percentiles (P), Mediana (Mediana) y Coeficiente de penetración (CP). El coeficiente de penetración es la proporción de puntos que llegan al suelo respecto del número de puntos totales. Los puntos del suelo pertenecientes al primer percentil se eliminaron del análisis.

#### Modelización

Se supone un modelo de regresión de la forma  $Y = a + b \cdot X$  donde Y es el parámetro ecológico o forestal, X es la variable LiDAR y (a y b) son los coeficientes estimados para el modelo. Se decidió optar por modelos simples para que pudiesen ser extrapolables a otras zonas del territorio. Se quería determinar cuál de los estadísticos LiDAR era el mejor estimador para cada una de las variables forestales por lo que se realizó una regresión entre las variables forestales y cada una de las variables LiDAR, tanto a nivel de individuo (Anexo, Tabla A), como a nivel de parcela (Anexo, Tabla B). Usando estos modelos (Anexo, Tablas A y B), se seleccionó el mejor estimador LiDAR para cada parámetro forestal en función del coeficiente de determinación R<sup>2</sup> y su RMSE Estos mejores estimadores LiDAR fueron la base para la obtención de los modelos de la Tabla 2.

#### Generación de cartografía

Se pretendía obtener modelos digitales de los parámetros ecológicos estimados. La forma ha-

bitual para obtener modelos digitales es interpolar a partir de puntos individuales, pero en este caso interesaba obtener información a una escala de parcela. Además el elevado número de puntos hacia la interpolación muy costosa computacionalmente. Por tanto se optó por generar una malla regular y obtener las estadísticas LiDAR con los puntos que caían dentro de cada polígono. Así los coeficientes de los modelos se podían aplicar a las estadísticas de los puntos LiDAR para obtener los valores de las variables ecológicas y forestales a nivel de polígono. Se seleccionaron las variables biomasa de madera (T/ha), volumen de copa  $(m^3/m^2)$  y altura (m) por presentar unos ajustes bastante altos en los modelos generales. Esta cartografía se generó para una zona de escena  $(3 \times 0.5 \text{ km}^2)$  en áreas dominadas por vegetación de hayedo y encina. Para generar cartografía forestal de debe tener en cuenta cual es el tamaño de píxel optimo de di-

Parámetro forestal	Especie	Estadístico LiDAR individuo	R <sup>2</sup> individuo	RMSE individuo	Estadístico LiDAR parcela	R <sup>2</sup> parcela	RMSE parcela
Altura	General	Máximo	0,607	6,452	P 90%	0,923	1,593
	Quercus ilex	Máximo	0,384	8,293	P 80%	0,858	1,145
	Fagus sylvatica	Máximo	0,386	8,343	P 80%	0,823	1,710
	Pinus halepensis	Máximo	0,243	12,682	P 80%	0,869	1,144
Altura base	General	P 80%	0,258	11,993	Sd	0,496	1,110
de la copa	Quercus ilex	P 80%	0,297	11,344	P 30%	0,570	0,915
_	Fagus sylvatica	P 80%	0,219	12,725	P 40%	0,611	0,884
	Pinus halepensis	P 80%	0,298	14,638	P 60%	0,662	0,904
Volumen	General	Máximo	0,296	14,542	Máximo	0,758	3,232
	Quercus ilex	Máximo	0,119	33,891	Máximo	0,464	10,53
	Fagus sylvatica	Máximo	0,141	34,193	Máximo	0,496	30,80
	Pinus halepensis	Máximo	0,128	44,124	Máximo	0,392	36,98
DBH	General	Máximo	0,152	161,067	P 20%	0,389	158,0
	Quercus ilex	Máximo	0,191	116,963	P 20%	0,339	127,1
	Fagus sylvatica	Máximo	0,214	121,321	P 20%	0,233	213,5
	Pinus halepensis	Máximo	0,108	115,835	P 10%	0,314	97,45
Biomasa	General	Máximo	0,321	42,723	Media	0,815	23,35
de madera	Quercus ilex	Máximo	0,247	54,923	Media	0,964	6,448
	Fagus sylvatica	Máximo	0,240	63,754	Media	0,750	30,26
	Pinus halepensis	Máximo	0,165	75,567	P 60%	0,746	10,83
Biomasa	General	СР	0,043	139,243	Sd	0,466	10,81
foliar	Quercus ilex	CP	0,086	98,237	CP	0,476	24,89
	Fagus sylvatica	CP	0,027	179,732	Sd	0,272	30,96
	Pinus halepensis	СР	0,076	120,464	СР	0,586	21,01

Tabla 2. Modelos de los mejores estimadores LiDAR.

cha cartografía. La elección del tamaño del píxel esta sujeta a diferentes variables: la resolución de los datos de partida, la estructura espacial del ecosistema, la variabilidad forestal y el tipo de variable a representar. Es decir se trata de una elección compleja que no solo depende de los datos de partida. En (Nijland et al., 2009) determinan la resolución espacial óptima para mapear la vegetación natural en un ambiente mediterráneo, usando un tamaño de píxel diferente del de los datos de partida. En este estudio debido al escaso número de muestras, no se pudo realizar un análisis de «cross-validation» que podría dar una medida del error de la cartografía. Por tanto se generaron mapas a diferentes resoluciones 5, 10, 15 y 20 metros y se evalúo la representatividad de dicha cartografía con respecto a la imagen CASI atendiendo a la estructura espacial del ecosistema, la variabilidad forestal y el tipo de parámetro. Se comprobó que debido a la alta complejidad estructural y ambiental, a partir de un tamaño de píxel de 10 metros no se recogía la variabilidad de los parámetros representados. Por tanto se selecciono el píxel de 10 metros como el óptimo para representar los parámetros de este estudio. Para calcular las variables LiDAR se utilizó una media de 170 puntos LiDAR por polígono, que se aproxima a los 190 puntos que se tenían de media para las parcelas.

# **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados del estudio [Tabla 2, Anexo (Tablas A y B)] revelaron que los datos LiDAR permiten estimar, a nivel de parcela y con elevada exactitud, parámetros forestales en ecosistemas de tipo mediterráneo. Los modelos a nivel de árbol mostraron que todas las variables Li-DAR empleadas fueron significativas pero con bajos ajustes, mientras que a nivel de parcela algunas variables LiDAR no fueron significativas [marcadas con (—) en el Anexo (Tablas A y B)] pero los modelos en general incrementaron considerablemente su nivel de ajuste. Los ajustes de los modelos por individuo (con un intervalo de  $R^2$  de 0,027-0,607) y por parcela (con un intervalo de R<sup>2</sup> de 0,233-0,964), permiten establecer en este caso la parcela como el nivel adecuado para trabajar con datos LiDAR de las características de los utilizados en este estudio.

En todos los casos los modelos mejoraron al pasar del nivel de individuo, al nivel de parcela. Probablemente la densidad de puntos LiDAR de este estudio (0,5 puntos/m<sup>2</sup>) que permite usar 22 puntos para árboles de 8 m<sup>2</sup> de superficie media, es insuficiente para trabajar con individuos (otros trabajos, como el de Chen et al., 2006, usan una densidad de 9 puntos/m<sup>2</sup> para trabajar a este nivel). Por tanto estos resultados son susceptibles de mejora con una mayor densidad de puntos, que puede conseguirse con una conveniente planificación de vuelo o bien con la incorporación de tecnología LiDAR que almacene mayor número de retornos o una mayor frecuencia de emisión de pulsos. También cabe plantearse hasta qué punto es útil obtener cartografía muy detallada de variables forestales que representan parámetros espaciales con una unidad mínima de medida correspondiente al propio árbol. Los modelos generados a nivel de parcela sí fueron satisfactorios y mejoraron los ajustes de estudios anteriores usando imágenes de satélite Landsat (Salvador & Pons, 1998; Mallinis, et al., 2004; Vázquez de la Cueva, 2008) e imágenes hiperespectrales (Baulies & Pons, 1995; Schlerf & Atzberger, 2006). De aquí en adelante se considerarán los modelos a nivel de parcela y se trabajarán y discutirán sus resultados. Con respecto al efecto de las diferencias entre especies en la generación de los modelos, los resultados a nivel de parcela predicen una mejoría en los casos en los que los predictores LiDAR son similares entre especies diferentes. Así, tanto la altura máxima, el volumen de copa y el DBH con similares predictores LiDAR entre especies mejoran en el análisis general. Además, la pérdida del ajuste de los modelos generales es escasa en las variables con mayor variación interespecifica, como la altura de la base de la copa, biomasa foliar y biomasa de madera. Por tanto, las diferentes especies presentan una tendencia similar, por lo que el esfuerzo que supondría realizar un análisis y cartografía a nivel de especie no compensa a la vista de los resultados obtenidos para los modelos generales. Los resultados a nivel de parcela también mostraron que los parámetros forestales estaban explicados por un estadístico LiDAR diferente en cada caso. Así, para los modelos generales los parámetros que dieron mejores resultados fueron la altura máxima explicada por el percentil 90%, el volumen de copa explicado por el máximo y la biomasa de madera estimada por la media. Los parámetros de altura de la base de la copa, DBH y biomasa foliar no se consiguieron estimar con tanto nivel de ajuste, aunque los resultados no son despreciables y podrían ser mejorables con un LiDAR de una mayor densidad de puntos. La altura de la base de la copa, que es un parámetro con una alta variabilidad interespecífica, no arrojó buenos resultados a nivel general, pero los modelos por especie indican que las estadísticas LiDAR explican parte de la variabilidad de este parámetro. Para el DBH no se obtuvo una relación con las estadísticas LiDAR calculadas, aunque cabe señalar que el DBH es un parámetro difícil de estimar con la densidad de puntos LiDAR de este estudio, ya que se trata de una variable de baja resolución espacial por lo que se necesitaría un mayor densidad de puntos para su correcta estimación (Chen et al., 2007). El coeficiente de penetración sirve para explicar parte de la biomasa foliar, sobretodo en los bosques de aciculifolios donde la penetración del LiDAR es mayor. Se esperaba obtener unos peores ajustes de los modelos en los bosques más heterogéneos y variables como los encinares y pinares con respecto a los bosques más homogéneos como los hayedos (Salvador et al., 1997). Sin embargo, los resultados obtenidos han revelado pruebas en el sentido opuesto. Se puede pensar que el propio tipo de estructura homogénea de las copas de los hayedos hace que la penetrabilidad del LiDAR en el dosel vegetal sea menor que en bosques más heterogéneos y esto impida el correcto ajuste de los datos LiDAR a parámetros que explican características del propio dosel. Para la generación de cartografía cuantitativa se usaron los tres parámetros que se consiguieron estimar con mayor exactitud a nivel de parcela; la altura máxima  $R^2 = 0.923$ , biomasa de madera  $R^2 = 0.815$  y volumen de copa  $R^2 = 0.758$  (Figs. 5, 6 y 7). Estos tres parámetros son de vital importancia para el cocimiento de los bosques mediterráneos: La altura máxima es un parámetro básico de los inventarios forestales y del cual derivan otros parámetros, la biomasa de madera permite estimar la cantidad de carbono acumulado en los bosques y el volumen de copa es importante para la modelización de incendios forestales.

Los modelos calculados permitieron generar cartografía de tipo cuantitativo de estos paráme-



Figura 5. Estimación de la altura para modelos generales a nivel de parcela.

tros forestales (Anexo, Fig. A). Lo deseable hubiera sido evaluar de forma cuantitativa estos modelos con nuevos datos de campo, pero debido a que todas las parcelas con verdad terreno disponibles se usaron para el ajuste del modelo no se ha procedido a tal análisis. Aun así, los resultados de los modelos son satisfactorios a nivel visual comparando con la imagen CASI que nos aporta una referencia del estado de las cubiertas. La combinación CASI (907, 707, 406 nm) permite distinguir las zonas de vegetación en rojo y verde, de las áreas sin vegetación o con suelo desnudo en azul o blanco. Se detecta como las áreas sin vegetación (en azul) presentan valores cero de biomasa, volumen de copa y al-



Figura 6. Estimación de biomasa de madera para modelos generales a nivel de parcela.



Figura 7. Estimación de volumen de copas para modelos generales a nivel de parcela.

tura máxima, mientras que en las zonas de mayor densidad de copas estos valores aumentan. En la imagen correspondiente al volumen de copa se observan zonas con valor 0 y sin embargo la altura varía entre 5-10 m y la biomasa presenta valores de aproximadamente 50 T/ha; esto es debido a que son áreas de matorral que no presentan cobertura arbórea y en consecuencia no existen copas arbóreas, pero sí presencia de especies arbustivas con cierta altura y biomasa de madera. Los modelos se realizaron para un área dominada por haya en la parte inferior de la imagen y encinas en la zona superior. El rango de valores obtenido fue de 0-300 T/ha para la biomasa de madera, de 0-800 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> para el volumen de copa y de 0-35 m para la altura.

Estos modelos permiten detectar áreas dentro del bosque con elevado contenido en biomasa y/o con elevado volumen de copa. Estas áreas podrían ser zonas con características climáticas y edáficas muy benignas que permiten a la vegetación desarrollarse y acumular altas concentraciones de biomasa. En los modelos digitales se detectaron valores altos de los parámetros ecológicos en zonas con altas pendientes, como puntos cercanos a la cima de las colinas de la parte superior de la imagen. Esto puede ser debido a que la generación de modelos digital del terreno (MDT) obtenidos por Li-DAR se realiza a través de la interpolación de los puntos del suelo. Estos puntos se clasifican por un algoritmo automático que puede generar errores en las cimas de colinas. Así, el MDT

presentaría altitudes menores en las cimas y, en consecuencia, al restar el MDT a los puntos Li-DAR se tendrían valores de Z mayores de lo esperado en estas zonas.

Los ajustes obtenidos en este estudio han sido mayores que los obtenidos en estudios anteriores (Salvador *et al.*, 1997) y permiten ser optimistas sobre las posibilidades de la aplicación del LiDAR para la estimación y cartografía cuantitativa de la vegetación natural. En futuros estudios se espera poder mejorar los resultados de estimación de los parámetros ecológicos y forestales, sobretodo de los foliares, con la incorporación de información hiperespectral CASI y de la intensidad LiDAR.

#### CONCLUSIONES

En este estudio se comprobó la capacidad de los datos LiDAR para genera cartografía de tipo cuantitativo. Se puede concluir que una densidad de puntos de 0,5 puntos/m<sup>2</sup>, es adecuada para trabajar a nivel de parcela, pero insuficiente para el nivel de individuo. A su vez, la escasa diferencia entre los modelos a nivel de especie y a nivel general parece indicar que el esfuerzo en la separación por especie sea innecesario para la generación de una cartografía extensiva de parámetros forestales. Finalmente, la metodología usada para el tratamiento de la información Li-DAR ha permitido modelizar variables ecológicas forestales como biomasa de madera, volumen de copa y altura, y en consecuencia generar modelos digitales forestales con un nivel de fiabilidad que no se había conseguido obtener con otras aproximaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible gracias a un convenio de colaboración entre ICC y CREAF para la utilización de datos hiperespectrales y multitemporales (CASI) y LiDAR para la cartografía categórica y cuantitativa de la vegetación forestal. Deseamos agradecer especialmente a los compañeros del ICC el cuidadoso procesado de los datos, así como a los compañeros del CREAF que realizaron el extenso trabajo de campo.

# REFERENCIAS

- ANDERSON, G. L., HANSON, J. D. & HAAS, R. H. 1993. Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating aboveground biomass on semiarid rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 45, 165-175.
- AXELSSON, P. 1999. Processing of laser scanner data; algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 138-147.
- BAULIES, X. & PONS, X. 1995. Approach to forestry inventory and mapping by means of multispectral airborne data. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 61-80.
- BURRIEL, J. A., GRACIA, C., IBÀÑEZ, J. J., MA-TA, T. & VAYREDA, J. 2000-2004. Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya (IEFC). CREAF, Bellaterra.
- CHEN, Q., BALDOCCHI, D. D., GONG, P. & KELLY, M. 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint LiDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72: 923-932.
- CHEN, Q., GONG, P., BALDOCCHI, D. & TIAN, Y. 2007. Estimating basal area and stem volume for individual trees from LiDAR data . *Photogrammetric engineering and Remote Sensing*, 12: 1355-1365.
- GARCIA, M., RIANO, D., CHUVIECO, E. & DAN-SON, FM. 2010. Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing* of Environment, 114: 816-830.
- GRACIA, C., BURRIEL, J. A., IBÀÑEZ, J. J., MA-TA, T. & VAYREDA, J. 2004. Inventari Ecològic i Forestal de Catalunya. Mètodes. Volum 9. CREAF, Bellaterra, 112.
- HILL, R. & THOMSON, A. 2005. Mapping woodland species composition and structure using airborne spectral and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 3763-3779.
- MALLINIS, G., KOUTSIAS, N., MAKRAS, A. & KARTERIS, M. 2004 Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *Forest Science*, 50: 450-460.
- MASELLI, F. & CHIESI, M. 2006. Evaluation of Statistical Methods to Estimate Forest Volume in a Mediterranean Region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44: 2239-2250.
- NAESSET, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 52: 49-56.
- NELSON, R., ODERWALD, R. & GREGOIRE, T. G. 1997. Separating the ground and airborne laser sampling phases to estimate tropical forest basal area, volume, and biomass. *Remote Sensing of Environment*, 60: 311-326.

- NIJLAND, W., ADDINK, E. A., DE JONG, S. M. & VAN DER MEER, F. D. 2009. Optimizing spatial image support for quantitative mapping of natural vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 13: 771-780.
- PONS, X. 2010. MiraMon. Geographical information system and remote sensing software. Versión 7. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF). ISBN: 84-931323-4-9.
- POPESCU, S. C., WYNNE R. H. & NELSON R.F. 2003. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29: 564-577.
- RIAÑO, D., CHUVIECO, E., CONDES, S., GONZÁ-LEZ-MATESANZ, J. & USTIN, S. 2004. Generation of crown bulk density for Pinus sylvestris L. from LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 92: 345-352.
- RIAÑO, D., MEIER, E., ALLGÖWER, B., CHUVIE-CO, E. & USTIN, S. L. 2003. Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment*, 86: 177-186.
- RODRÍGUEZ, J. P., BROTONS, L., BUSTAMANTE, J. & SEOANE, J. 2007. The application of predictive modelling of species distribution to biodiversity conservation. *Diversity and Distributions*, 13: 243-251.
- SALVADOR, R. & PONS, X. 1998. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. *Forest Ecology and Management*, 104: 193-208.
- SALVADOR, R., PONS, X. & BAULIES, X. 1997. Análisis de imágenes multiespectrales aerotransportadas para estimar variables estructurales de bosques mediterráneos de *Quercus ilex* L. Orsis, 12: 127-139.
- SCHLERF, M. & ATZBERGER, C. 2006. Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 100: 281-294.
- VÁZQUEZ DE LA CUEVA, A. 2008. Structural attributes of three forest types in central Spain and Landsat ETM plus information evaluated with redundancy analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 5657-5676.
- WEHR, A. & LOHR, U. 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 68-82.
- ZIEGLER, M., KONRAD, H., HOFRICHTER, J., WIMMER, A., RUPPERT, G., SCHARDT, M. & HYYPPA, J. 2000. Assessment of forest attributes and single-tree segmentation by means of laser scanning. *Proceedings of the Internacional Society for Optical Engineering*, 4035: 73-84.

#### Anexo

## MODELOS DIGITALES DE LOS PARÁMETROS ECOLÓGICOS FORESTALES

- 1. Imagen CASI RGB (907, 707, 406 nm).
- 2. Biomasa de madera (T/ha).
- 3. Volumen de copa (m<sup>3</sup>).
- 4. Altura (m).



Figura A. Modelos Digitales Forestales de la biomasa de madera, volumen de copa y altura.

Dovémetro			Parámetros LiDAR												
rarai	netro		Máx	P90	P80	P70	P60	Med	P40	P30	P20	P10	SD	Medi	СР
Altura (m)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,607 6,452	0,583 6,893	0,555 6,931	0,529 7,627	0,496 7,802	0,452 8,653	0,403 8,982	0,349 9,212	0,260 9,262	0,121 9,392	0,265 8,245	0,451 7,36	0,024 9,834
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,384 8,293	0,375 8,485	0,375 8,683	0,363 8,721	0,352 8,959	0,343 9,348	0,324 9,562	0,304 9,578	0,249 9,885	0,153 10,2	0,050 21,39	0,319 9,378	0,027 24,85
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,386 8,343	0,357 8,379	0,326 8,381	0,308 8,402	0,276 8,628	0,239 8,863	0,199 9,256	0,155 9,892	0,107 9,913	0,039 10,38	0,066 16,483	0,218 9,527	0,017 25,38
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,243 12,68	0,221 12,87	0,181 12,19	0,139 13,69	0,102 13,82	0,055 13,89	0,017 14,25	0,005 14,58	<0,001 14,93	0,002 15,82	0,162 16,32	0,077 14,25	0,04 15,34
Altura base de la copa (m)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,254 11,28	0,257 11,30	0,258 11,99	0,234 12,33	0,215 12,59	0,187 12,78	0,158 12,93	0,138 13,04	0,108 13,67	0,061 13,78	0,130 15,89	0,194 13,48	<0,001 16,83
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,290 10,45	0,295 10,67	0,297 11,34	0,294 11,89	0,281 12,45	0,275 12,67	0,260 13,45	0,257 13,98	0,229 14,56	0,181 14,22	0,012 15,98	0,280 16,87	0,007 12,34
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,194 13,25	0,212 13,49	0,219 12,72	0,212 12,93	0,198 13,18	0,176 13,28	0,152 13,29	0,127 13,31	0,092 13,86	0,051 13,89	0,018 14,26	0,165 14,18	0,015 14,93
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,172 12,3	0,265 12,41	0,298 14,63	0,202 14,67	0,203 14,68	0,201 14,73	0,162 14,87	0,132 15,14	0,122 15,49	0,111 15,83	0,022 15,84	0,210 15,93	0,017 16,86
Volumen de copa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,296 14,54	0,264 14,63	0,248 15,87	0,236 15,98	0,219 16,03	0,208 16,25	0,182 16,45	0,159 16,78	0,122 16,87	0,053 16,96	0,101 17,09	0,204 17,12	0,013 17,57
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,119 33,89	0,097 33,96	0,086 33,96	0,078 33,73	0,072 33,84	0,061 33,98	0,053 34,78	0,043 34,82	0,032 34,93	0,007 35,43	0,056 35,56	0,051 35,65	0,017 35,78
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,141 34,19	0,097 34,23	0,081 34,34	0,069 34,87	0,055 34,98	0,042 35,38	0,032 35,56	0,023 35,76	0,016 35,87	0,004 35,92	0,053 36,33	0,043 36,45	0,008 36,56
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,128 44,12	0,106 44,26	0,076 44,56	0,046 44,67	0,016 48,43	<0,001 55,68	<0,001 56,12	0,021 56,23	0,044 56,37	0,056 56,87	0,033 58,98	0,003 61,44	0,006 62,38
DBH (cm)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,152 161,0	0,133 163,2	0,117 165,3	0,102 167,4	0,084 170,7	0,064 171,8	0,050 173,9	0,040 174,2	0,026 176,3	0,004 178,6	0,110 181,4	0,068 184,5	0,008 185,6
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,191 116,9	0,165 117,7	0,150 117,8	0,138 117,9	0,130 118,1	0,124 118,2	0,116 118,3	0,095 118,4	0,061 119,2	0,017 119,3	0,080 120,2	0,100 120,4	0,017 120,5
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,214 121,3	0,168 121,4	0,144 121,5	0,129 121,6	0,107 121,6	0,086 121,7	0,068 121,8	0,056 121,8	0,037 122,8	0,005 122,9	0,054 123,2	0,079 123,3	0,033 123,4
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,108 115,8	0,098 116,3	0,072 116,4	0,043 116,5	0,016 116,7	<0,001 116,8	0,005 116,8	0,019 117,1	0,046 117,2	0,069 117,3	0,102 117,6	0,002 117,6	0,020 117,9
Biomasa de madera (T/ha)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,321 42,72	0,295 43,62	0,279 43,76	0,266 43,87	0,249 47,89	0,229 48,25	0,210 49,95	0,193 54,76	0,158 54,87	0,081 54,98	0,102 56,23	0,239 56,45	0,092 56,76
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,247 54,92	0,224 55,32	0,216 55,43	0,202 55,67	0,191 55,78	0,174 55,87	0,163 55,98	0,144 56,43	0,107 56,78	0,046 56,87	0,064 57,32	0,156 57,43	0,018 57,56
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,240 63,75	0,195 64,23	0,173 64,34	0,160 66,45	0,140 66,78	0,119 67,21	0,099 68,34	0,084 69,45	0,065 69,54	0,028 70,64	0,028 70,76	0,119 70,34	0,055 71,54
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,165 75,56	0,156 75,88	0,125 76,56	0,088 77,65	0,049 77,89	0,015 77,98	<0,001 78,45	0,004 79,32	0,022 79,45	0,037 80,34	0,130 83,42	0,021 84,32	0,010 84,34

Danématra		Parámetros LiDAR													
1 al ametro			Máx	P90	P80	P70	P60	Med	P40	P30	P20	P10	SD	Medi	СР
Biomasa foliar (T/ha)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,030 145,6	0,034 145,8	0,041 146,5	0,005 146,8	0,006 147,3	0,008 148,2	0,003 143,8	0,012 146,1	0,005 146,4	0,008 147,3	0,007 148,2	0,008 152,3	0,043 139,2
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,033 131,2	0,023 133,4	0,018 133,9	0,012 134,3	0,014 142,2	0,010 143,2	0,008 141,9	0,003 142,5	<0,001 146,8	0,007 148,4	0,061 141,3	0,003 142,5	0,086 98,23
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,005 162,3	0,003 163,6	0,020 167,5	0,018 168,6	0,012 169,5	0,008 170,4	0,005 173,5	0,004 180,3	0,003 181,4	0,001 183,6	0,021 185,8	0,007 188,5	0,027 179,7
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,059 137,2	0,055 138,6	0,042 140,5	0,028 142,4	0,018 144,6	<0,001 146,3	0,004 158,4	0,017 161,2	0,039 163,7	0,048 164,5	0,059 165,8	<0,001 166,8	0,076 120,4

**Tabla A.** Tabla de R<sup>2</sup> de los modelos significativos LiDAR a nivel de individuo. Modelo General, *Quercus ilex, Fagus sylvatica y Pinus halepensis* (G, Q, F y P) respectivamente. P: percentil. Máx: máximo. Med: mediana. Sd: desviación estándar. Medi: media. CP: coeficiente de penetración.

Denting		Parámetros LiDAR													
Para	metro		Máx	P90	P80	P70	P60	Med	P40	P30	P20	P10	SD	Medi	СР
Altura (m)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,911 1,718	0,923 1,593	0,910 1,718	0,858 2,164	0,808 2,517	0,698 3,162	0,647 3,415	0,608 3,601	0,513 4,013	0,141 5,332	0,761 2,811	0,787 2,65	
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,779 1,458	0,819 1,155	0,858 1,145	0,846 1,892	0,834 1,901	0,806 2,103	0,788 2,134	0,739 2,812	0,675 2,912	0,606 3,172	0,596 2,103	0,795 2,012	_
-	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,737 2,028	0,812 1,713	0,823 1,710	0,813 1,661	0,809 1,728	0,797 1,781	0,717 2,104	0,591 2,53	0,517 2,748	0,229 3,472	0,181 3,577	0,770 1,897	
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,796 1,148	0,833 1,019	0,869 1,144	0,858 1,444	0,847 1,625	0,821 2,139	0,804 2,169	0,759 2,193	0,699 2,203	0,636 2,219	0,627 0,9373	0,811 1,596	_
Altura base de la copa (m)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,416 1,196	0,444 1,166	0,446 1,165	0,431 1,18	0,389 1,223	0,235 1,369	0,202 1,397	0,171 1,424	0,172 1,424		0,496 1,110	0,321 1,289	_
	Q	R <sup>2</sup> RMSE		_				0,248 0,929	0,467 0,923	0,570 0,915	0,363 0,919			_	_
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,440 1,06	0,476 1,025	0,504 0,997	0,525 0,976	0,553 0,947	0,584 0,913	0,611 0,884	0,530 0,971	0,469 1,033			0,554 0,94	_
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,422 1,105	0,611 0,905	0,625 0,840	0,639 0,872	0,662 0,904		_				0,656 0,852	0,511 1,016	_
Volumen de copa (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,758 3,232	0,743 5,993	0,734 7,733	0,697 4,245	0,677 7,765	0,649 12,15	0,603 19,3	0,563 25,1	0,456 39,7	0,149 74,7	0,528 30,1	0,679 37,3	0,098 79,9
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,464 10,53	0,446 10,7	0,459 10,57	0,458 10,55	0,462 10,52	0,457 10,6	0,451 10,65	0,439 10,77	0,431 10,84	0,425 10,91		0,469 10,47	0,407 11,07
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,496 30,8	0,447 37	0,427 39,4	0,410 41,5	0,380 45,1	0,328						0,301 54	0,242 64,6
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,392 36,98	0,251 38,85				_						0,374 21,27	_

Danématna		Parámetros LiDAR													
rarai	netro		Máx	P90	P80	P70	P60	Med	P40	P30	P20	P10	SD	Medi	СР
DBH (cm)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,129 188,6	0,161 185,1	0,185 182,4	0,226 177,8	0,272 172,4	0,328 165,8	0,348 163,2	0,366 161	0,389 158	0,176 183,5		0,299 169,2	169,3
	Q	R <sup>2</sup> RMSE			_		_	0,291 131,7	0,301 130,7	0,320 128,9	0,339 127,1		_		_
	F	R <sup>2</sup> RMSE			_		_		0,174 220,7	0,191 218,6	0,233 213,5	0,131 225,8			_
	Р	R <sup>2</sup> RMSE			_	_	0,278 99,93	0,290 99,09	0,220 103,9			0,314 97,45		0,266 100,8	0,260 101,2
Biomasa de madera (T/ha)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,632 32,91	0,683 30,52	0,711 29,13	0,731 28,11	0,753 26,94	0,725 28,44	0,716 28,87	0,742 27,54	0,805 23,94	0,563 35,86	0,250 46,99	0,815 23,35	0,262 46,6
	Q	R <sup>2</sup> RMSE	0,877 11,91	0,884 11,53	0,922 9,479	0,937 8,517	0,950 7,556	0,963 6,397	0,962 6,277	0,961 6,649	0,944 8,035	0,908 10,25	0,419 25,89	0,964 6,448	0,338 27,62
	F	R <sup>2</sup> RMSE	0,450 44,89	0,540 41,02	0,581 39,19	0,620 37,32	0,658 35,37	0,693 33,55	0,711 32,52	0,660 35,28	0,721 31,97	0,598 38,35	_	0,750 30,26	0,340 49,15
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	0,267 18,39	0,529 14,75	0,627 13,13	0,686 12,04	0,746 10,83	0,230 18,86	20,16				0,545 14,5	0,559 14,27	0,240 18,73
Biomasa foliar (T/ha)	G	R <sup>2</sup> RMSE	0,335 20,02	0,267 21,12	0,233 22,17	0,159 22,27	0,114 24,33		_				0,466 10,811		0,153 28,283
	Q	R <sup>2</sup> RMSE			_	_	_		_				_		0,376 24,89
	F	R <sup>2</sup> RMSE			_	_	_		_	_	_		0,272 30,961		_
	Р	R <sup>2</sup> RMSE	_		0,260 21,35	0,434 21,18	0,585 21,03	0,422 21,19	0,248 21,36	0,311 21,30		_	_	0,442 21,17	0,586 21,01

**Tabla B.** Tabla de R<sup>2</sup> de los modelos significativos LiDAR a nivel de parcela. Modelo General, *Quercus ilex, Fagus sylvatica y Pinus halepensis* (G, Q, F y P) respectivamente. P: percentil. Máx: máximo. Med: mediana. Sd: desviación estándar. Medi: media. CP: coeficiente de penetración.