

Els models 3D com a aliats: com mesurar el creixement i la intensitat de poda en alzines (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) tofoneres amb tecnologia LiDAR

Jose Manuel Plata^{1,3}, Dalmau Albó¹, Daniel Oliach², Àlex Escolà^{1,3}

1 Departament de Ciència i Enginyeria Forestal i Agrícola, Universitat de Lleida, 25198, Lleida, Espanya

2 Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC), Ctra. de Sant Llorenç de Morunys, 25280, Solsona, Espanya

3 Fundació Centre de Recerca en Agrotecnologia (Agrotecnio), 25198, Lleida, Espanya

L'alzina (*Quercus ilex* L.): el bressol de la tòfona negra

L'alzina (*Quercus ilex* L.) és un dels arbres més emblemàtics i dominants dels boscos de la Conca Mediterrània Occidental. Presenta una gran variabilitat morfològica i es caracteritza per una gran resiliència en episodis de sequera. Aquesta capacitat ve conferida per múltiples adaptacions com la presència de fulles perennes i coriàcies, el desenvolupament d'un sistema radicular profund i una notable resistència als embolismes (Terradas, 1999; Peguero-Pina et al., 2014). A banda de l'aprofitament forestal de la seva llenya, molt preuada pel carboneig, els seus boscos ostenten un paper ecosistèmic clau en la conservació del sòl i de la biodiversitat. Una part d'aquest rol ecològic tan rellevant es relaciona amb les associacions simbiòtiques que les seves arrels formen amb una gran varietat de fongs, a través de les anomenades ectomicorrizes. Entre d'altres, i tal i com ocorre amb altres quercínies, l'alzina pot créixer associada a la tòfona negra (*Tuber melanosporum* Vittad.). Mitjançant el contacte directe entre les arrels i les hifes, l'arbre transfereix el carboni fotosintetitzat al fong i, a canvi, rep l'aigua i els nutrients que el simbiota captura del sòl. De fet, l'arbre participa de forma activa en la transferència de carboni cap al fong durant el procés de formació i de creixement dels carpòfors pel que és d'esperar que l'estructura i el vigor de l'hoste tinguin una influència directa sobre la producció (Le Tacon et al., 2013).

La tecnologia 3D: els ulls de l'Agricultura de Precisió

Per monitorar cultius llenyosos de manera eficient, l'Agricultura de Precisió (AP) utilitza tecnologies d'avantguarda com la LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Els sistemes basats en LiDAR funcionen mitjançant l'emissió de milers de polsos de llum làser que impacten en els diferents elements de l'escena escanejada (com fulles, branques o el terra) i retornen al sensor. El dispositiu mesura el temps que triga cada pols a fer el viatge d'anada i tornada per a calcular la distància exacta entre el sensor i l'objecte. Conjuntament amb altres sensors incorporats, com sensors GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), pot conèixer la seva posició i les coordenades exactes de l'impacte. Registrant una gran quantitat d'aquestes dades, cadascuna amb les seves coordenades (X, Y, Z), es genera un núvol de punts tridimensional, el qual reconstrueix amb alta

fidelitat l'entorn del sistema. En una plantació, aquest núvol de punts permet determinar les característiques geomètriques dels arbres (p. ex., alçada, amplada i volum), així com els seus trets estructurals (p. ex., porositat i superfície foliar), aportant una informació complementària de gran valor per a la gestió dels cultius (Rosell i Sanz, 2012). Disposar d'aquestes dades permet dissenyar i aplicar estratègies de gestió específiques, adaptades a la realitat estructural i a les característiques de cada zona de la parcel·la.

Aplicació de la tecnologia LiDAR a la tubercultura: objectius i procés d'escaneig

L'aplicació de la tecnologia LiDAR a la tubercultura permet realitzar una caracterització estructural d'alta precisió de les plantacions. Aquesta eina facilita la quantificació de l'impacte d'intervencions com la poda, així com l'avaluació de la taxa de creixement real de l'arbrat. L'objectiu principal d'aquest treball ha estat avaluar el potencial dels models tridimensional obtinguts mitjançant un seguiment exhaustiu de l'evolució morfoestructural de les alzines durant la campanya del 2025. Per a il·lustrar-ho, es presenta un cas d'estudi centrat en dues alzines (*Quercus ilex* subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) de deu anys d'edat en una finca productora de *Tuber melanosporum* situada a Querol (Alt Camp). Una d'aquestes alzines va estar sotmesa a un tractament d'esporga mentre que a l'altra no s'hi va fer cap intervenció, anomenats arbre podat i control respectivament. Per a obtenir els núvols de punts tridimensionals, s'ha utilitzat un sistema d'escaneig portàtil basat en tecnologia LiDAR (model bMS3D de l'empresa Viametris) transportat en un vehicle elèctric tot terreny. L'escaneig es realitza passant pels carrers de la plantació obtenint informació de tots els arbres a un rang de 100 m dels sensor, les dades en brut es processen amb programari especialitzat i s'editen manualment amb l'eina CloudCompare per extreure soroll i etiquetar els elements a analitzar. Finalment, mitjançant algorismes propis s'aconsegueix obtenir informació sobre les característiques morfoestructurals dels arbres (**Figura 1**).

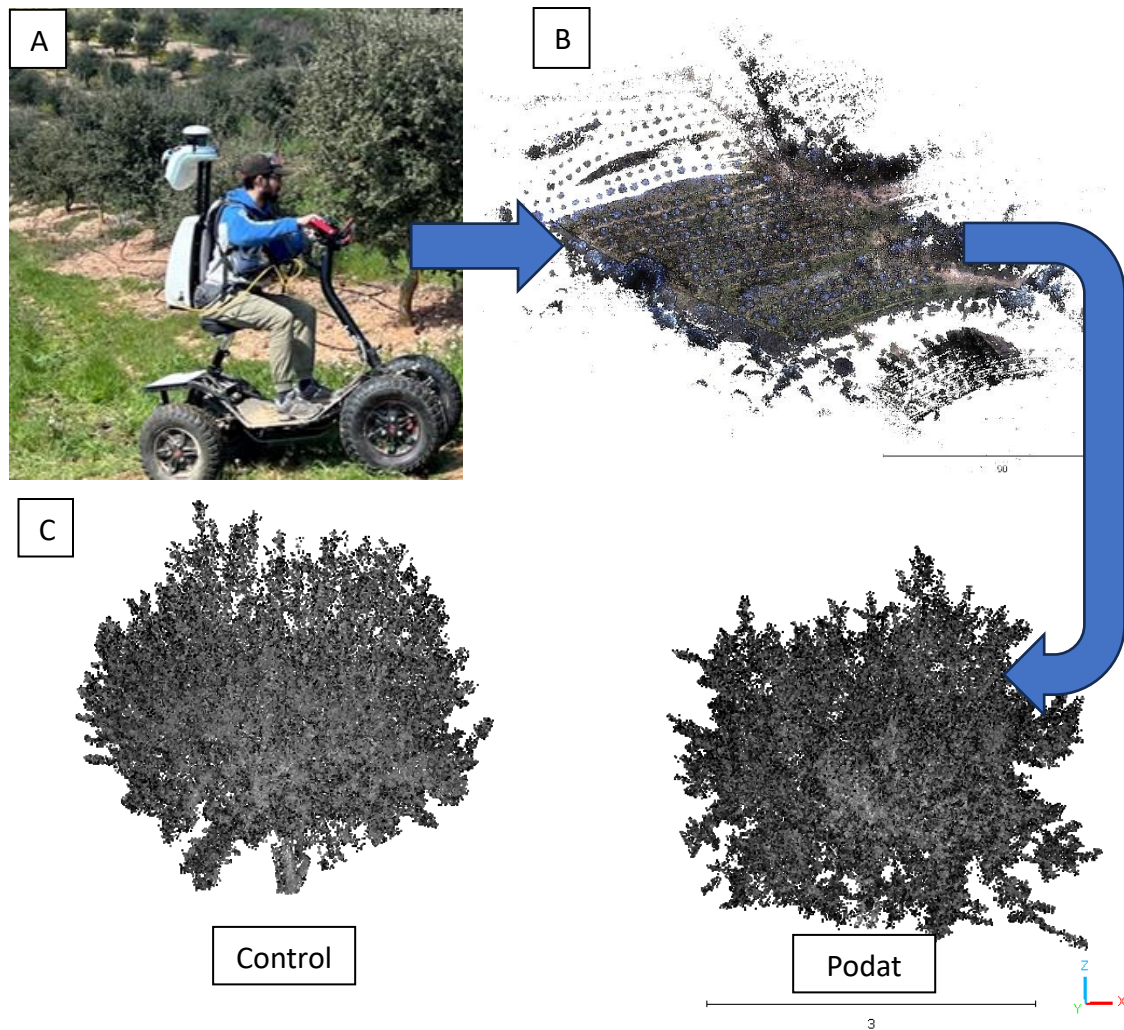


Figura 1. Representació de la generació i extracció de la vegetació d'una parcel·la d'alzines tofoneres. A) Sistema d'escaneig portàtil Viametris bMS3D transportat amb un vehicle elèctric tot terreny. B) Representació del núvol de punts obtingut mitjançant el sistema LiDAR Viametris del sector que inclou els arbres estudiats. C) Vista lateral de les alzines al final de la campanya 2025, una vegada feta l'extracció del terra i la neteja del núvol de punts. A l'esquerra podem observar l'arbre sense intervencions (control) i a la dreta l'arbre podat.

Anàlisi quantitativa: què ens diuen els núvols de punts?

Els resultats de la campanya de monitoratge han demostrat el potencial del LiDAR terrestre com a eina d'anàlisi estructural en les alzines tofoneres. L'escaneig basat en sistemes LiDAR ha permès detectar amb gran exactitud el desenvolupament vegetatiu dels arbres al llarg del període vegetatiu, mesurant de forma precisa l'increment de biomassa des de la brotada primaveral fins a l'inici de la latència hivernal. Com es pot apreciar a la **Figura 2**, que mostra l'evolució de l'estructura tridimensional dels exemplars seleccionats, aquesta tecnologia reflecteix l'arquitectura de la capçada i el guany real de volum. Les dades mostren que per l'arbre control, en el primer escaneig (26/03/2025), es va obtenir un volum de capçada de $5,4 \text{ m}^3$ mentre que al final de la campanya (28/10/2025) el volum havia incrementat fins a $9,8 \text{ m}^3$. En el cas de l'arbre podat a l'inici de temporada es va obtenir $6,6 \text{ m}^3$ de volum de capçada mentre que a finals de

campanya tenia 8 m³. El increment del volum en l'arbre control va ser del 80 % mentre que en l'arbre podat al voltant del 20 %. Els resultats son raonables tenint present que l'arbre podat va tenir una extracció de biomassa durant la intervenció de la poda.

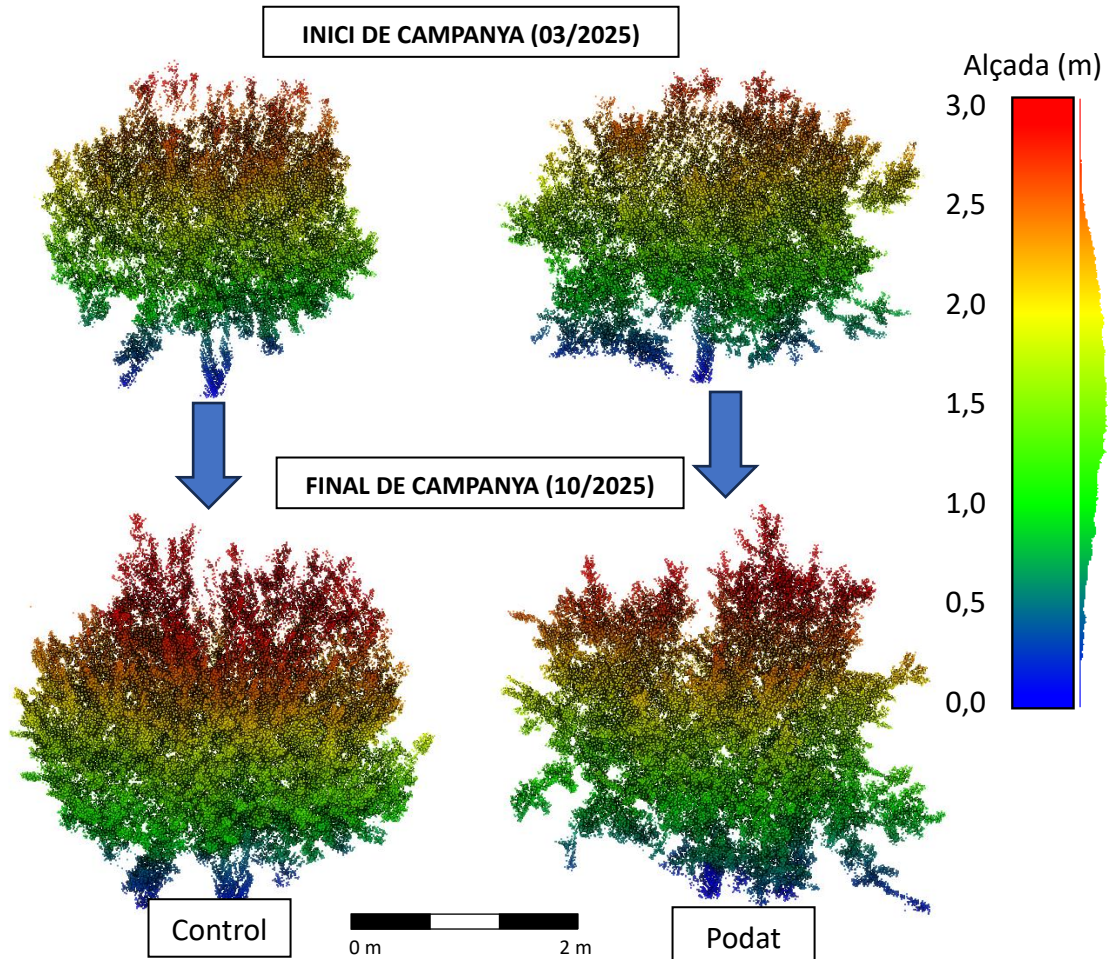


Figura 2. Vista lateral dels núvols de punts de dos exemplars d'alzines de la finca productora de Querol en dos moments de la campanya 2025. Els colors són proporcionals a l'alçada dels punts sobre terra. A l'esquerra podem observar l'arbre sense intervencions (control) i a la dreta l'arbre podat.

Més enllà d'aquesta visió general, l'avantatge d'aquesta tecnologia rau en la capacitat per extreure al detall els paràmetres morfoestructurals clau de cada exemplar de manera individualitzada, com seria la superfície de la capçada projectada sobre el terreny, l'alçada total o el volum de la capçada. L'anàlisi d'aquests paràmetres permet conèixer millor les dinàmiques dels arbres al llarg del temps. Si entrem en detall, i utilitzant com a moment inicial la intervenció, podem veure que a partir de l'estadi postpoda (09/04/2025) i al llarg de les tres rebrotades (Reb) posteriors (Reb1: 29/05, Reb2: 28/07 i Reb3: 28/10), les dues alzines han mostrat una clara dinàmica d'expansió. L'arbre control ha seguit una evolució altament progressiva i lineal: la seva alçada va passar de 3 m a 4 m i la seva amplada es va eixamplar de manera homogènia (de 3,1 m per 3 m a 3,8 m per 3,7 m. Per la seva banda, l'arbre podat va registrar una espectacular estirada vertical que el va portar a tancar la campanya com l'exemplar més alt (4,2m) partint de

una alçada més baixa (2,8 m). Aquest creixement de l'arbre podat es va concentrar de forma més asimètrica en l'amplada de l'eix X (arribant a 4 m) en contraposició a l'eix Y (3,5 m).

Com s'ha indicat anteriorment, un dels assoliments més significatius d'aquesta metodologia ha estat la capacitat de detectar i quantificar amb exactitud la fracció de biomassa extreta durant la poda, una de les intervencions menys estudiades en la truficultura. Mitjançant la comparació directa dels núvols de punts obtinguts abans i després de l'actuació, és possible determinar el percentatge exacte de biomassa eliminada de cada exemplar, de la mateixa manera que es calcula el percentatge de biomassa guanyat en cada rebrotada posterior. Aquesta mètrica no només permet quantificar la intensitat del tractament realitzat, sinó que estableix l'estat basal o de referència per fer un seguiment de la dinàmica i la recuperació de l'alzina (**Figura 3**). Concretament, la comparació entre els estadis de prepoda i postpoda ha revelat que l'arbre control presenta una variació volumètrica pràcticament nul·la, de tan sols el 0,1%, un fet completament lògic atès que no va patir cap intervenció. En canvi, en el cas de l'arbre podat, s'ha registrat una disminució del 20% del volum de la capçada, reflectint amb precisió l'impacte de la retirada de biomassa. A partir d'aquest punt inicial, es pot avaluar detalladament la resposta fisiològica de l'arbre a la intervenció, registrant la distribució espacial i el ritme del nou creixement orientat a la regeneració de la capçada.

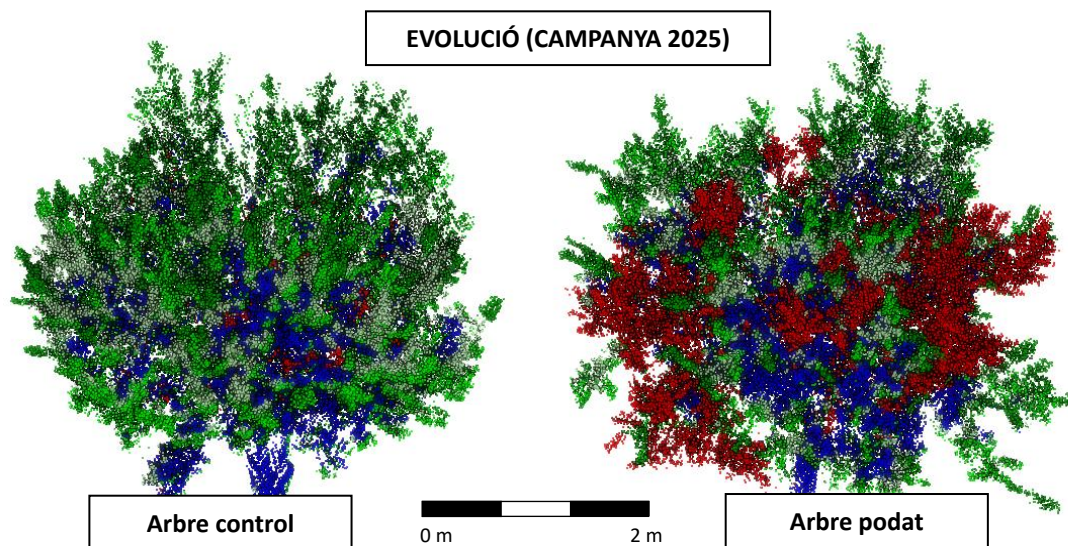


Figura 3. Vista lateral dels núvols de punts de dos arbres que representen l'evolució durant la campanya 2025-2026. Un no es va podar (esquerra) i l'altre sí (dreta). Aquests núvols s'ha elaborat a partir de la comparació i superposició dels núvols produïts en diferents moments de la campanya 2025. S'observen les branques extretes durant la poda (**PRE-PODA**) i l'estat de l'arbre un cop finalitzada la poda (**POST-PODA**) i les posteriors rebrotades fetes fins la finalització de la campanya (**REB-1, REB-2 i REB-3**).

Conclusions

La integració de la tecnologia LiDAR per a la caracterització de les alzines tofoneres obre noves perspectives cap a una progressiva digitalització i tecnificació del sector. Aquesta metodologia es perfila com una eina de gran valor per a la recerca i el suport a la gestió de les finques, capaç de caracteritzar amb gran exactitud tant el desenvolupament vegetatiu de la biomassa com l'impacte directe de pràctiques com la poda. Disposar d'aquests models tridimensionals permet avaluar variables geomètriques i estructurals de cada exemplar de manera individualitzada o extrapolable a nivell de finca. Això facilita l'anàlisi de la seva evolució temporal, garanteix la traçabilitat de les intervencions realitzades i ofereix dades clau per a l'optimització de les operacions de maneig, millorant així l'eficiència i la sostenibilitat de les explotacions.

Agraïments

Aquest article divulgatiu s'emmarca en la col·laboració entre Agrotecnio, a través del grup de Recerca en Agròtica i Agricultura de Precisió (GRAP), i el CTFC, mitjançant el grup de Micologia i Tubericultura, dins del projecte DIPROTES. Activitat cofinançada per la UE a través de la intervenció 7201 del Pla estratègic de la PAC 2023-2027.

Referències

Coleman, M. D., Berch, S., Bonito, G., Allen, B., Andrews, E., Arechiga Carvajal, E. T., Cook, S. P., D'Amours, C., Garibay-Orijel, R., Guevara, G., Hatzenbuehler, P., Hawkins, B., Heinse, R., Kernaghan, G., Lefevre, C., Lemmond, B., Meadows, I. M., Oneto, S., Sharma, J., Strawn, D. G., Tanney, J. B., Türkoğlu, A., Uehling, J., Winfree, J., & Smith, M. E. (2024). Status of truffle science and cultivation in North America. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06822-4>

Le Tacon, F., Zeller, B., Plain, C., Hossann, C., Bréchet, C., & Robin, C. (2013). Carbon Transfer from the Host to Tuber melanosporum Mycorrhizas and Ascocarps Followed Using a ¹³C Pulse-Labeling Technique. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064626>

Pasztor, L., Kisdi, E., & Meszner, G. (2000). Jensen's inequality and optimal life history strategies in stochastic environments. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(3), 117–118. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(99\)01801-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(99)01801-7)

Peguero-Pina, J.J.; Sancho-Knapik, D.; Barrón, E.; Camarero, J.J.; Vilagrosa, A.; Gil-Pelegrín, E. (2014). Morphological and Physiological Divergences within *Quercus ilex* Support the Existence of Different Ecotypes Depending on Climatic Dryness. *Ann. Bot.*, 114, 301–313.

Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007>

Rozenstein, O., Cohen, Y., Alchanatis, V., Behrendt, K., Bonfil, D. J., Eshel, G., Harari, A., Harris, W. E., Klapp, I., Laor, Y., Linker, R., Paz-Kagan, T., Peets, S., Rutter, S. M., Salzer, Y., & Lowenberg-DeBoer, J. (2024). Data-driven agriculture and sustainable farming: Friends or foes? *Precision Agriculture*, 25, 520–531. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10061-5>