

Segona edició millorada dels mapes de variables biofísiques dels boscos de Catalunya

Introducció

Els mapes de variables biofísiques de l'arbrat de Catalunya són una demostració d'explotació del potencial que ofereix la tecnologia LiDAR per millorar el coneixement i la gestió dels boscos. Aquests mapes tenen una resolució que supera àmpliament qualsevol altra cartografia existent.

El LiDAR consisteix en un làser escàner embarcat en avió que proveeix un núvol de punts tridimensional de la superfície terrestre que inclou retorns en el terreny, els diferents estrats de vegetació i les construccions i infraestructures.

L'ús de sensors LiDAR està sent àmpliament utilitzat en el món forestal fins al punt que s'està convertint en una de les tecnologies de teledetecció més utilitzada en el món forestal (Mc Roberts *et al.*, 2010). La tecnologia LiDAR és molt precisa en la predicció de l'estructura de la vegetació, tant verticalment com horitzontal. Aquesta informació habitualment es combina amb les observacions de camp per a la construcció de models estadístics per predir l'altura, volum de fusta, biomassa total i altres paràmetres biofísics (Nelson *et al.*, 1998). Aquest tipus d'aproximació permet realitzar consi-

deracions molt raonables quan la densitat de polsos és entre 0,5 i 2 pt/m² (Magnussen *et al.*, 2010).

Hi ha cert consens a la bibliografia que aquesta tècnica permet obtenir estimacions molt fiables de variables biofísiques de la vegetació arbòria sempre que es tracti de boscos regulars i mono-específics, molt habituals en països nòrdics, però en canvi cal avançar i investigar en boscos mixtos i d'estructura irregular com els mediterranis. Ara bé, atès que alguns dels polsos làser penetren sota la coberta arbòria dominant, també és possible analitzar els boscos multiestratificats (Maltamo *et al.*, 2005).

A Catalunya, es compleixen tres requisits bàsics que han fet possible dur a terme aquesta cartografia d'alta resolució de les variables biofísiques dels boscos:

- **Cobertures LiDAR:** l'ICGC ha generat fins al moment dues cobertures LiDAR (LIDARCAT1 i LIDARCAT2) que cobreixen tot el territori català amb una densitat de 0,5 pt/m².
- **Inventari forestal nacional:** el *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demo-*

gráfico ha dut a terme a Catalunya diferents inventaris forestals. El més recent és el quart inventari forestal nacional (IFN4) que proporciona informació homogènia sobre el terreny de les masses forestals.

- **Informació de les cobertes forestals:** el CREAM va publicar la quarta versió del Mapa de cobertes del sòl de Catalunya (MCSC) l'any 2009. Actualment, es disposa d'una actualització de grans canvis referenciada a l'any 2018 i publicada per l'ICGC.

L'any 2016, es publicava la seva primera edició a partir de la cobertura LIDARCAT1, mostrejos de camp, principalment del tercer Inventari forestal nacional (IFN3) i el mapa de cobertes del sòl de Catalunya de 2009 (<https://www.creaf.uab.es/mcsc>). A finals de 2021, l'ICGC i el CREAM publicaven la segona edició dels mapes de variables biofísiques a partir dels vols de cobertura LIDARCAT2, el quart Inventari forestal nacional (IFN4) i l'actualització de grans canvis del Mapa de cobertes del sòl de Catalunya (MCSC). El propòsit d'aquesta segona edició és **actualitzar** els mapes existents amb dades LiDAR i mostrejos de camp més recents i **millorar** la fiabilitat i precisió del producte.

Metodologia

La metodologia va consistir a obtenir models estadístics de cadascuna de les variables biofísiques de l'espècie o grup funcional (conífera, frondosa o esclerofil·la) i creuar la informació georeferenciada de veritat terreny de les parcel·les del IFN4 amb la informació del núvol de punts del vol LiDAR de cobertura (mètriques LiDAR). Per a cada parcel·la, les variables biofísiques seleccionades defineixen diferents característiques estructurals de les masses forestals. Els models estadístics obtinguts es van aplicar al conjunt del territori per generar els mapes d'alta resolució de les variables biofísiques a tota la superfície forestal arbòria i segons l'espècie o tipus funcional d'acord amb el mapa de cobertes del sòl.

La metodologia utilitzada consta de les fases següents:

Processament de les dades LiDAR. Per generar la segona edició dels mapes, es va utilitzar la cobertura LIDARCAT2 volada entre 2016 i 2017 amb una densitat de punts de 0,5 pt/m². Es va fer una classificació dels punts i una normalització d'alçades. Finalment, es van calcular un conjunt de mètriques basades en el núvol de punts que coincideixen amb la superfície de les parcel·les de l'inventari forestal. Aquestes mètriques descriuen l'estructura de la vegetació des de diferents punts de vista: la dimensió vertical amb mètriques relacionades amb diferents percentils d'alçades del núvol de punts LiDAR, l'heterogeneïtat vertical amb mètriques que descriuen la variabilitat d'alçades i el grau d'ocupació de l'espai, amb la combinació d'alçades i proporció de punts que cauen sobre la vegetació arbòria ([taula 1](#)).

Taula 1. Mètriques LiDAR calculades com a possibles variables explicatives del model estadístic

Mètrica	Descripció
Elev mínima	Alçada mínima en metres
Elev màxima	Alçada màxima en metres
Elev mean	Alçada mitjana en metres
Elev mode	Alçada mode en metres
Elev stdde	Desviació estàndard d'alçades
Elev varia	Variança d'alçades
Elev CV	Coefficient de variació d'alçades
Elev IQ	Distància interquartílica (P75-P25) en metres
Elev skewn	Skewness (coeficient d'asimetria) segons el <i>National Institute of Standards and Technology</i>
Elev kurto	Curtosi segons el <i>National Institute of Standards and Technology</i>
Elev AAD	Desviació absoluta mitjana (<i>Average Absolute Deviation</i>)
Elev PN	Alçada del percentil dels punts de vegetació expressada en metres per N=1, 5, 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 95, 99
Perc1eco_3	Percentatge de primers ecos sobre 3 metres
PercAlleco	Percentatge de tots els ecos sobre 3 metres
Relacio_1	(Percentatge de tots els ecos sobre 3 m) / (Percentatge de primers ecos sobre 3 m)*100
PEco1_Mean	Percentatge de primers ecos sobre la mitjana
PEco1_Mode	Percentatge de primers ecos sobre la moda
PEcoAll_Me	Percentatge de tots els ecos sobre la mitjana
PEcoAll_Mo	Percentatge de tots els ecos sobre la moda
P50-P25	Diferència entre el percentil 50 i el percentil 25
P75-P50	Diferència entre el percentil 75 i el percentil 50
P99-P75	Diferència entre el percentil 99 i el percentil 75
FCC	$FCC = \text{Return}1C * 100 / (\text{Total_retu} - \text{Return}2C - \text{Return}3C - \text{Return}4C)$
Relative median height (RMH)	$Relative\ median\ height = P50/Elev_maxim$
Canopy relief ratio (CRR)	$Canopy\ relief\ ratio = (Elev_mean - Elev\ min) / (Elev_maxim - Elev_minim)$
Canopy density (CD)	$Canopy\ density = (\text{Return}1C + \text{Return}3C) / (\text{Return}1C + \text{Return}2C)$

Inventari forestal: en aquesta segona edició, es van seleccionar 2.708 parcel·les del quart Inventari forestal nacional (IFN4) distribuïdes sobre superfícies forestals arbòries de Catalunya. A partir del diàmetre normal (DBH) i l'alçada dels arbres adults (DBH > 7,5 cm) mesurats a cada parcel·la de mostreig i utilitzant les equacions al·lomètriques per a cada espècie a escala d'arbre, es van estimar les variables biofísiques següents: alçada mitjana o **Hm** (m) de la parcel·la; diàmetre normal mitjà o **DBH** (cm); àrea basal o **AB** (m²/ha); densitat de peus per hectàrea o **Den** (peus/ha); volum amb escorça o **VAE** (m³/ha); biomassa aèria total o **BAT** (t/ha); carboni aeri total o **CAT** (tC/ha); biomassa foliar o **BF** (t/ha); índex d'Àrea Foliar o **LAI** (s.u.), i recobriment arbori o **CC** de la suma de les àrees corresponents al diàmetre de capçada de tots els arbres en relació amb la superfície de sòl expressada en percentatge. No s'ha de confondre amb la fracció de cabuda coberta (FCC) de l'estrat arbori, que és el percentatge de sòl cobert per les capçades. D'acord amb aquesta definició, la FCC no pot superar el 100%,

mentre que el recobriment arbori pot superar aquest llindar.

Mapa de cobertes del sòl: el *Mapa de cobertes del sòl de Catalunya* (MCSC) utilitzat va ser una actualització del mapa original de 2009 que va dur a terme el CREAM (<https://www.cream.uab.es/mcsc>). Sobre aquest mapa, l'ICGC va publicar una actualització de 2018 (<https://www.icgc.cat/Descarregues/Cartografia-vectorial/Cobertes-del-sol>). En l'actualització del mapa, es va realitzar una simplificació a 41 classes de coberta, de manera que en les classes forestals s'ha passat d'una classificació a escala d'espècie a una agrupació d'aquestes espècies per tipus funcionals (conífera, frondosa o esclerofil·la). Amb la finalitat d'obtenir variables biofísiques calculades per a l'espècie dominant i minimitzar les àrees calculades per tipus funcionals, es va optar per generar un nou mapa de cobertes, basat en el mapa de 2009 i actualitzat únicament en aquelles zones on es van detectar canvis en el valor de tipus funcional del mapa de 2018. Les espècies seleccionades són: *Abies alba*,

Castanea sativa, *Fagus sylvatica*, *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Quercus ilex*, *Quercus suber* i roures (*Quercus faginea*, *Quercus cerrroides*, *Quercus humilis*, *Quercus petraea* o *Quercus robur*), i els tipus funcionals: boscos de coníferes, boscos de caducifolis, boscos desclerofil·les i boscos de ribera.

Models estadístics: a partir de les variables explicatives (mètriques LiDAR descrites a l'apartat 3.1), es va calcular el model estadístic que s'ajusta millor a cada variable resposta (inventari forestal descrit a l'apartat 2.2). Els models obtinguts es van aplicar al conjunt del territori per generar els mapes d'alta resolució espacial (20x20 m) de les variables biofísiques a tota la superfície forestal arbrada i segons l'espècie o els tipus funcionals indicats en el mapa de cobertes del sòl (descriu a l'apartat 2.23). Es van obtenir models per espècie i pels tres grans tipus funcionals.

Generació de la cartografia: es van calcular les mètriques LiDAR de les parcel·les de mostreig i

de la malla de 20x20 m de cadascun dels blocs LiDAR. Es van aplicar a les mètriques de la malla regular els models estadístics obtinguts per espècie i per tipus funcional, de manera que es va obtenir un valor per cada cel·la de 20x20 m de les variables biofísiques calculades.

Càlcul dels intervals de confiança: es van calcular els intervals de confiança de cadascun dels valors de les variables biofísiques que es representen als mapes. Es va utilitzar un model de regressió lineal generalitzada per explicar la variable resposta corresponent utilitzant com a variables explicatives les diferents mètriques LiDAR. Com a resultat, s'obtenen un gran nombre de valors esperats de la variable resposta per cada parcel·la. Aquest conjunt de punts, centrats sempre al voltant del valor real esperat de la variable resposta, s'utilitza per determinar un interval de confiança que ens informa sobre la incertesa en el valor esperat de la variable resposta amb un interval de confiança del 95%.

Resultats

Els models estadístics obtinguts van resultar fiables i no esbiaixats amb valors del coeficient de determinació diferents segons la variable resposta. El més baix va ser per a la densitat: $R^2 = 0,44$ i el més alt per al volum amb escorça i l'alçada mitjana ($R^2 = 0,81$) (taula 2). El nombre de variables explicatives (excloent el factor espècie o el factor tipus funcional) per a cada variable resposta va variar entre 2 per al recobriment arbore i 6 per a l'alçada mitjana.

Es va generar un mapa per a cadascuna de les 10 variables de les quals es va poder obtenir un model estadístic prou fiable, precís i no esbiaixat (taula 2), dos mapes més que en l'edició an-

terior. Els mapes tenen una resolució espacial de 20 m i cobreixen tot el territori forestal arbrat de Catalunya. La figura 1 mostra el mapa obtingut de la biomassa aèria total a Catalunya. La figura 2 mostra el detall de l'acumulació de carboni al Parc Natural de la Serra de Collserola. Els 10 mapes resultants, en la resolució original, es poden descarregar de <https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Capes-de-geoinformacio/Mapes-de-variables-biofiques-de-l-arbrat-de-Catalunya>. També es pot utilitzar l'aplicació LiDAR APP (<https://laboratoriforestal.creaf.cat/lidarapp>) per fer càlculs a partir dels rasters originals, descarregar els mapes en una resolució més baixa, fer consultes o descarregar segons polígons definits per l'usuari o límits administratius, àrees d'interès natural, etc.

Cada edició dels mapes de variables biofísiques s'ha generat amb la seva font de dades pròpia i, per tant, cadascuna té models estadístics propis. Com a conseqüència, les diferents edicions no es

La segona edició substitueix la primera, ja que és una versió actualitzada i millorada.

Taula 2. Resum dels models estadístics: variables explicatives significatives per a cada variable biofísica i coeficient de determinació (R^2). Les cel·les vermelles indiquen efecte negatiu de la variable explicativa, les cel·les verdes efecte positiu

	Hm	DBH	BAT	CAT	AB	BF	Den	LAI	VCC	CC
	m	cm	t/ha	t/ha	m ² /ha	t/ha	peus/ha	s.u.	m ³ /ha	%
Elev_mean	■									
Elev_CV	■		■	■	■		■	■		
Elev_stdde							■			
Elev_P50-25			■	■		■		■		
Elev_P75-50		■								
Elev_P99_75	■									
Elev_skewn		■	■	■	■	■			■	■
Elev_kurto	■						■			
Elev_P25	■									
Elev_P80							■			
ln (Elev_P80)		■	■	■	■				■	
FCC_LiDAR	■									
Relativa_median_height		■	■	■				■		
Canopy_density					■	■			■	
Canopy_relief_ratio								■		
Pec1eco_3		■	■	■	■	■	■	■	■	■
PEco1_Mode								■		
R^2	0.81	0.57	0.74	0.74	0.64	0.56	0.44	0.61	0.81	0.53

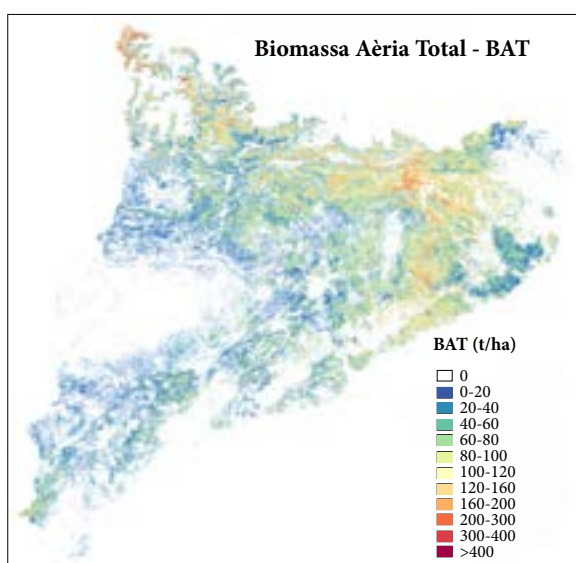


Figura 1. Cartografia corresponent a una de les variables biofísiques: Biomassa Aèria Total (t/ha).

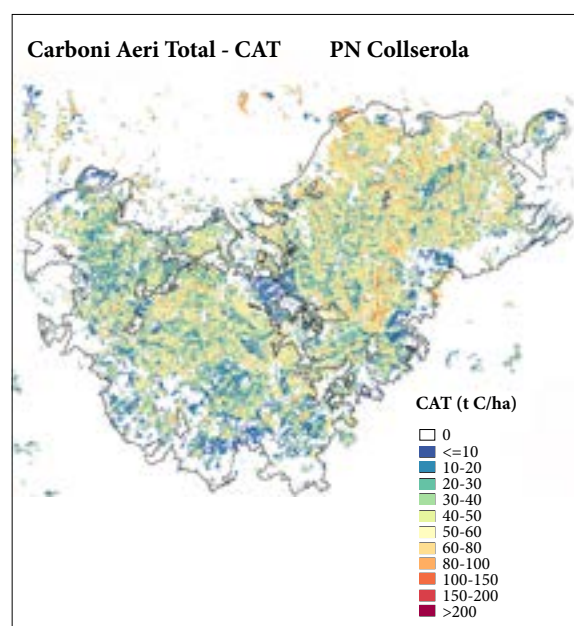


Figura 2. Detall de la cartografia corresponent a la variable Carboni Aeri Total (t C/ha) al Parc Natural de la Serra de Collserola.

poden comparar. De fet, la segona edició substitueix la primera, ja que és una versió actualitzada i millorada.

Actualitzada, perquè la primera edició es basa en el vol LiDAR dut a terme entre 2008 i 2011 i dades veritat terreny procedents de parcel·les de diferents inventaris forestals duts a terme entre els anys 2000

i 2011. La segona edició, en canvi, es basa en el vol LiDAR 2016-2017 i dades veritat terreny procedents únicament de les parcel·les de l'IFN4 que es van mostrejar entre els anys 2014-2016.

Millorada per dues raons principals. La primera, perquè respecte de la primera edició compta amb dades de camp que cronològicament coin-

cideixen pràcticament en el temps amb la segona cobertura de LIDARCAT. A la primera edició (2005), les dades de camp es van mostrejar entre els anys 2000-2011, mentre que les dades LiDARCAT eren dels anys 2008-2011, fet que va suposar haver d'introduir com a variable explicativa addicional la diferència en anys entre les dates de mostreig i les dates del vol LiDAR. Fent aquesta correcció, es va aconseguir corregir el biaix sistemàtic introduït pel decalatge entre les dates del mostreig, però va afegir imprecisió en els models estadístics obtinguts. En els mapes de la segona edició, no va ser necessari incorporar aquesta variable perquè la diferència d'anys entre el mostreig i la data del vol LiDAR és insignificant a l'es-

La diferència d'anys entre el mostreig i la data del vol LiDAR és insignificant a l'escala temporal de la dinàmica del bosc.

cala temporal de la dinàmica del bosc. La segona millora té a veure amb la mida de la mostra per construir els models estadístics. Mentre que en la versió de 2005 el nombre de parcel·les va ser de només 437 procedents de diferents inventaris forestals, en la versió 2016-2017 la mida mostral va augmentar fins a les 2.708 parcel·les, totes procedents de l'IFN4.

Conclusions

La cartografia obtinguda permet determinar les variables biofísiques dels boscos catalans amb una resolució 2.500 vegades superior a la dels inventaris forestals tradicionals. Aquest coneixement suposa un salt qualitatiu en la planificació i gestió forestals i es traduirà en un desenvolupament de polítiques més efectives i una millora en la prevenció d'incendis i el desenvolupament de projectes d'àmbit mediambiental i d'ordenació més eficients.

Són molts els casos d'ús de la primera edició dels mapes i tenim el convenciment que aquesta segona edició actualitzada i millorada permetrà veure com aquesta cartografia suposa un punt d'inflexió en la planificació i gestió forestal de Catalunya

Bibliografia

Magnussen, S.; Næsset, E.; Gobakken, T. (2010). «Reliability of LiDAR derived predictors of forest inventory attributes. A case study with Norway spruce». *Remote Sensing of Environment*, 114, 700-712.

Maltamo, M.; Packalén, P.; Yub, X.; Eerikainen, K.; Hyyppä, J.; Pitkänen, J. (2005). *Identifying and quantifying structural characteristics of heterogeneous boreal forests using laser scanner data*. *Forest Ecology and Management*, 216, 41-50.

McRoberts, Ronald E.; Tomppo, Erkki, O. (2010). «Advances and emerging issues in national forest inventories». *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25, 368-381.

Nelson, Ross; Krabill, William; Tonelli, John. (1998). «Estimating forest biomass and volume using airborne laser data». *Remote Sensing of Environment*, 24, 247-267.



Ariadna Just
Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)



Jordi Vayreda
Investigador del CREAM
Campus de Bellaterra (UAB), Edifici C
08193 Cerdanyola del Vallès
Spain