



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură şi Exploatare Forestiere

Florinel CAPALB

Utilizarea datelor integrate de teledetecţie achiziţionate de senzori activi şi pasivi pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor şi analiza creşterii radiale a acestora în arborete din vestul Carpaţilor Meridionali

Utilization of integrated remote sensing data acquired by active and passive sensors for estimating tree dendrometric characteristics and analyzing radial growth in forest stands of the Western Southern Carpathians

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Acad. Nicolae Ovidiu BADEA

BRAŞOV, 2026

CUPRINS

LISTA ABREVIERILOR	3
PREFAȚĂ	6
1. INTRODUCERE	7
2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR	10
2.1. SCOPUL CERCETĂRILOR	10
2.2. OBIECTIVELE CERCETĂRILOR.....	10
3. MATERIALUL ȘI METODA DE CERCETARE	11
3.1. LOCALIZAREA CERCETĂRILOR	11
3.2. MATERIALUL DE CERCETARE.....	11
3.3. PROCESAREA ȘI PRELUCRAREA STATISTICĂ A DATELOR	14
4. REZULTATE OBȚINUTE	17
4.1. INVENTARIEREA STATISTICĂ A ARBORILOR ȘI ARBORETELOR ÎN CADRUL REȚELELOR DE CERCETARE	17
4.2. CARACTERISTICILE DENDROMETRICE ALE ARBORILOR DETERMINATE PRIN SCANAREA CU LASER TERESTRU ȘI UAV	23
4.3. CARACTERISTICILE PROBELOR DE CREȘTERE RADIALĂ ANALIZATE	33
4.4. MODELAREA CREȘTERII RADIALE A ARBORILOR ÎN RAPORT CU DIMENSIUNILE COROANEI ȘI COMPETIȚIA ARBORILOR	34
5. CONCLUZII	43
6. CONTRIBUȚII ORIGINALE	49
7. DISEMINAREA REZULTATELOR.....	51
LISTA DE TABELE.....	54
LISTA DE FIGURI	55
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ	57
SCURT REZUMAT	64
SHORT ABSTRACT	65

LISTA ABREVIERILOR

UAV	Vehicule aeriene fără pilot
LiDAR	Detecția luminii și a distanței
ALS	Scanare laser aeropurtat
TLS	Scanare laser terestru
dbh	Diametrul de bază măsurat la 1,3 m înălțime față de sol
h	Înălțimea arborelui
MLS	Scanare laser mobil
AI	Inteligență artificială
3D	Tridimensional
B.E.	Bază Experimentală
UP	Unitate de Producție
UAT	Unitate Administrativ Teritorială
EEA	Agenția Europeană de Mediu (European Environment Agency)
RS	Rețea sistematică
SP	Sondaj permanent
SPP	Suprafață de probă permanentă
N_i	Indicativul sondajului „i”
$C_1; C_2$	Indicativul centrelor suprafețelor de probă permanente
GPS	Sistem de poziționare globală
h_c	Înălțimea coroanei
SfM	Structură-din-mișcare (Structure from Motion)
N; E; S; V	Puncte cardinale: nord, est, sud, vest
.rwf	Fișiere de format Tucson
CI	Indici de competiție
x,y	Coordonate carteziene
N	Numărul total al arborilor de referință
TP	Numărul arborilor detectați corect (arbori corespondenți)
FN	Numărul arborilor de referință care nu sunt detectați
FP	Numărul de arbori segmentați din norii de puncte dar care nu corespund niciunui arbore de referință
C	Acuratețea de detecție
e_{om}	Eroarea de omisiune
e_{com}	Eroarea de comisie
RMSE	Eroarea medie pătratică
RRMSE	Eroarea medie pătratică procentuală
MAE	Eroarea absolută medie
R^2	Coeficientul de determinație
TRW	Lățimea inelului
BAI	Creșterea în suprafața de bază
CSV	Variabile ale coroanei arborilor derivate din norii de puncte
ϵ_i	Eroarea reziduală
VIF	Factorul de caracterizare a varianței

AIC; BIC	Criterii statistice utilizate pentru selecția modelelor
rețea FA	Rețea de cercetare de fag
$\overline{dbh}$	Diametrul mediu aritmetic
$\bar{h}$	Înălțimea medie aritmetică
rețea MO	Rețea de cercetare molid
rețea AM	Rețea de cercetare amestec (molid, fag)
sd	Abaterea standard
$\overline{CBH}$	Media înălțimii bazei coroanei
$\overline{CPA}$	Media ariei coroanei
FA	Specia fag
MO	Specia MO
s%	Coeficient de variație
SP 6; SP 84; SP 91; SP 28; SP 26; SP 39; SP 38; SP 24	Sondaje permanente din rețelele de inventariere
r	Coeficient de corelație Pearson
r^2	Raport de corelație
SPP 232	Suprafață permanentă de probă din rețeaua de cercetare AM
χ^2	Testul statistic de conformitate Chi pătrat
Wilcoxon	Analiza rangurilor
Q1	Cuartila inferioară
Q3	Cuartila superioară
CD	Diametrul coroanei
HCB	Înălțimea până la baza coroanei
CL	Lungimea coroanei
asim	Asimetria coroanei
R_{max}	Raza maximă a coroanei arborelui
R^2	Coeficient de determinație
CCC	Coeficientul de corelație a concordanței (Lin's Concordance Correlation Coefficient)
Bias	Tendința de îndepărtare de valoarea medie
df	Numărul gradelor de libertate
KS	Testul statistic Kolmogorov - Smirnov
ANOVA	Analiza varianței
AIC	Criteriul informațional Akaike
cvTRW	Coeficientul de variație al lățimii inelelor
CR	Raza coroanei
CSLC	Raportul dintre lungimea coroanei și raza coroanei
rețea	Rețea de inventariere statistică (AM, FA, MO)
CLz	Lungimea coroanei standardizată, m
CDz	Diametrul coroanei standardizat
Clz	Indicele de competiție standardizat
TRWz	Lățimea inelului standardizată
SEM	Model de ecuații structurale

CFI	Indice de potrivire relativă (Comparative Fit Index)
SRMR	Valoarea reziduală medie standardizată (Standardized Root Mean Square Residual)
year	Anul observației
tree_id	Număr de identificare al arborelui
R^2_m	Coeficientul de determinație marginal
R^2_c	Coeficientul de determinație condițional

PREFAȚĂ

În ultimele decenii, dezvoltarea tehnologiilor de teledetecție și creșterea accesibilității datelor geospațiale au determinat schimbări semnificative în modul de analiză și monitorizare a ecosistemelor forestiere. Integrarea datelor achiziționate prin senzori activi și pasivi permite obținerea unor informații detaliate privind structura arboretelor și caracteristicile dendrometrice ale arborilor, contribuind la dezvoltarea unor metode moderne de evaluare și monitorizare a ecosistemelor forestiere.

Teza de doctorat *„Utilizarea datelor integrate de teledetecție achiziționate de senzori activi și pasivi pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și analiza creșterii radiale a acestora în arborete din vestul Carpaților Meridionali”* se înscrie în direcția acestor preocupări științifice și urmărește aplicarea unor metode integrate de analiză bazate pe utilizarea datelor obținute prin scanare cu laser terestru, platforme UAV (vehicule aeriene fără pilot) și măsurători realizate cu ocazia inventarierilor clasice. Cercetările efectuate au avut în vedere determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și ale coroanelor acestora, precum și evaluarea relațiilor dintre structura arboretelor, intensitatea competiției și creșterea radială a arborilor.

Realizarea acestor obiective nu ar fi fost posibilă fără sprijinul neconținut al conducătorului științific domnul Acad. Nicolae Ovidiu Badea, căruia îi adresez întreaga mea recunoștință și sincere mulțumiri pentru efortul depus, susținerea și răbdarea de care a dat dovadă în îndrumarea competentă și permanentă pe întreg parcursul elaborării și realizării acestei teze de doctorat, precum și pentru contribuția sa esențială la formarea mea profesională.

Mulțumesc, pe această cale, domnilor Prof. dr. ing. Iosif Vorovencii, Prof. dr. ing. Gheorghe Marian Tudoran și CS I dr. ing. Bogdan Apostol pentru sfaturile, observațiile și recomandările formulate cu ocazia susținerii rapoartelor științifice și pe parcursul elaborării tezei.

Îmi exprim sincera apreciere și adresez mulțumiri colegilor mei din cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea” pentru sprijinul și încurajările oferite pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat, în mod special domnilor dr. ing. Marius Petrila, dr. ing. Adrian Lorentz și doamnei geograf Cristiana Marcu. Adresez, de asemenea, respectuoase mulțumiri domnilor dr. ing. Ștefan Leca, dr. ing. Alexandru Dobre, ing. Cristian Angheluș, ing. Gabriel Nedea, ing. Costin Barbu și tehn. Răducu Stănculeanu pentru sprijinul acordat în activitățile desfășurate în cadrul cercetării. Alese mulțumiri adresez domnului dr. ing. Șerban Chivulescu, pentru susținerea, sugestiile și observațiile oferite pe parcursul pregătirii și elaborării tezei de doctorat.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei, în mod special soției mele Claudia pentru susținerea morală, răbdarea și înțelegerea oferite pe întreaga perioadă de elaborare a tezei de doctorat. Un gând aparte se îndreaptă către mama mea, Victoria, care ar fi trăit cu o emoție deosebită împlinirea acestui demers academic.

Această listă de aprecieri și mulțumiri rămâne, fără îndoială, incompletă. Adresez recunoștința mea tuturor celor care, deși nenominalizați în aceste rânduri, mi-au fost alături și m-au sprijinit, direct sau indirect, pe parcursul elaborării prezentei teze de doctorat.

1. INTRODUCERE

În ultimele două decenii, rolul teledetecției în cercetarea silvică s-a extins, datele de teledetecție fiind tot mai frecvent utilizate pentru a extrage și analiza caracteristicile arborilor și arboretelor, atât pe baza senzorilor activi (Calders et al. 2020; Compeán-Aguirre et al. 2024; Corte et al. 2020; Dubayah et al. 2020; Mîzgaciu et al. 2025; Picos et al. 2020; Wallace et al. 2016), cât și a celor pasivi (Ball et al. 2023; Beloiu et al. 2023; Onishi and Ise 2021). Dintre platformele utilizate pentru achiziționarea acestor date, un rol tot mai important îl au vehiculele aeriene fără pilot (UAV), echipate cu LiDAR ori cu camere optice sau senzori multispectrali, care presupun costuri de operare reduse (Onishi and Ise 2021), dar sunt limitate din perspectiva mărimii suprafeței acoperite, precum și a capacității de transport, care condiționează tipul și greutatea senzorilor ce pot fi adăugați.

Teledetecția bazată pe utilizarea datelor de înaltă rezoluție achiziționate cu senzori activi și pasivi, rezultate din scanarea cu laser aeropurtat (ALS), scanarea cu laser terestru (TLS), precum și achiziționate de UAV, reprezintă un domeniu de cercetare intensă pentru caracterizarea ecosistemelor forestiere (Calders et al. 2020; Dobre et al. 2021; Shang et al. 2019). Deși sistemele ALS sunt eficiente pentru acoperirea unor zone extinse, acestea întâmpină dificultăți în detectarea precisă a vegetației forestiere de la nivelul solului și nu permit o reprezentare detaliată a trunchiurilor arborilor (So et al. 2025). În acest context, TLS se evidențiază ca o tehnologie capabilă să obțină nori de puncte tridimensionali (Fan et al. 2020; He et al. 2025), care oferă informații detaliate pentru caracterizarea structurii pădurii (Griese, Ritzert and Nölke 2025; Pascu et al. 2019; Wang et al. 2021), în special de sub coronamentul acesteia (He et al. 2025; White et al. 2016; Zhou et al. 2023). Însă utilizarea scanării terestre are limitări atunci când se aplică pe suprafețe extinse, din cauza mobilității reduse și a naturii sale statice. Totodată, trebuie precizat că, efectul de ocluzie (obturarea parțială sau totală a suprafețelor țintă de către elemente ale vegetației – frunze, ramuri, trunchiuri) (Jiang et al. 2021) este una dintre principalele limitări ale utilizării în domeniul forestier (Mîzgaciu et al. 2025).

Pe de altă parte, imaginile obținute cu UAV echipate cu camere optice sau multispectrale permit generarea, prin tehnici fotogrammetrice, a modelelor digitale de suprafață și a modelelor coronamentului, facilitând descrierea structurii acestuia și identificarea arborilor sau a coroanelor individuale (Griese, Ritzert and Nölke 2025). În raport cu TLS, achiziția datelor cu UAV permite obținerea unor nori de puncte, pe suprafețe mai mari, dar cu densități mai mici (Chen et al. 2024). Utilizate separat, TLS și UAV, conduc la ocluzii semnificative, însă TLS tinde să subestimeze vârful arborilor din cauza perspectivei pe care o are, de jos în sus (Terry et al. 2022), necesitând măsurători complementare de deasupra coronamentului arborilor (Schneider et al. 2019).

Potențialul TLS pentru monitorizarea pădurilor a fost evidențiat pentru prima dată la începutul anilor 2000. Inițial, aplicațiile s-au concentrat pe măsurarea arborelui și a părților lui componente, precum și a diametrului de bază (dbh) al arborilor (Wezyk et al. 2007), înălțimii totale a arborilor (h) (García et al. 2011), în cele din urmă evoluând către estimarea volumului arborilor (Abegg et al. 2023; Pitkänen et al. 2021), cu scopul de a îmbunătăți estimarea biomasei supraterane (Demol et al. 2022; Liang et al. 2016) precum și poziția arborilor în arboret (Bienert et al. 2018; Bogdanovich et al. 2021; Maas et al. 2008; Olofsson, Holmgren and Olsson 2014; Srinivasan et al. 2015). La acestea se adaugă și evoluția în ceea ce privește determinarea structurii tridimensionale a coroanei (Han and Sánchez-Azofeifa 2022; Zhu, Kleinn and Nölke 2020), oferindu-se în acest mod o perspectivă detaliată asupra vegetației forestiere.

Mai mult, scanarea laser terestră oferă ample posibilități de a reprezenta forma coroanei cât mai precis (Calders et al. 2020; Olivier, Robert and Fournier 2016), facilitând accesul la caracteristicile coroanei (Pretzsch 2021), ceea ce creează condițiile necesare pentru a explica legătura dintre forma coroanei și lățimea inelelor anuale (Ahmed and Pretzsch 2023; Kröner et al. 2024). Similar inelelor anuale, forma coroanei păstrează informații privind modul de dezvoltare anterioară a arborilor. Coroana poate fi influențată de factori abiotici, precum vântul dominant sau panta terenului (Perles-Garcia et al. 2022). Însă, concurența (competiția la nivelul coroanelor) dintre arbori reprezintă factorul principal ce determină forma acesteia. În general, coroanele arborilor tind să se dezvolte în sens opus arborilor predominanți sau a celor mai apropiați vecini, ocupând golurile din coronament (Purves, Lichstein and Pacala 2007).

Ca răspuns la condițiile de mediu și competiție, fiecare arbore își dezvoltă o coroană proprie (Penanhoat et al. 2024) prin care își optimizează accesul la lumină și la celelalte resurse, maximizând astfel potențialul de creștere (Jucker et al. 2025). Forma coroanei și distribuția ramurilor sunt trăsături deosebit de dinamice, care permit arborilor să se adapteze la variațiile condițiilor de mediu. În acest fel, coroanele arborilor reflectă rezultatul interacțiunilor complexe dintre procesele de creștere în raport cu condițiile de mediu, ce influențează în mod direct creșterea curentă a arborilor (Bayer, Seifert and Pretzsch 2013; Kröner et al. 2024).

Odată cu utilizarea pe scară largă a datelor LiDAR terestre și aeropurtate, precum și a norilor de puncte achiziționați cu UAV, cercetările asupra formei și structurii tridimensionale a coroanei s-au intensificat (Arrizza et al. 2024; Weiser et al. 2022). La nivel internațional, numeroase studii au demonstrat potențialul TLS de a descrie cu precizie structura arboretelor și de a completa, respectiv a îmbunătăți, informațiile din inventarul forestier tradițional (Holvoet et al. 2025).

Ulterior, integrarea datelor de teledetecție TLS cu ALS a fost utilizată pentru a estima cu precizie biomasa și stocurile de carbon, prin coroborarea informațiilor obținute la nivel de arbore cu acoperirea extinsă oferită de scanarea aeropurtată (Bazezew, Hussin and Kloosterman 2018; Giannetti et al. 2018). În paralel, studii recente au utilizat UAV echipate cu camere optice de înaltă rezoluție sau LiDAR pentru a descrie structura coronamentului, golurile din coronament, precum și stratificarea coroanelor arborilor (Mohan et al. 2017; Nasiri et al. 2021; Solano et al. 2022).

În contextul modelării creșterii, o direcție actuală o reprezintă utilizarea parametrilor coroanei derivați din teledetecție în modele de creștere (Ahmed and Pretzsch 2023). Studii recente au arătat că includerea acestora (lungimea coroanei, înălțimea coroanei, suprafața de proiecție ș.a.) poate îmbunătăți semnificativ acuratețea modelelor de creștere (Ahmed and Pretzsch 2023; Pretzsch 2021). Astfel, relațiile dintre forma coroanei derivată din TLS și lățimea inelelor anuale au fost investigate pentru mai multe specii forestiere, evidențiind faptul că forma actuală a coroanei poate explica atât variația creșterii radiale, cât și răspunsul arborilor la factorii de stres (Ahmed et al. 2025; Kröner et al. 2024).

În România, utilizarea tehnologiilor de teledetecție pentru caracterizarea structurii pădurilor și a dinamicii acestora a cunoscut o dezvoltare rapidă. Primele aplicații TLS au urmărit compararea metodelor moderne de colectare a datelor cu cele clasice de inventariere forestieră (Apostol et al. 2018), ulterior fiind dezvoltate studii care utilizează scanarea terestră pentru estimarea caracteristicilor structurale ale arboretelor și derivarea unor indici de structură la nivel de parcelă (Pascu et al. 2019, 2020).

În paralel cu consolidarea aplicațiilor TLS, au fost dezvoltate și fluxuri de lucru automatizate care integrează scanarea LiDAR mobil (MLS) cu platforme de inteligență artificială (AI) (Wielgosz et al. 2024). În acest context, Niță (2021) a testat și validat un flux de lucru automat de procesare a norilor de puncte 3D, orientat către segmentarea arborilor individuali, obținând o acuratețe ridicată a segmentării.

Integrarea TLS și ALS a fost aplicată pentru evaluarea serviciilor ecosistemice forestiere prin corelarea parametrilor structurali derivați din nori de puncte cu indicatori ecologici (Dobre et al. 2021). Mai recent, utilizarea datelor de teledetecție achiziționate cu senzori pasivi a permis dezvoltarea unor modele de cartare națională a caracteristicilor pădurilor pe baza imaginilor satelitare (Dinca et al. 2017; Vorovencii 2024) și a algoritmilor de tip învățare automată (Keskes et al. 2025), în timp ce cercetări aplicate au demonstrat potențialul platformelor UAV, echipate cu LiDAR ori cu camere optice, pentru estimarea parametrilor dendrometrici și a structurii arboretelor în diverse tipuri de păduri din România (Mîzgaciu et al. 2025; Tudoran 2022).

Lucrarea de doctorat își propune utilizarea datelor de teledetecție achiziționate cu senzori activi și pasivi pentru dezvoltarea unor modele de creștere la nivel de arbore și arboret, calibrate pentru arboretele din vestul Carpaților Meridionali. În acest scop, cercetările au urmărit estimarea caracteristicilor structurale ale arborilor și arboretelor prin aplicarea tehnicilor specifice teledetecției și obținerea parametrilor dendrometrici prin procesarea și segmentarea norilor de puncte. Verificarea rezultatelor s-a realizat prin analiza comparativă a performanței modelelor de creștere dezvoltate pe baza datelor de teledetecție în raport cu informațiile obținute cu ocazia inventarierii arborilor.

2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR

2.1. SCOPUL CERCETĂRILOR

Cercetările efectuate cu ocazia elaborării tezei de doctorat au avut drept **scop** fundamentarea științifică și aplicarea tehnicilor de teledetecție privind utilizarea integrată a datelor achiziționate de senzori activi și pasivi cu măsurătorile din teren efectuate prin inventarieri în suprafețe de probă permanente, pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și ale coroanelor acestora și analiza creșterii radiale, în arborete din vestul Carpaților Meridionali.

2.2. OBIECTIVELE CERCETĂRILOR

Pentru atingerea scopului propus, s-a urmărit îndeplinirea următoarelor obiective specifice:

- ❖ estimarea unor caracteristici dimensionale ale arborilor și coroanelor acestora prin utilizarea datelor integrate obținute prin tehnici ale teledetecției prin măsurători de teren;
- ❖ dezvoltarea unor modele de creștere radială la arbori pe baza caracteristicilor coroanelor acestora și a indicilor de competiție la nivel de arboret obținute prin teledetecție;
- ❖ analiza creșterii radiale a arborilor și arboretelor dezvoltate pe baza datelor și informațiilor obținute prin tehnici ale teledetecției în raport cu cele obținute pe baza măsurătorilor efectuate cu ocazia inventarierilor de teren.

3. MATERIALUL ȘI METODA DE CERCETARE

3.1. LOCALIZAREA CERCETĂRILOR

Cercetările s-au desfășurat în arborete pure de fag (FA) și de molid (MO) dar și amestecate de molid cu fag (AM) situate în partea de vest a Carpaților Meridionali, mai precis în Munții Țarcu, situați în partea nord-vestică a grupeii Retezat-Godeanu, unitate montană cu atitudini ce depășesc 2100 m. În mod concret, zona selectată pentru desfășurarea acestor cercetări este amplasată în raza Bazei Experimentale (B.E.) Caransebeș, în cadrul Unității de Producție (UP) VI Cuntu (Figura 3.1).

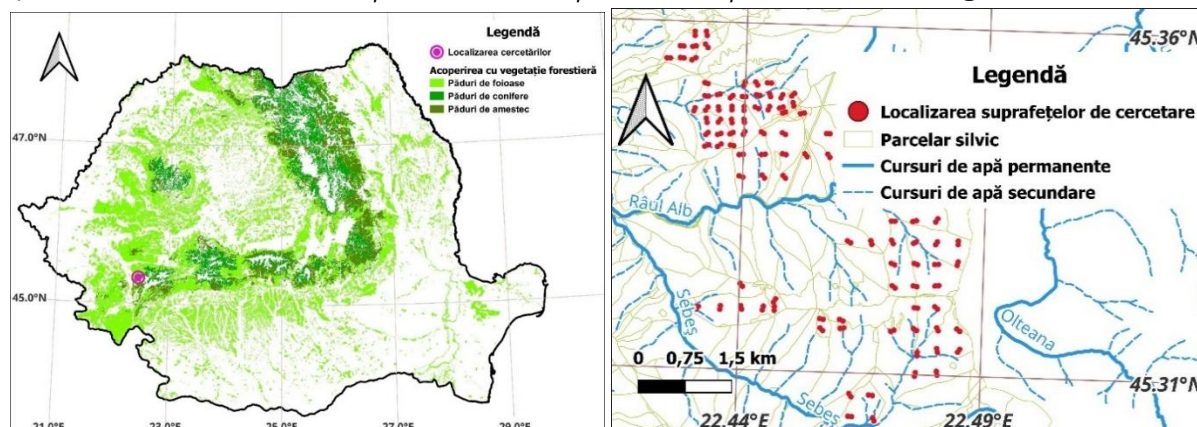


Figura 3.1 – Localizarea suprafețelor de cercetare în raport cu distribuția acoperirii cu vegetație forestieră la nivel național. Fundalul cartografic reprezintă clasele de vegetație forestieră derivate din CORINE Land Cover (European Environment Agency (EEA) 2020), păduri de foioase (clasa 311), păduri de conifere (clasa 312) și păduri de amestec (clasa 313). Punctele/suprafețele (culoare roșie) indică amplasamentul rețelei de inventariere statistică.

3.2. MATERIALUL DE CERCETARE

În vederea caracterizării arboretelor din zona de cercetare a fost proiectată o rețea de suprafețe de cercetare statistică nesistematică, cu rolul de a caracteriza, din punct de vedere biometric arboretele echine sau relativ echine de fag, molid și precum și cele de amestec (molid cu fag) din UP VI Cuntu. Motivul pentru care rețeaua de suprafețe este nesistematică la nivelul întregii zone se datorează faptului că aceasta nu este dimensionată unitar după o singură grilă aplicată pe întreaga zonă de cercetare, ci rezultă din combinarea a trei rețele statistice sistematice (RS), proiectate în raport cu specia (fag, molid), compoziția (pure – fag, molid; amestec de molid cu fag) și vârsta (arborete echine sau relativ echine).

Dimensionarea rețelelor statistice sistematice, respectiv stabilirea numărului optim de sondaje (SP) și a distanței dintre acestea, s-a realizat utilizând informații privind coeficientul de variație al volumului calculat pe baza informațiilor cuprinse în amenajamentul silvic al UP VI Cuntu (B.E. Caransebeș, ediția 2016). Rețeaua de inventariere statistică nesistematică, destinată inventarierii arboretelor echine sau relativ echine de fag, molid și de amestec, a fost alcătuită din trei rețele sistematice cu desime variabilă, însumând 96 de sondaje (Tabelul 3.1) Pe baza numărului de sondaje rezultat și a distanțelor stabilite între acestea, în teren, au fost materializate suprafețele de probă permanente (SPP).

Tabelul 3.1 – Numărul de sondaje corespunzător rețelelor de inventariere statistică

Rețea de inventariere	Desime	Număr sondaje
fag (FA)	200 m x 200 m	38
molid (MO)	150 m x 150 m	10
amestec - molid, fag (AM)	350 m x 350 m	48
TOTAL		96

Fiecare sondaj (SP) a inclus două suprafețe de probă permanente (SPP), de formă circulară, cu raza de 12,62 m (suprafață 500 m²), amplasate la 30 m față de centrul sondajului, pe direcția E-V în terenuri plane, respectiv pe curba de nivel în terenuri înclinate. Pentru a înlesni următoarele inventarieri, centrul sondajului, precum și centrele celor două SPP, au fost materializate prin borne metalice (lungime 20 cm), îngropate complet, precum și prin repere din lemn (picheți) cu capătul superior la aproximativ 30 cm deasupra solului, evidențiate cu vopsea albă (Figura 3.2).

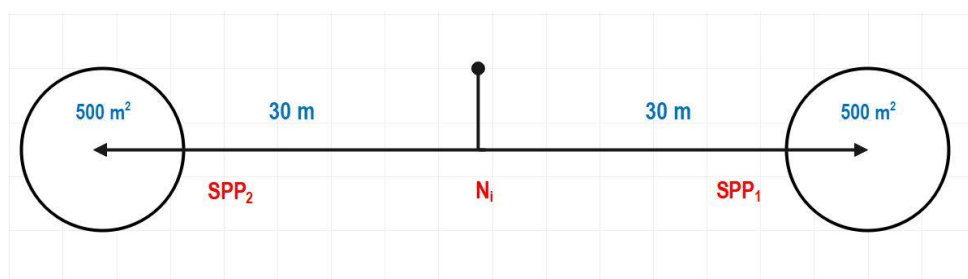


Figura 3.2 – Amplasarea suprafețelor de probă permanente ($SPP_{1,2}$) în raport cu centrul sondajului (N_i).

În cadrul fiecărei rețele statistice, inventarierea arborilor s-a realizat în fiecare SPP, prin metoda inventarierii arborilor pe picior (Badea, 2013). Au fost inventariați toți arborii cu diametrul de bază (dbh) mai mare de 60 mm. Cu ocazia inventarierii, ce a avut loc în anul 2020, pentru fiecare arbore au fost determinate și înscrise în fișa de teren următoarele caracteristici: specia, diametrul de bază (dbh), înălțimea totală (h), înălțimea coroanei (h_c), poziția cenotică (clasa Kraft), precum și informații descriptive privind vitalitatea și starea de vătămare, specificate în literatura de specialitate (Badea, 2008, 2013; Chivulescu et al. 2020).

Diametrele de bază au fost determinate utilizând clupa forestieră, gradată în mm, conform metodologiei consacrate (Giurgiu 1979). Punctul de aplicare a clupei forestiere gradată în mm pe trunchi a fost marcat cu vopsea albă printr-un semn „T”, care în terenuri plane a fost trasat pe fața orientată spre centrul SPP, în vederea înlesnirii activității de reinventariere ulterioară, iar în cazul terenurilor înclinate, în amonte. În cazul arborilor cu diametre mai mari decât deschiderea maximă a clupei, s-a măsurat circumferința, în mm, respectând aceeași regulă de poziționare din amonte în terenuri înclinate (Badea, 2013; Chivulescu et al. 2020).

Înălțimea totală a arborilor și înălțimea coroanei au fost măsurate cu hipsometrul cu ultrasunete Vertex IV. Poziția cenotică a arborilor a fost estimată în teren prin apreciere vizuală, utilizând un sistem de clasificare specific arboretelor echine și monoetajate (Badea, 2013; Pikiński et al. 2021).

Poziția arborilor și proiecția coroanei au fost determinate cu ajutorul echipamentului FieldMap conform unei metodologii precise (Petrila et al. 2012). Fiecărui arbore inventariat i s-a atribuit un număr unic de ordine, prin aplicarea unei etichete numerice, pentru a asigura comparabilitatea datelor obținute prin inventarierea clasică cu cele determinate ulterior din scanările cu laser terestru (TLS).

În cadrul suprafețelor de probă permanente (SPP), în anul 2021 au fost efectuate măsurători specifice utilizând un scanner laser terestru static, model FARO 3D X130 HDR (Apostol et al. 2018). Acest echipament aparține clasei scannerelor phase-shift¹ (FARO Technologies Inc 2019), fiind proiectat pentru aplicații de scanare la distanțe medii și mici oferind o precizie ridicată a măsurătorilor, adecvat descrierii tridimensionale a structurii arboretelor (Apostol et al. 2018).

În cadrul fiecărei SPP s-au efectuat măsurători cu ajutorul TLS prin stabilirea a patru stații: prima stație a fost amplasată în centrul SPP, a doua spre nord, a treia la 120° față de direcția nord, iar ultima la 240° față de direcția nord. Stațiile TLS, cu excepția celei amplasate în centrul SPP, au fost poziționate la o distanță de 15 metri față de centrul SPP. Pentru a obține coregistrarea automată a norilor de puncte obținuți în urma scanărilor a fost necesară amplasarea a șapte repere sferice, distribuite uniform (Figura 3.3).

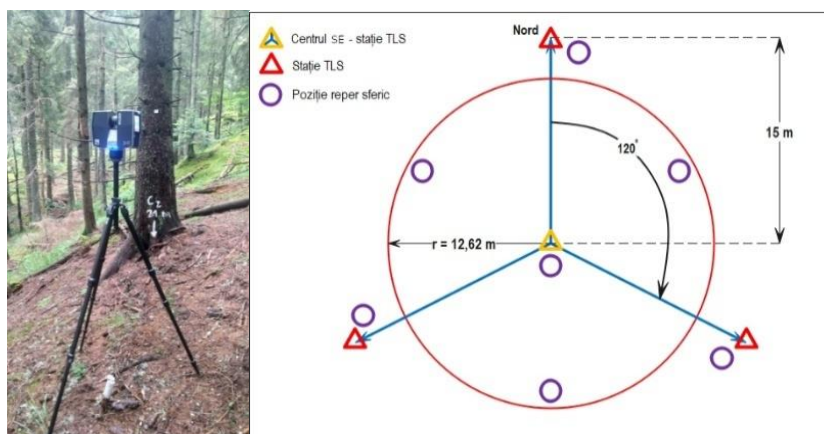


Figura 3.3 – Amplasarea stațiilor TLS în raport cu suprafața de probă scanată.

Totodată, în cadrul fiecărei SP s-au efectuat zboruri fotogrametrice cu aparatul de zbor fără pilot (UAV) tip DJI Mavic 2 Enterprise Dual. Datele și informațiile obținute în urma efectuării acestor zboruri au fost prelucrate cu ajutorul programului informatic *Agisoft Metashape Professional* (Agisoft LLC 2021). Prin aplicarea tehnicii specifice structură-din-mișcare (*Structure from Motion – SfM*) au fost generate ortofotoimagini în culori naturale (RGB), precum și nori de puncte cu densitate ridicată, care descriu structura tridimensională a coronamentului (Iglhaut et al. 2019). Norii de puncte rezultați au fost decupați utilizând o zonă tampon de 10 m în exteriorul limitei fiecărei suprafețe de probă permanente (SPP), astfel încât arborii situați la marginea suprafețelor să fie reprezentați complet. Această etapă a avut rolul de a asigura comparabilitatea între seturile de date UAV și TLS și de a reduce riscul subestimării coroanelor arborilor ca urmare a decupării la limita SPP.

¹ funcționează prin compararea diferenței de fază între unda trimisă și cea recepționată

Simultan, pentru determinarea creșterilor radiale la nivel de arbore, în anul 2024, au fost prelevate cu ajutorul burghiului Pressler probe de creștere radială de la un lot de 2-3 arbori nedoborâți, din speciile principale (fag, molid), reprezentativi pentru fiecare categorie de diametre, situați într-o zonă tampon cu lățimea de 10 m, situată în exteriorul fiecărui sondaj permanent (Badea 2013).

După prelevare, carotele extrase au fost uscate, fixate pe plăci din lemn și ulterior șlefuite progresiv cu benzi abrazive de granulații din ce în ce mai fine (200 – 800), astfel încât inelele anuale să fie cât mai vizibile și ușor de identificat. Ulterior, probele au fost scanate la rezoluție înaltă (1200 dpi), iar lățimea inelelor anuale a fost determinată utilizând aplicația informatică *CooRecorder* (v.7.4) (Collazos Fernández and Rubiales 2025). Seria de creștere pentru fiecare arbore a fost datată prin examinare vizuală, iar valorile rezultate au fost exportate și arhivate în fișiere de format *Tucson (.rwf)*.

3.3. PROCESAREA ȘI PRELUCRAREA STATISTICĂ A DATELOR

Analiza și caracterizarea structurii arboretelor inventariate s-au realizat prin compararea caracteristicilor dendrometrice derivate din norii de puncte cu valorile obținute prin inventarierea arboretelor efectuate în teren, atât la nivel de arbore, cât și la nivel de suprafață de probă (SPP). Informațiile obținute în teren, au constituit setul de referință pentru caracteristicile dendrometrice (diametrul de bază, înălțimea totală etc.), iar caracteristicile derivate din procesarea norilor de puncte au fost tratate ca estimări supuse validării prin comparație.

Pentru a facilita extragerea atributelor arborilor au fost parcurse o serie de etape de preprocesare, respectiv coregistrarea norilor de puncte obținuți din scanarea cu laser terestru și din UAV, eliminarea zgomotului și segmentare semantică a norilor de puncte (Wielgosz et al. 2024). Coregistrarea norilor de puncte s-a realizat cu ajutorul programului informatic R (Posit team 2025), prin utilizarea pachetului *lidRalignment* (Roussel 2025), dedicat alinierii automate a norilor de puncte proveniți din surse diferite. În vederea segmentării arborilor individuali, norii de puncte rezultați au fost procesați printr-un flux de lucru, complet automat, care preia norii de puncte ca date de intrare, identifică punctele aparținând arborilor și le grupează în arbori individuali (Henrich et al. 2024).

Caracteristicile individuale ale arborilor, precum diametrul de bază (dbh), înălțimea arborilor și proiecția coroanei au fost obținute din norii de puncte rezultați în urma segmentării, prin utilizarea pachetului *ITSMe* (Terry et al. 2023), care permite estimarea caracteristicilor arborilor individuali pe baza norilor de puncte.

Analiza relațiilor de competiție (determinarea indicilor de competiție) la nivel de arbore a fost realizată prin utilizarea pachetului *TreeCompR* (Rieder et al. 2024), care oferă o soluție pentru evaluarea concurenței dintre arbori și permite compararea mai multor indici de competiție (CI) în funcție de tipul de date disponibil. În cazul abordării bazate pe datele obținute prin inventarii ale arborilor, *TreeCompR* poate gestiona serii de date ce conțin coordonatele arborilor (x, y) și cel puțin o variabilă precum diametrul de bază (dbh) sau înălțimea arborilor (h). Aceste date pot proveni fie din inventarii ale arborilor efectuate în teren, fie din rezultate obținute din segmentarea arborilor individuali.

Evaluarea performanței segmentării arborilor individuali s-a realizat prin raportare la arborii identificați în urma inventarierii. În acest scop, arborii inventariați în teren au fost considerați set de referință, iar arborii rezultați prin segmentarea norilor de puncte au fost considerați set de predicții. Pentru fiecare SPP s-a realizat corespondența între cele două seturi de arbori prin constituirea de perechi *arbore inventariat - arbore segmentat*, astfel încât fiecărui arbore de referință să îi fie atribuit cel mult un arbore segmentat. Pentru fiecare SPP s-au definit următoarele: N este numărul total al arborilor de referință, TP numărul arborilor detectați corect (arbori corespondenți), FN numărul arborilor de referință care nu sunt detectați, FP numărul de arbori segmentați din norii de puncte dar care nu corespund niciunui arbore de referință, iar suma dintre numărul arborilor detectați corect (TP) și numărul de arbori segmentați din norii de puncte dar care nu corespund niciunui arbore de referință (FP) reprezintă numărul total al arborilor segmentați din norii de puncte (Xiang et al. 2024).

Ulterior realizării etapelor de preprocesare, de segmentare a arborilor individuali și de estimare a caracteristicilor dendrometrice, acuratețea estimărilor obținute din norii de puncte a fost evaluată prin raportare la măsurătorile obținute în urma inventarierii arboretelor, considerate ca date de referință. Diferențele dintre valorile estimate și cele măsurate au fost cuantificate prin indicatori statistici standardizați ai erorii, respectiv eroarea medie pătratică (RMSE), eroarea medie pătratică procentuală (RRMSE), eroarea absolută medie (MAE) și coeficientul de determinație (R^2), calculați separat pentru fiecare atribut analizat. Toate analizele statistice au fost implementate în programul informatic R (Posit team 2025).

În ceea ce privește verificarea calității interdatării carotelor de creștere, aceasta s-a realizat cu ajutorul aplicației informatice COFECHA (Labrecque-Foy et al. 2023; Zhang et al. 2024). Analiza și reprezentarea grafică a seriilor dendrocronologice s-a realizat cu ajutorul programului informatic R (Posit team 2025), prin utilizarea pachetelor *dplR* (Bunn 2008) și *detrendR* (Campelo, García-González and Nabais 2012), pentru o perioadă comună de cel puțin cinci probe, astfel fiind obținute seriile dendrocronologice (TRW) validate și agregate pe categorii de diametru de bază, precum și creșterea în suprafața de bază (BAI).

Întrucât, probele de creștere au fost prelevate de la un număr 2-3 arbori localizați în zona tampon a fiecărui SP, integrarea seriilor dendrocronologice cu arborii segmentați din norii de puncte a fost realizată pe categorii de diametre. Astfel, pentru fiecare categorie de diametre a fost calculată o creștere radială medie și o creștere medie în suprafața de bază.

Pentru modelarea creșterii radiale în raport cu caracteristicile coroanei (diametrul, lungimea, înălțimea bazei coroanei), s-a utilizat un model parametric (1), în care răspunsul dendrocronologic a fost explicat printr-un set de variabile structurale derivate din norii de puncte (CSV). Totodată, modelul parametric a fost definit astfel încât să descrie creșterea în raport cu structura coroanei:

$$TRW_i = \beta_0 + \sum_{p=1}^P \beta_p CSV_{p,i} + \varepsilon_i \quad (1)$$

unde:

TRW_i reprezintă lățimea inelului;

CSV_{p,i} - variabile ale coroanei derivate din norii de puncte;

ε_i - eroarea reziduală.

Ulterior, pentru a evalua influența competiției asupra creșterii radiale a arborilor, modelul a fost extins prin introducerea indicilor de competiție (CI) ca variabilă suplimentară:

$$TRW_i = \beta_0 + \sum_{p=1}^P \beta_p CSV_{p,i} + \beta_c CI_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

unde:

TRW_i reprezintă lățimea inelului, mm;

CSV_{p,i} caracteristici ale coroanei derivate din norii de puncte;

CI_i - indici de competiție;

ε_i - eroarea reziduală.

Înainte de obținerea unor rezultate calitative, anterior ajustării modelelor, s-a verificat multicolinearitatea între caracteristicile coroanei, prin analiza corelațiilor și evaluarea factorului de caracterizare a varianței (VIF) (Jacob and Varadharajan 2024; Salmerón-Gómez, García-García and García-Pérez 2025; Shrestha 2020), utilizând procedurile implementate în pachetul *car* (Fox et al. 2021). În plus, pentru a controla variația locală și dependența observațiilor au fost testate și modele cu efecte mixte, în care sondajul permanent (SP) a fost introdus ca efect aleatoriu. Mai trebuie precizat că, modele mixte au fost ajustate utilizând pachetele *lme4* și *lmerTest* (Bates et al. 2015; Kuznetsova, Brockhoff and Christensen 2017), pentru o corectitudine ridicată a rezultatelor.

În paralel cu modelele liniare utilizate pentru evaluarea relațiilor directe dintre variabilele coroanei și creșterea radială, a fost implementată și o abordare de tip model de ecuații structurale (SEM), pentru a analiza simultan relațiile directe și indirecte dintre caracteristicile coroanei și indicii de competiție. Această abordare permite evaluarea mecanismelor prin care competiția poate influența creșterea radială atât direct, cât și indirect, prin modificarea caracteristicilor coroanei.

Modelele liniare au fost calibrate utilizând variabilele coroanei derivate din norii de puncte TLS și indici de competiție la nivel de arbore, iar selecția și compararea modelelor ajustate s-a realizat cu ajutorul criteriilor informaționale AIC și BIC, care iau în considerare atât calitatea ajustării, cât și complexitatea modelului (Chifunda, Kirigiti and Balan 2025; Zeferino et al. 2023).

Analiza statistică a fost realizată cu ajutorul programului informatic R, utilizând pachetul de bază *stats* (R Core Team 2025) pentru testele Fligner-Killeen, Kruskal-Wallis (KW), Kolmogorov-Smirnov (KS), testul LRT (Likelihood Ratio Test) și Wilcoxon. Pentru evaluarea gradului de concordanță a fost utilizat coeficientul de corelație a concordanței (Lin's Concordance Correlation Coefficient – CCC) (Bornand et al. 2023), utilizând pachetul *DescTools* (Signorell A et al. 2024).

4. REZULTATE OBTINUTE

4.1. INVENTARIEREA STATISTICĂ A ARBORILOR ȘI ARBORETELOR ÎN CADRUL REȚELELOR DE CERCETARE

Prin lucrările specifice de inventariere au fost parcurse 96 de sondaje permanente (SP), care au în componență 192 suprafețe permanente de probă (SPP). Cu această ocazie au fost inventariați un număr de 6927 arbori componenți ai rețelelor cercetate. Pentru rețeaua de cercetare de fag (rețea FA), constituită din 38 de sondaje, diametrul mediu aritmetic ($\overline{dbh}$) calculat a fost de 26,5 cm, iar înălțimea medie aritmetică ($\bar{h}$) calculată a fost de 22,4 m (Figura 4.1). În rețeaua de cercetare molid (rețea MO), formată din 10 sondaje, $\overline{dbh}$ a fost de 32,4 cm, iar $\bar{h}$ de 23,8 m. În rețeaua de cercetare de amestec (rețea AM), care a avut în componență 48 de sondaje permanente, s-a identificat că la nivel de specie, $\overline{dbh}$ a fost de 24,8 cm pentru specia fag, iar pentru specia molid $\overline{dbh}$ a fost de 31,5 cm (Figura 4.1).

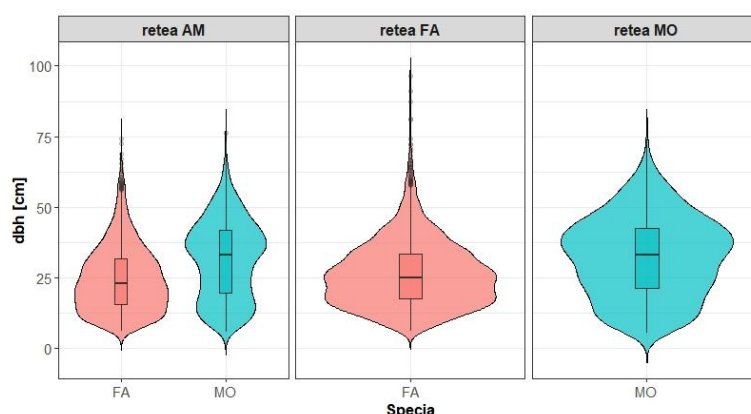


Figura 4.1 - Distribuția diametrului de bază (dbh) al arborilor inventariați, în cuprinsul rețelelor de inventariere.

Analizând valorile coeficienților de variație (s%) ai diametrelor arborilor din sondajele permanente (SP) s-a evidențiat o variabilitate destul de ridicată în SP 6 (61,65%), SP 84 (60,11%) și SP 91 (60,06%) iar cele mai reduse valori ale acestuia s-au înregistrat în SP 28 (21,49%), SP 26 (25,31%) și SP 39 (30,92%). Valori intermediare ale coeficienților de variație s-au înregistrat în SP 38 (35,94%), SP 22 (35,96%), și SP 24 (36,06%).

La nivel de rețea coeficientul de variație al diametrelor arborilor a prezentat valori relativ apropiate între cele trei rețelele analizate (Tabelul 4.1). În rețeaua AM, care a fost constituită din 48 de sondaje permanente, valoarea coeficientului de variație al dbh a fost de 44,3%. În rețeaua FA (38 sondaje) coeficientul de variație mediu al dbh înregistrat a fost de 44,4%,. Rețeaua permanentă MO, care cuprinde 10 sondaje și a înregistrat cea mai ridicată valoare a coeficientului de variație mediu al dbh, de 48,4%. Analiza statistică nu a evidențiat diferențe semnificative între rețele, testul Fligner-Killeen neindicând diferențe semnificative ale variației coeficientului de variație al dbh între acestea ($\chi^2 = 0,577$, $f = 2$, $p = 0,749$), iar testul Kruskal-Wallis (KW) neevidențiind, de asemenea, diferențe semnificative ale distribuției coeficientului de variație între acestea ($\chi^2 = 2,507$, $f = 2$, $p = 0,285$) (Figura 4.2).

Tabelul 4.1 – Parametri statistici ai distribuțiilor diametrului de bază al arborilor la nivel de rețea de inventariere

Rețea	Număr sondaje permanente (SP)	Coeficient de variație [%]	Abaterea standard [cm]	S _{min} [%]	S _{max} [%]
rețea AM	48	44,30	8,42	21,5	61,7
rețea FA	38	44,40	7,67	31,5	60,1
rețea MO	10	48,40	10,30	31,0	60,1

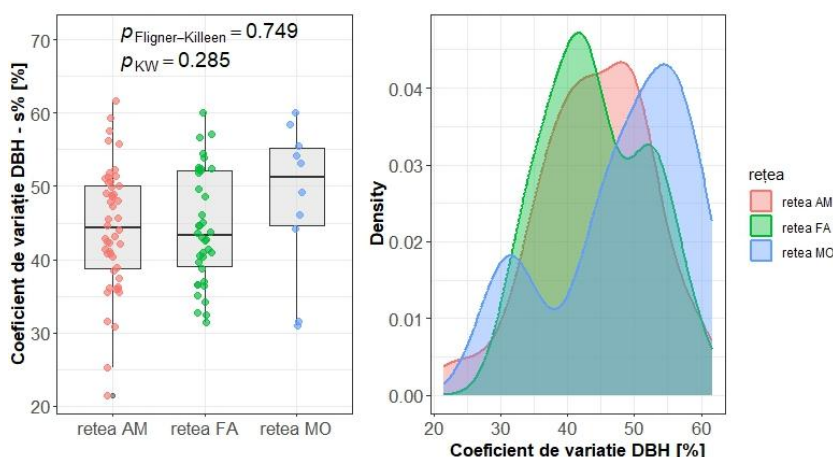


Figura 4.2 – Distribuția coeficientului de variație al diametrului de bază al arborilor la nivel de sondaj și de rețea de inventariere statistică.

Pentru a testa omogenitatea varianței dbh între sondajele din cadrul fiecărei rețele analizate, s-a procedat la aplicarea testului nonparametric Fligner-Killeen. Rezultatele obținute au evidențiat diferențe semnificative între sondaje pentru fiecare dintre cele trei rețele analizate. În rețeaua de amestec (AM), testul a indicat că există o eterogenitate accentuată a varianței dbh ($\chi^2 = 137,54$, $f = 47$, $p < 0,001$). Rezultate similare au fost obținute și pentru rețelele FA ($\chi^2 = 135,02$, $f = 37$, $p < 0,001$) și MO ($\chi^2 = 55,97$, $f = 9$, $p < 0,001$). Respingerea ipotezei nule (H_0) confirmă faptul că dispersia dbh diferă semnificativ între sondajele permanente (SP), fapt ce a impus omogenizarea sistemului prin identificarea și gruparea SP-urilor din cadrul fiecărei rețele în subpopulații cu caracteristici similare. Astfel, în rețeaua de amestec (AM), subpopulația A, formată din 29 de sondaje permanente (SP), a prezentat o valoare la limita pragului de semnificație ($\chi^2 = 41,17$, $f = 29$, $p = 0,051$), în timp ce pentru subpopulația B (19 sondaje permanente) nu au fost identificate diferențe semnificative ($\chi^2 = 12,77$, $f = 19$, $p = 0,804$). În mod similar, în rețeaua FA (38 sondaje), atât în subpopulația A (20 sondaje permanente, $\chi^2 = 28,76$, $f = 19$, $p = 0,069$), cât și în subpopulația B (18 sondaje permanente, $\chi^2 = 14,99$, $f = 17$, $p = 0,595$), nu au fost identificate diferențe semnificative. În rețeaua de molid (MO), formată din 10 sondaje permanente, nu au fost identificate diferențe semnificative ($\chi^2 = 10,85$, $f = 9$, $p = 0,144$).

În raport cu înălțimea arborilor, coeficientul de variație al înălțimii arborilor la nivel de rețea a prezentat valori relativ apropiate între cele trei rețele de cercetare analizate (Tabelul 4.4). În rețeaua AM, constituită din 48 de sondaje permanente, valoarea coeficientului de variație a fost de 34,8%. În rețeaua

FA (care a avut în componență 38 de sondaje), coeficientul de variație rezultat a fost de 34,5%. Rețeaua MO (10 sondaje) a înregistrat cea mai mare valoare a coeficientului de variație al înălțimii arborilor 39,0%. Comparativ cu rețelele AM și FA, în rețeaua MO s-a identificat o variabilitate ușor mai ridicată, dar cu un interval de variație mai restrâns decât cel observat în rețeaua AM. Analiza statistică nu a evidențiat diferențe semnificative între rețelele analizate, testul Fligner-Killeen neindicând diferențe semnificative ale variației coeficientului de variație al înălțimii arborilor între acestea ($\chi^2 = 28,76$, $f = 19$, $p = 0,069$), iar prin testul Kruskal-Wallis (KW) neevidențiindu-se diferențe semnificative ale distribuției coeficientului de variație al înălțimii arborilor (Figura 4.3).

Tabelul 4.2 – Parametri statistici ai distribuțiilor înălțimii arborilor la nivel de rețea de inventariere

Rețea	Număr sondaje permanente (SP)	Coeficient de variație [%]	Abaterea standard [m]	S% _{min} [%]	S% _{max} [%]
rețea AM	48	34,80	7,18	14,6	51,0
rețea FA	38	34,50	7,22	19,8	45,5
rețea MO	10	39,00	6,00	30,1	46,2

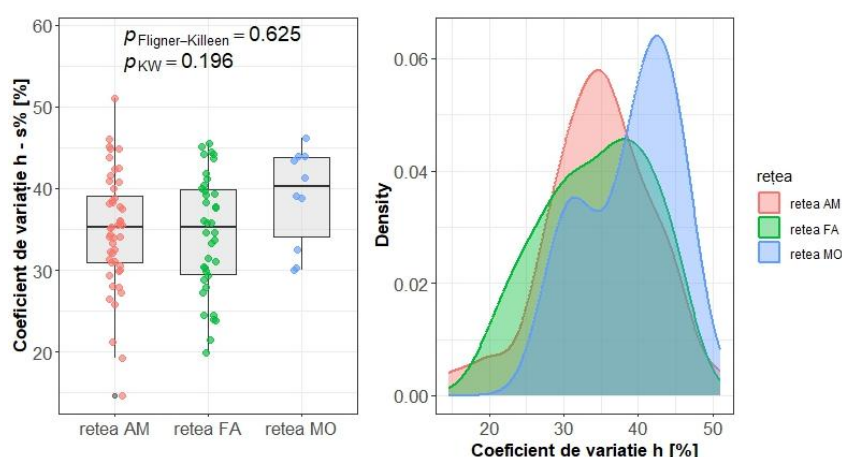


Figura 4.3 – Distribuția coeficientului de variație a înălțimii arborilor la nivel de sondaj în raport cu rețeaua de inventariere statistică.

În arboretele componente ale rețelelor de cercetare analizate s-a evidențiat predominanță a arborilor cu diametrul de bază (dbh) încadrat în intervalul 20 – 60 cm. În raport cu rețeaua de inventariere, această categorie reprezintă între 59% și 73% din numărul total de arbori. Mai mult, arborii cu dbh mai mic de 20 cm au o pondere cuprinsă între 22% și 40%, iar arborii cu dbh mai mare de 60 cm reprezintă sub 3% din numărul total de arbori inventariați (Figura 4.4).

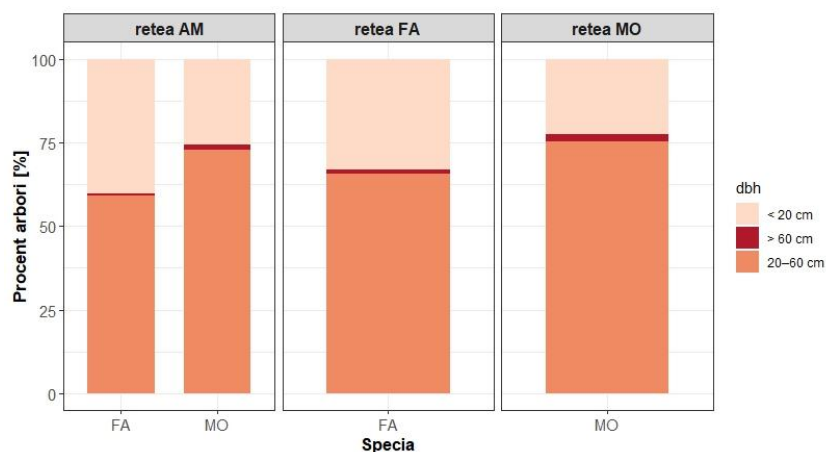


Figura 4.4 – Ponderea relativă pe clase de diametru de bază (<20 cm, 20 – 60 cm, >60 cm) la nivel rețea de inventariere și specie.

Pentru analiza structurii verticale la nivelul fiecărei rețele (AM, FA, MO), înălțimile arborilor măsurate în cadrul sondajelor au fost grupate în trei intervale (<16 m, 16 – 32 m și >32 m), delimitarea acestora fiind realizată în raport cu distribuția înălțimilor medii corespunzătoare claselor poziționale (I-V Kraft) ale arborilor (Tabelul 4.3). Valorile obținute evidențiază o grupare a arborilor din clasele poziționale Kraft IV și V sub 16 m, a celor din clasele poziționale Kraft II și III în intervalul 16 – 32 m, iar a arborilor din clasa pozițională Kraft I peste 32 m.

Tabelul 4.3 – Înălțimea arborilor în raport cu poziția cenotică (clasele Kraft) în cadrul rețelelor de inventariere

Rețea	Specia	Clasa înălțime [m]	Clasa Kraft	$\bar{h}$ [m]	Abaterea standard [m]	$\overline{h_{min}}$ [m]	$\overline{h_{max}}$ [m]
rețea AM	fag	>32	I	34,0	3,36	26,5	41,9
		16 – 32	II, III	26,3	4,14	12,4	39,6
		<16	IV, V	14,2	4,89	2,1	30,7
	molid	>32	I	33,5	3,11	22,0	44,0
		16 – 32	II, III	27,7	4,07	10,5	37,5
		<16	IV, V	13,2	5,51	2,1	34,3
rețea FA	fag	>32	I	32,4	3,32	21,5	39,7
		16 – 32	II, III	25,5	4,96	9,2	45,4
		<16	IV, V	13,5	5,98	1,4	31,5
rețea MO	molid	>32	I	34,4	3,23	24,9	41,6
		16 – 32	II, III	27,2	4,62	14,9	35,1
		<16	IV, V	12,6	5,23	2,5	24,9

În raport cu înălțimea totală a arborilor, arboretele din cadrul rețelelor de inventariere analizate au fost caracterizate printr-o predominanță a arborilor cu înălțimi cuprinse în intervalul 16 – 32 m. Raportat la rețeaua de inventariere și specie, această categorie a reprezentat un procent între 46,6% și 66,8% din numărul total de arbori. Arborii cu înălțimea mai mică de 16 m au avut o pondere cuprinsă între 17,9% și 24,8%, iar arborii a căror înălțime totală este mai mare de 32 m a reprezentat o pondere cuprinsă între 15,3% și 33,4% din numărul total al arborilor inventariați (Figura 4.5).

În rețeaua AM, pentru specia fag, 62,7% dintre arbori au înregistrat înălțimi între 16 – 32m, iar 17,9% au depășit 32 m. În cazul speciei molid, din aceeași rețea, distribuția a fost mai uniformă: 46,6% dintre arbori s-au încadrat în intervalul 16 – 32 m, 24,8% au avut înălțimi sub 16m, în timp ce 28,6% au depășit 32 m înălțime, ceea ce evidențiază o pondere mai ridicată a arborilor înalți comparativ cu specia fag (Figura 4.5, Figura 4.6).

În rețeaua FA, 66,8% din numărul total de arbori au avut înălțimi cuprinse în intervalul 16 – 32 m, iar 15,3% peste 32 m, indicând o grupare a arborilor în clasele intermediare și o participare relativ redusă (15,3%) a arborilor cu înălțimi de peste 32 m. De asemenea, în rețeaua MO, 46,7% din numărul total de arbori au avut înălțimi cuprinse între 16 m și 32 m, iar 33,4% peste 32 m (Figura 4.5, Figura 4.6).

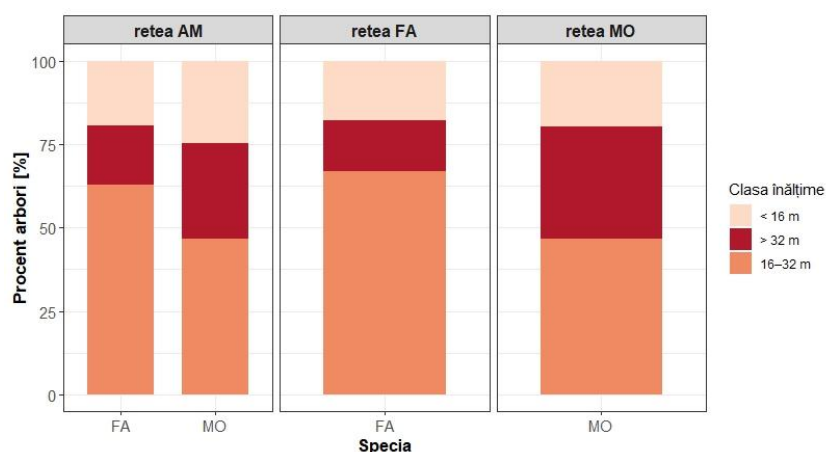
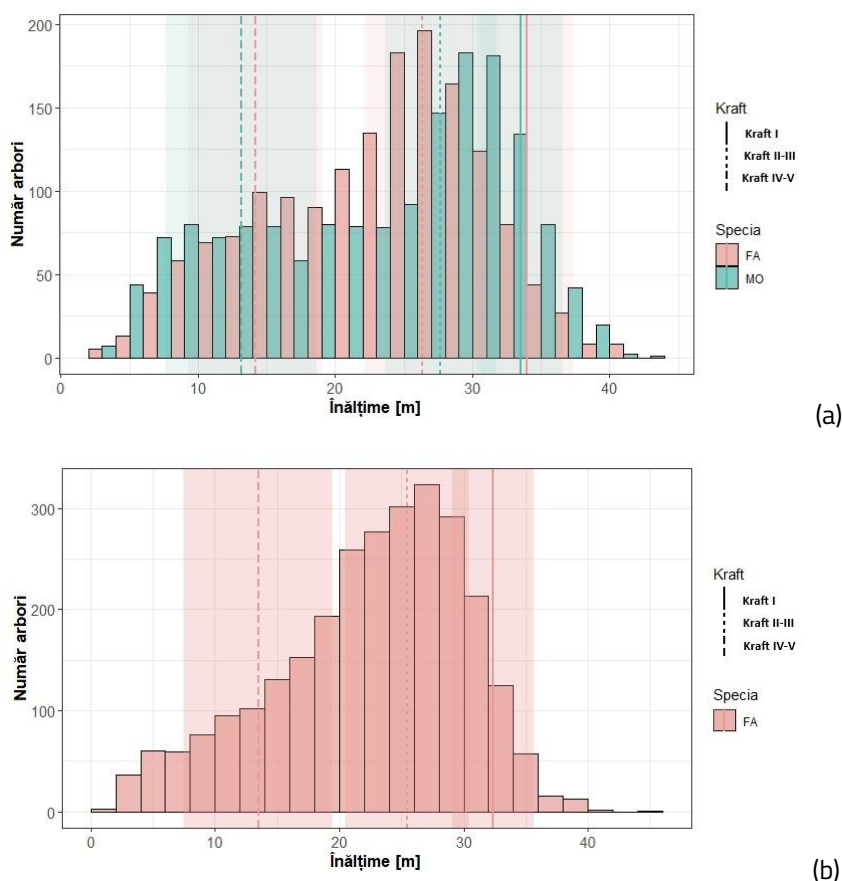
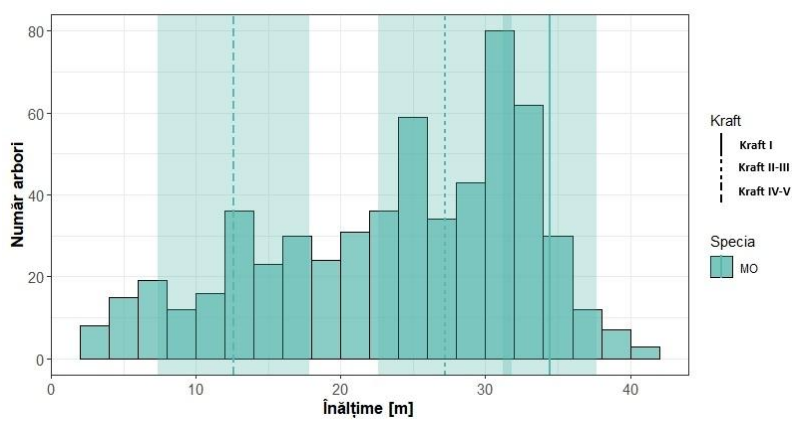


Figura 4.5 – Ponderea relativă pe clase de înălțimi (<16 m, 16 – 32 m, >32 m) la nivel de rețea de inventariere și specie.





(c)

Figura 4.6 - Distribuția arborilor pe clase de înălțime (2m) la nivel de rețeaua de inventariere : AM (a), FA (b), MO (c).

Pentru analiza relației diametru–înălțime, pe baza informațiilor obținute în urma inventarierilor au fost construite curbele înălțimilor (h) în raport cu diametrul de bază (dbh) al arborilor (Figura 4.7). Intensitatea corelației dintre cele două caracteristici dendrometrice a fost evaluată prin coeficientul de corelație Pearson (r), precum și prin raportul de corelație (r^2).

Analiza relației dintre diametrul de bază și înălțimea arborilor evidențiază o asociere pozitivă și puternică între cele două variabile, pentru toate rețelele și speciile analizate (Tabelul 4.4. În rețeaua AM, coeficientul de corelație (r) a fost de 0,781 pentru specia fag ($r^2=0,772$) și 0,906 pentru specia molid ($r^2=0,898$).

Pentru rețeaua FA, respectiv specia fag, coeficientul de corelație (r) a fost de 0,692, iar valoarea raportului de corelație a fost 0,680. În rețeaua MO, pentru specia molid, relația a fost caracterizată de o intensitate mai mare, cu $r = 0,825$ și $r^2 = 0,816$.

Comparativ între specii, relația $dbh - h$ este sistematic mai puternică la specia molid decât la specia fag, indiferent de rețea. De asemenea, rețeaua de AM și rețeaua de MO a prezentat valori mai ridicate ale rapoartelor de corelație (r^2) comparativ cu rețeaua FA (Tabelul 4.5).

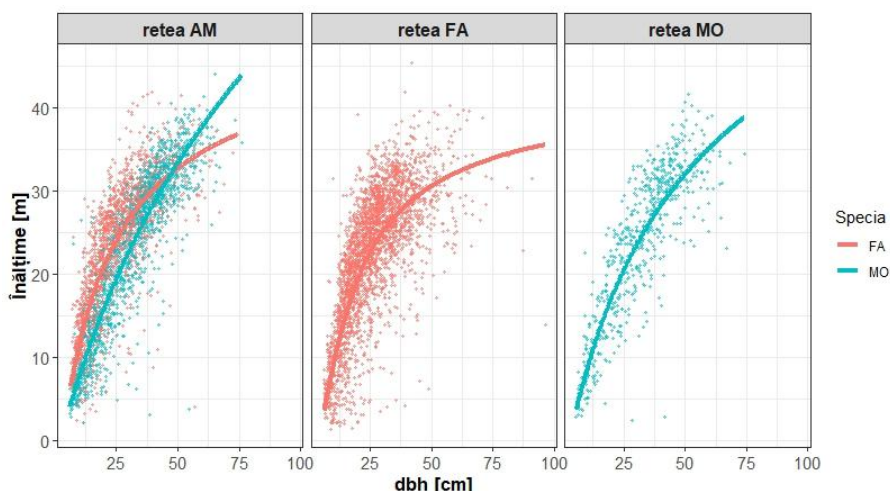


Figura 4.7 – Curbele înălțimilor la nivel de rețea de inventariere și specie: rețea AM; rețea fag FA, rețea MO.

Tabelul 4.4 - Determinarea coeficienților ecuației de regresie de forma $\ln h = a_0 + a_1 \cdot d^{a_2}$ (Giurgiu, Decei & Draghiciu, 2004)

Rețea	Specia	Coeficienți de regresie ai ecuației de serviciu $\log h = a_0 + a_1 \cdot \log d + a_2 \cdot \log^2 d$			Coeficienții ecuației de regresie $\ln h = a_0 + a_1 \cdot d^{a_2}$		
		a ₀	a ₁	a ₂	a ₀	a ₁	a ₂
rețea AM	fag	-1,209	2,266	-0,273	3,749	-9,938	-0,922
	molid	-2,751	2,772	-0,299	4,411	-9,451	-0,603
rețea FA	fag	-2,629	3,091	-0,397	3,595	-17,732	-1,173
rețea MO	molid	-2,612	2,933	-0,351	3,792	-13,669	-0,970

Tabelul 4.5 - Valorile coeficienților de corelație (r) și ale rapoartelor de corelație (r^2) dintre diametrul de bază al arborilor și înălțimea lor

Rețea	Specia	Coeficient de corelație (r)	Raport de corelație (r^2)
rețea AM	fag	0,781	0,772
	molid	0,906	0,898
rețea FA	fag	0,692	0,680
rețea MO	molid	0,825	0,816

4.2. CARACTERISTICILE DENDROMETRICE ALE ARBORILOR DETERMINATE PRIN SCANAREA CU LASER TERESTRU ȘI UAV

Informațiile obținute prin intermediul inventarierilor din teren, au constituit setul de date de referință utilizat pentru evaluarea acurateței estimărilor derivate din scanarea cu laser terestru (TLS). Suprafețele de probă permanente, fiecare având o suprafață de 500 m², au fost parcurse integral și scanate cu laser terestru (TLS). Astfel, au rezultat un număr total de 768 scanări (patru scanări pentru fiecare suprafață de probă permanentă). În urma procesării norilor de puncte, pentru fiecare SPP, a rezultat un nor de puncte coregistrat (Figura 4.8) și ulterior au fost generate rapoarte statistice ce cuprind informații referitoare la precizia coregistrării.

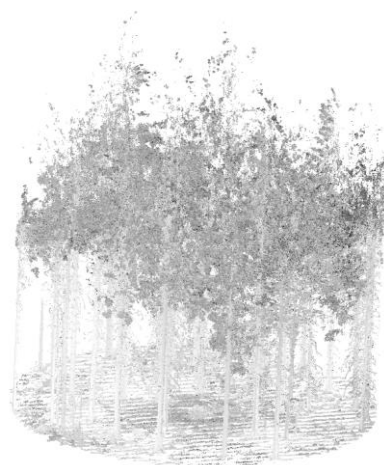


Figura 4.8 – Nor de puncte tridimensional obținut prin scanarea cu laser terestru (TLS) la nivel de SPP (ex: SPP 232).

În urma analizei erorilor de coregistrare a fost evidențiată o valoare medie de $9,43 \pm 5,0$ mm. Mai mult, distribuția erorii medii (Figura 4.9) prezintă asimetrie de dreapta, majoritatea suprafețelor de probă permanente (SPP) înregistrând valori sub 10 mm, dar și un număr redus de suprafețe cu erori medii de peste 20 mm. În total, 69,8% dintre SPP au înregistrat erori medii sub 10 mm, iar 94,3% s-au încadrat sub pragul de 20 mm, care poate fi considerat acceptabil pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor la nivel individual.

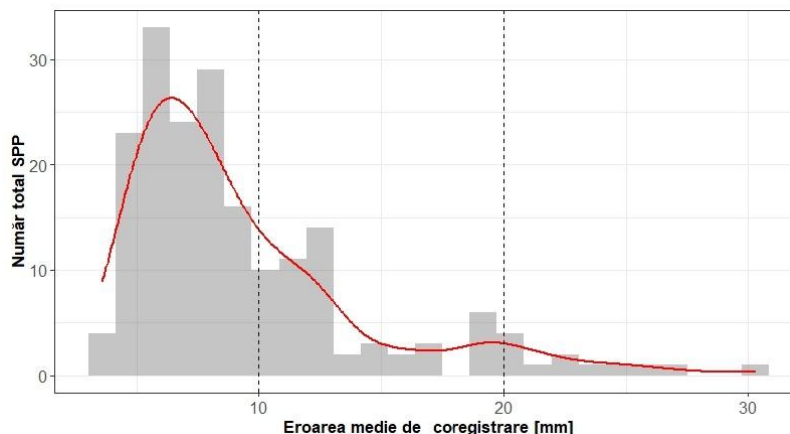


Figura 4.9 – Distribuția erorii medii de coregistrare (valori absolute) la nivelul suprafețelor de probă permanente (SPP).

Analiza la nivelul fiecărei rețele cercetate evidențiază diferențe statistic semnificative ale erorii medii de coregistrare (Kruskal–Wallis, $\chi^2 = 41,05$, $p < 0,001$). Astfel, rețeaua FA a prezentat cele mai reduse valori ($7,14 \pm 3,3$ mm), cu 90,8% dintre SPP având o eroare medie de coregistrare de sub 10 mm, respectiv 97,4% sub 20 mm. În comparație cu aceasta, rețeaua AM a înregistrat o eroare medie de coregistrare de $10,9 \pm 5,5$ mm, respectiv rețeaua MO, o eroare medie de coregistrare de $11,2 \pm 4,6$ mm. Analiza comparativă a erorii medii de coregistrare realizată între rețele, prin aplicarea testului Wilcoxon (cu ajustarea valorilor p prin metoda Benjamini-Hochberg), confirmă diferențe semnificative între rețeaua FA și celelalte două rețele ($p < 0,001$), în timp ce între rețelele AM și MO nu se constată diferențe semnificative ($p = 0,35$).

De asemenea, un număr de 11 suprafețe de probă permanente (SPP) înregistrează erori medii de coregistrare ≥ 20 mm, distribuite în toate rețelele de inventariere: 7 SPP în rețeaua AM și câte două SPP în rețeaua FA și rețeaua MO. Analiza relației dintre procentul de suprapunere minimă și eroarea medie de coregistrare a evidențiat faptul că o parte dintre aceste cazuri sunt asociate cu suprapuneri reduse între norii de puncte, indicând totodată o influență a condițiilor geometrice de scanare asupra stabilității procesului de coregistrare.

În ansamblu, deși se observă variații între rețelele de inventariere și cazuri izolate cu erori medii de coregistrare mai mari de 20 mm, procesul de coregistrare a scanărilor multiple poate fi considerat robust, întrucât majoritatea SPP (94,3%) se încadrează în limitele compatibile cu analiza caracteristicilor dendrometrice la nivel de arbore.

S-a mai observat, de asemenea, un nivel redus al erorilor de coreregistrare, indicând în acest mod o aliniere spațială adecvată a scanărilor și totodată permițând analize ulterioare la nivel de arbore individual, fără ca abaterile geometrice să influențeze semnificativ identificarea și localizarea trunchiurilor acestora. În acest context, norii de puncte au fost supuși procesului de segmentare, prin care structura brută a datelor a fost descompusă în seturi distincte de puncte asociate arborilor individuali (clusterare), permițând identificarea și analiza separată a fiecărui arbore (Figura 4.10).

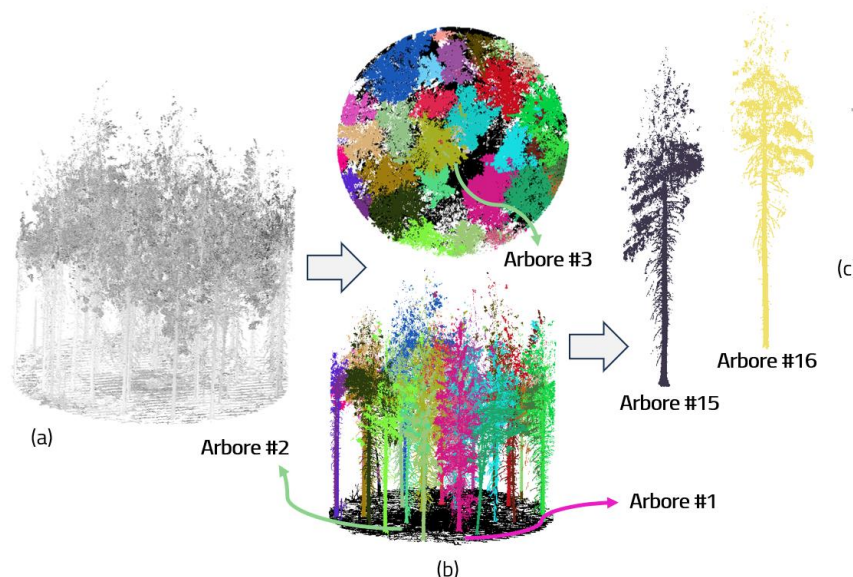


Figura 4.10 – Nor de puncte tridimensional obținut prin coreregistrarea diferitelor poziții de scanare, suprafața permanentă de probă (SPP) 232 (a); nor de puncte segmentat, fiecărui arbore îi este atribuit o poziție și un număr de identificare unic (ID) (b); arbori segmentați rezultați din norul de puncte (c).

În vederea evaluării performanței detectării arborilor individuali, a fost realizată corespondența spațială între arborii rezultați în urma procesului de segmentare la nivel individual și arborii inventariați în teren, la nivelul fiecărei suprafețe de probă permanente (SPP). Asocierea s-a realizat pe baza proximității spațiale, prin asocierea fiecărui trunchi detectat celui mai apropiat arbore de referință. Asocierea a fost validată doar în situațiile în care distanța planimetrică dintre poziția arborelui identificat TLS și poziția arborelui inventariat a fost mai mică de 1 m, în caz contrar, asocierea a fost respinsă.

Pe baza corespondenței stabilite între arborii obținuți în urma aplicării metodei TLS și arborii inventariați în teren a fost construită matricea de conformitate, prin încadrarea fiecărui arbore într-una dintre următoarele categorii: TP - arbori detectați corect (arbori corespondenți), FN – arbori de referință care nu sunt detectați și FP - arbori segmentați din norii de puncte dar care nu corespund niciunui arbore de referință. Această clasificare a permis cuantificarea performanței la nivel de sondaj permanent (SPP).

Prin agregarea rezultatelor obținute pentru toate cele trei rețele de inventariere, a rezultat un număr de 6927 arbori de referință, dintre care 6562 (94,7%) s-a dovedit că au fost detectați corect (TP), 365 (5,3%) de arbori nu au fost detectați (FN), iar 713 arbori au fost segmentați din norii de puncte, dar fără să aibă corespondență cu vreun arbore de referință. Astfel, s-a obținut o acuratețe de detecție de 0,947 și respectiv o precizie de 0,902 (F1-score = 0,924).

Analiza la nivel de SPP indică o acuratețe de detecție ridicată (0,954), majoritatea suprafețelor permanente de probă înregistrând valori peste 0,90 , în ceea ce privește detecția. Chiar și în cazurile cel mai puțin favorabile, valoarea acurateței de detecție nu scade sub 0,730 (Figura 4.11). Precizia detectării înregistrează o valoare medie de 0,908, iar F1-score o valoare medie de 0,930, confirmând un echilibru între arborii detectați corect (TP) și arborii fără corespondent.

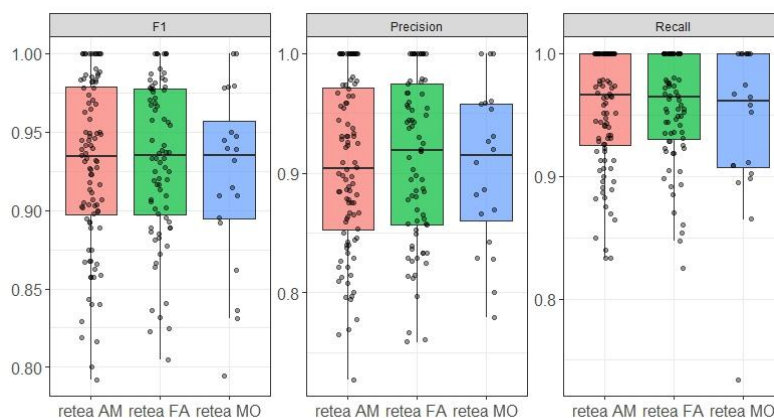


Figura 4.11 – Reprezentarea grafică a variabilității F1-score, precizia de detecție și acuratețea de detecție, în raport cu suprafața permanentă de probă (SPP).

Analiza relației dintre numărul total de arbori inventariați în SPP și acuratețea de detecție evidențiază o asociere negativă semnificativă statistic (coeficient Spearman rho = -0,312, $p < 0,001$). Rezultatele obținute indică o tendință de scădere a performanței de detectare în suprafețele cu un număr mai mare de arbori. Această relație sugerează că densitatea și complexitatea structurală pot influența procesul de segmentare, prin creșterea frecvenței omisiunilor (FN) în suprafețe mai dense.

Relația dintre numărul arborilor inventariați (N) în SPP și numărul arborilor detectați corect (TP) indică o asociere foarte puternică (coeficient Pearson $r=0,985$; $p < 0,001$), evidențiind o proporționalitate directă între numărul arborilor existenți și cei identificați prin segmentare. În același timp, analiza relației dintre numărul arborilor inventariați (N) și acuratețea de detecție a evidențiat o asociere negativă semnificativă statistic (coeficient Spearman rho = -0,312; $p < 0,001$), indicând o tendință de scădere a acurateței de detecție în suprafețele cu număr mare de arbori (Figura 4.12).

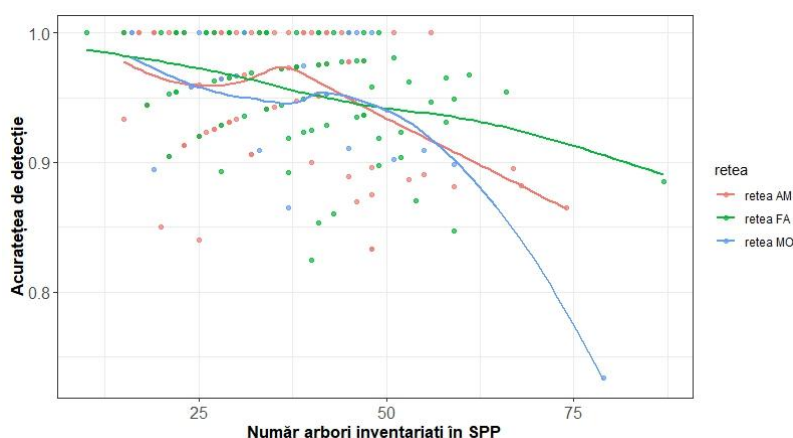


Figura 4.12 – Relația dintre acuratețea de detecție și numărul de arbori inventariați

Pentru a evalua acuratețea estimării parametrilor dendrometrici derivați din TLS, valorile diametrului de bază (dbh) și a înălțimii arborilor obținute prin segmentare au fost comparate, la nivel individual, cu valorile de referință obținute prin inventarierea arboretelor efectuate în teren, pentru arborii identificați corect (corespondenți).

Caracteristicile dendrometrice ale arborilor au fost extrase din norii de puncte rezultați în urma segmentării arborilor individuali utilizând algoritmi implementați în pachetul ITSM (Terry et al. 2023). În urma procesării au fost estimate principalele variabile structurale, respectiv diametrul de bază (dbh), înălțimea totală a arborelui (h) și proiecția coroanei (CPA). Aceste variabile au fost derivate automat pentru fiecare arbore identificat în norii de puncte și au fost utilizate pentru caracterizarea dimensională a arborilor analizați.

Diametrul coroanei (CD) arborilor a fost calculat pe baza ariei proiectate orizontal a norului de puncte corespunzător coroanei ($CD = 2 \cdot \sqrt{CPA/\pi}$), utilizând reprezentarea convexă a acesteia. Înălțimea până la baza coroanei (HCB) a fost determinată prin clasificarea punctelor coroanei de cele ale trunchiului, rezultând ca fiind cea mai joasă înălțime a punctelor clasificate coroană. Lungimea coroanei (CL) a fost calculată ca diferență dintre înălțimea totală (h) și înălțimea până la baza coroanei ($CL = h - HCB$). Asimetria coroanei (asim) a fost determinată ca raport între proiecția coroanei și aria cercului format de raza maximă (R_{max}) a coroanei arborelui (Figura 4.13).

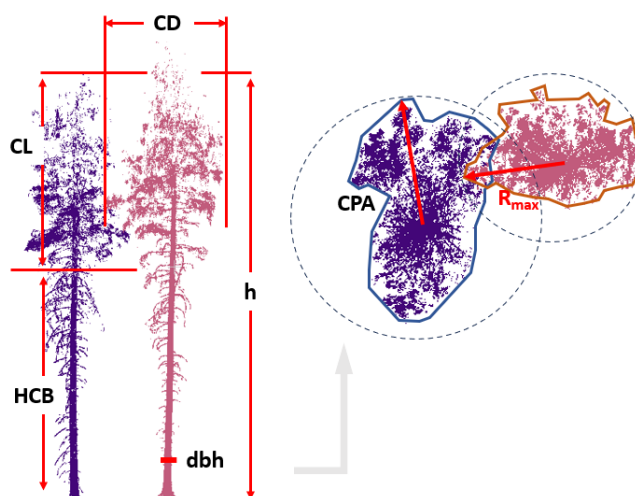


Figura 4.13 – Estimarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor extrase din norii de puncte segmentați: diametrul coroanei (CD); lungimea coroanei (CL); înălțimea până la baza coroanei (HCB); diametrul de bază (dbh); înălțimea totală a arborilor (h); proiecția coroanei (CPA); raza maximă a coroanei (R_{max}).

Analiza rezultatelor obținute a evidențiat faptul că estimarea diametrului de bază (dbh) prin scanarea cu laser terestru (TLS) a produs estimări dbh foarte apropiate de valorile arborilor de referință. Valorile coeficientul de determinație (R^2) a variat între 0,967 (rețeaua MO) și 0,978 (rețeaua FA), indicând o relație liniară foarte puternică între valorile TLS și cele de referință.

Luând în considerare toate cele trei rețele analizate, gradul de concordanță a valorilor diametrului estimat prin scanarea cu laser terestru și diametrul arborilor de referință a fost evaluat utilizând

coeficientul de corelație a concordanței (Lin's Concordance Correlation Coefficient – CCC) (Bornand et al. 2023). Valorile obținute evidențiază estimări foarte apropiate de valorile arborilor de referință (Tabelul 4.10). În rețeaua AM, coeficientul CCC a fost de 0,987 pentru specia fag și 0,988 pentru molid. În rețeaua FA, valoarea CCC a fost 0,989, pentru specia fag, iar în rețeaua MO valoarea CCC a fost 0,983, indicând faptul că valorile dbh estimate prin scanarea cu laser terestru sunt foarte apropiat de valorile acestuia măsurate în teren la arbori de referință.

Tendința de îndepărtare de valoarea medie (Bias) a fost redusă și pozitivă pentru toate rețelele analizate, evidențiind o ușoară supraestimare sistematică a diametrului de bază, în cazul valorilor obținute din TLS. Valorile acestuia au variat între 0,25 cm (rețeaua AM, specia molid) și 0,36 cm (rețeaua AM, specia fag), rezultând o deplasare medie situată sub valoarea de sub 0,4 cm față de valorile de referință (Tabelul 4.6).

Eroarea medie pătratică (RMSE) s-a situat între 1,74 cm (rețea FA, specia fag) și 2,35 cm (rețea MO, specia molid), iar eroarea medie absolută (MAE) a variat între 1,35 cm și 1,87. De asemenea, eroarea medie pătratică procentuală (RRMSE) a fost cuprinsă între 6,03% și 7,38%, evidențiind o variabilitate redusă a estimărilor dbh obținute prin procesarea norilor de puncte TLS pentru dbh.

Tabelul 4.6 – Indicatori de precizie pentru diametrul de bază

Rețea	Specia	Bias [cm]	RMSE [cm]	MAE [cm]	RRMSE [%]	R ²	r	CCC
rețea AM	fag	0,36	1,90	1,47	7,38	0,974	0,986	0,987
	molid	0,25	2,05	1,60	6,03	0,977	0,988	0,988
rețea FA	fag	0,26	1,74	1,35	6,28	0,978	0,988	0,989
rețea MO	molid	0,27	2,35	1,87	6,46	0,967	0,983	0,983

Rezultatele obținute prin estimarea înălțimii totale a arborilor a înregistrat o variabilitate mai ridicată și o tendință sistematică relativ, de subestimare a înălțimii arborilor, cu mențiunea că coeficientul de determinație (R²) a variat între 0,565 (rețeaua FA) și 0,784 (rețeaua AM, specia molid), evidențiind o relație moderată între valorile TLS și cele de referință.

Luând în considerare toate cele trei rețele analizate, tendința de îndepărtare față de valoarea medie (Bias) a fost negativă, cu valori cuprinse între -1,76 m (rețeaua AM, specia fag) și -2,65 m (rețeaua FA), evidențiind o subestimare sistematică a înălțimilor estimate din scanarea cu laser terestru. Eroarea medie pătratică (RMSE) a variat între 4,31 m și 5,24 m, iar eroarea medie absolută (MAE) între 3,35 m și 4,28 m. În termeni relativi, RRMSE s-a situat între 16,9 % și 23,8 % (Tabelul 4.7), valori semnificativ mai mari comparativ cu cele obținute pentru dbh.

Luând în considerare toate cele trei rețele analizate, gradul de concordanță a valorilor înălțimilor arborilor estimate prin scanarea cu laser terestru și cele măsurate în teren la arborii de referință a fost ridicat în toate cazurile (Tabelul 4.7). Valorile coeficientului CCC au variat între 0,712 și 0,829, evidențiind estimări bune până la foarte bune între cele două seturi de date. Cele mai mari valori au fost înregistrate

în rețeaua de AM (0,829 pentru specia fag, 0,858 pentru specia molid), urmată de rețeaua MO (0,817), în timp ce în rețeaua FA s-a obținut o valoare mai redusă (0,712).

Tabelul 4.7 – Indicatorii de precizie pentru înălțimea arborilor segmentați în urma scanărilor cu laser terestru

Rețea	Specia	Bias [m]	RMSE [m]	MAE [m]	RRMSE [%]	R ²	r	CCC
rețea AM	fag	-1,76	4,37	3,35	18,3	0,707	0,841	0,829
	molid	-2,20	4,54	3,61	16,9	0,719	0,885	0,858
rețea FA	fag	-2,65	5,64	4,28	23,8	0,565	0,752	0,712
rețea MO	molid	-2,51	4,57	3,49	18,3	0,784	0,848	0,817

Estimările înălțimii arborilor prin scanarea cu laser terestru (TLS) sunt caracterizate, în general, de o tendință de subestimare în toate rețelele cercetate. Această tendință a fost mai redusă în rețeaua de AM și mai pronunțată în rețeaua FA, în timp ce în rețeaua MO s-a menținut relativ constantă. Totuși, abaterea față de valorile de referință nu a fost uniformă pe întreg intervalul de variație a înălțimii.

În rețeaua AM, pentru specia fag, eroarea a fost minimă în intervalul 35 – 40 m, peste acest interval observându-se o ușoară supraestimare, în timp ce pentru specia molid estimările au fost subestimate pe întreg intervalul analizat (Figura 4.23). În ceea ce privește rețeaua FA, înălțimile arborilor estimate prin TLS au fost subestimate până la aproximativ 33 m, după care a apărut o tendință de supraestimare. În schimb, în rețeaua MO (specia molid), estimările TLS evidențiază o subestimare constantă, fără inversarea tendinței.

Supraestimarea înălțimii observată pentru specia fag poate fi asociată cu dificultatea identificării vârfului real în cazul coroanelor neregulate. În aceste condiții, maxima locală (punctul maxim) din norul de puncte, poate corespunde unei ramuri laterale sau unor erori de segmentare, conducând la valori ale înălțimii ușor supraestimate. În schimb, la molid, unde apexul este bine definit și poziționat în mod clar deasupra coroanei, astfel de situații (supraestimare) sunt mai puțin frecvente, estimările fiind caracterizate predominant de subestimare. Acest comportament reflectă o limitare specifică tehnologiei TLS, care scanează arborii din lateral și de la bază spre vârf, ceea ce reduce probabilitatea de a descrie complet partea superioară a coroanei.

Pentru a evalua semnificația statistică a diferențelor observate între rețelele de inventariere, distribuția erorilor absolute ale înălțimilor a fost analizată utilizând testul Kruskal-Wallis. Rezultatele obținute au evidențiat diferențe semnificative statistic între grupuri ($\chi^2 = 62,50$; $df = 3$; $p < 0,001$). Eroarea absolută a înălțimii variază între rețele, cu valori ale mediane mai ridicate în rețeaua FA, diferența fiind semnificativă statistic ($p < 0,001$) (Figura 4.14).

În ceea ce privește tendința de îndepărtare față de valoarea medie (Bias), toate rețelele au prezentat o subestimare sistematică a înălțimii, evidențiată prin valori negative ale reziduurilor (Tabelul 4.7), care variază între -1,76 m și -2,65 m, indicând o subevaluare a estimărilor TLS sub valorile de referință.

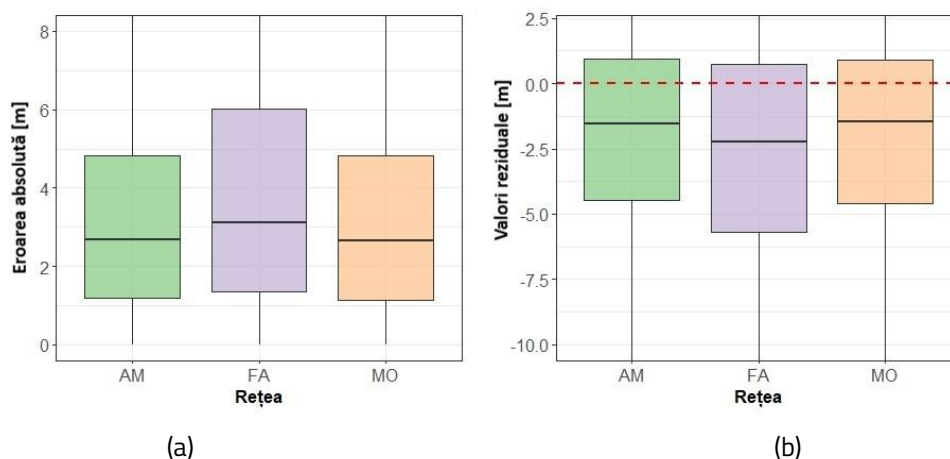


Figura 4.14 – Distribuția erorilor de estimare a înălțimii arborilor: eroarea absolută (a) și valori reziduale (b).

Subestimarea sistematică a înălțimilor estimate poate fi explicată prin limitări implicite ale tehnologiei și prin complexitatea structurală a arboretelor analizate. În cazul scanărilor cu laser terestru (TLS), detectarea vârfului arborilor este frecvent afectată de efecte de ocluzie, generate de prezența arborilor vecini, de stratificarea coronamentului arborilor și de geometria neregulată a coroanelor.

Trebuie totuși precizat că, în arboretele cu densitate ridicată sau multietajate, fasciculul laser nu reușește întotdeauna să intercepteze vârful arborelui (apex), în special atunci când acesta este parțial mascat de ramuri laterale sau de arbori suprapuși în plan vertical. Această situație conduce la o reconstrucție incompletă a treimii superioare a coroanei și, implicit, la estimări reduse ale înălțimilor totale a arborilor.

Valorile mai ridicate ale RMSE și RRMSE în rețeaua FA (RMSE = 5,64 m; RRMSE = 23,8%) sugerează o influență mai pronunțată a structurii arboretului asupra performanței estimării, comparativ cu rețeaua AM (RMSE = 4,37 m; RRMSE = 18,3%), unde erorile au fost mai reduse. Dependența negativă a valorilor reziduale față de înălțimea de referință confirmă faptul că subestimarea devine mai accentuată pentru arborii de talie mare, indicând un caracter structural și nu aleatoriu al erorii.

Pentru a evalua acuratețea estimării înălțimii arborilor derivată din coregistrarea norilor de puncte obținuți din scanarea cu laser terestru și din UAV, valorile înălțimii arborilor, la nivel individual, au fost comparate cu valorile de referință obținute prin inventarierea arboretelor efectuate în teren, pentru arborii corespondenți (identificați corect).

Analiza coeficienților de corelație Pearson (r) a evidențiat existența unei relații puternice între înălțimea arborilor estimată pe baza datelor de teledetecție și valorile arborilor de referință. Valorile (r) au fost ridicate în toate rețelele analizate, variind între 0,921 (rețeaua MO) și 0,938 (rețeaua AM), confirmând o asocierie liniară foarte puternică între cele două seturi de date. Coeficientul de determinație (R^2) susține această tendință, indicând faptul că aproximativ 85% din variația înălțimilor de referință este explicată de valorile estimate (Tabelul 4.8).

În plus, coeficientul de corelație a concordanței (CCC) a prezentat valori cuprinse între 0,862 și 0,903, indicând estimări foarte apropiate de valorile arborilor de referință (Tabelul 4.8). În ceea ce privește

acuratețea estimărilor, eroarea medie pătratică (RMSE) a variat între 2,79 m și 2,96 m, iar eroarea medie absolută (MAE) între 2,23 m și 2,36 m. Valorile tendinței de îndepărtare față de valoarea medie (Bias) au fost reduse, fiind cuprinse între -0,33 și 0,98 m, indicând absența unei deplasări sistematice semnificative de supraestimare sau subestimare a înălțimilor arborilor.

Tabelul 4.8 – Indicatorii de precizie pentru înălțimea arborilor obținuți în urma coregistrării norilor de puncte din scanarea cu laser terestru (TLS) și din UAV

Rețea	Specia	Bias [m]	RMSE [m]	MAE [m]	RRMSE [%]	R ²	r	CCC
rețea AM	fag	0,98	2,94	2,36	12,3	0,857	0,925	0,893
	molid	-0,07	2,96	2,36	11,9	0,881	0,938	0,903
rețea FA	fag	0,96	2,87	2,27	12,1	0,856	0,925	0,865
rețea MO	molid	-0,33	2,79	2,23	10,4	0,849	0,921	0,862

Estimările înălțimii arborilor obținute prin integrarea datelor TLS și UAV sunt caracterizate, în general, de o potrivire ridicată cu valorile înălțimii arborilor de referință în toate rețelele analizate (Figura 4.25). Comparativ cu estimările bazate exclusiv pe scanarea cu laser terestru (TLS), diferențele sunt mai reduse, iar tendința generală de subestimare este mult diminuată, fără evidențierea unei abateri sistematice clare.

Totuși, diferența față de valorile de referință nu a fost constantă (uniformă) pe întreg intervalul de variație a înălțimii. În rețeaua AM, valorile estimate au fost apropiate de valorile de referință. Astfel, în cazul speciei fag, atât în rețeaua de AM, cât și în rețeaua FA, s-a observat o ușoară tendință de supraestimare, mai evidentă la arborii de dimensiuni mari (peste 25 m). Pentru specia molid, valorile estimate au rămas apropiate de valorile de referință, fără o tendință clară de subestimare sau supraestimare.

Astfel, rezultatele obținute indică faptul că integrarea datelor TLS și UAV îmbunătățește estimarea înălțimii arborilor, prin compensarea limitărilor specifice tehnologiei TLS. Datele UAV surprind mai eficient treimea superioară a coroanei arborilor, permițând o identificare mai corectă a vârfului acestora. Prin completarea informației din zona superioară a coroanei și reducerea efectului de ocluzie, diferențele specifice observate în cazul estimărilor bazate exclusiv pe scanările TLS sunt reduse, iar concordanța dintre valorile estimate și cele de referință devine mai ridicată pentru întreg intervalul de variație a înălțimii.

Pentru a evalua semnificația statistică a diferențelor între rețelele de inventariere, distribuția erorilor absolute ale înălțimilor a fost analizată utilizând testul Kruskal-Wallis. Rezultatele obținute nu au indicat diferențe semnificative statistic între grupuri ($\chi^2 = 0,802$; $df = 3$; $p = 0,848$). Eroarea absolută a înălțimii este similară între rețele, cu valori ale mediei situate în jurul valorii de 2,4 m. Rețeaua FA prezintă o variabilitate ușor mai ridicată, însă diferențele nu sunt susținute statistic (Figura 4.15).

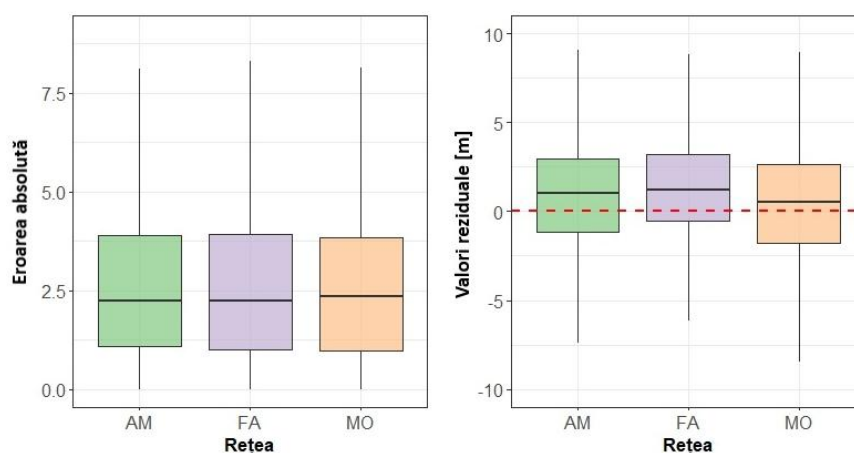


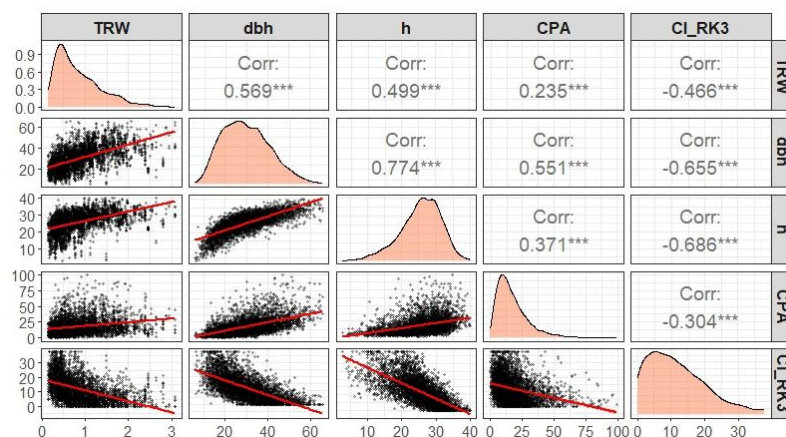
Figura 4.15 - Distribuția erorilor de estimare a înălțimii obținută din coreistrarea norilor de puncte TLS și UAV.

Evaluarea intensității competiției la nivel de arbore s-a realizat prin intermediul algoritmilor implementați în pachetul TreeCompR (Rieder et al. 2024). Analiza coeficienților de corelație Pearson (r) a evidențiat existența unor relații negative între indicii de competiție determinați și principalele caracteristici dendrometrice ale arborilor (diametrul de bază, înălțimea, proiecția coroanei) (Figura 4.16).

Rezultatele obținute indică faptul că indicele de competiție CI_RK3 (Rieder et al. 2024), are un efect negativ și semnificativ ($p < 0,001$) asupra caracteristicilor dendrometrice ale arborilor. Astfel, arborii supuși unei competiții intense prezintă valori reduse ale diametrului de bază (dbh) și a înălțimii (h), precum și o dezvoltare mai limitată a coroanei. Corelațiile identificate sunt mai pronunțate în raport cu dbh ($r = -0,655$, $p < 0,001$) și h ($r = -0,686$, $p < 0,001$), comparative cu suprafața proiecției coroanei ($r = -0,304$, $p < 0,001$). În cazul creșterii radiale, corelația cu CI_RK3 este moderată ($r = -0,466$, $p < 0,001$), indicând o reducere a ritmului de creștere în condiții de competiție ridicată (Figura 4.17).



Figura 4.16 - Matricea coeficienților de corelație Pearson (r) între indicii de competiție și principalele caracteristici dendrometrice ale arborilor



4.3. CARACTERISTICILE PROBELOR DE CREȘTERE RADIALĂ ANALIZATE

În urma prelevării probelor de creștere radială s-a obținut număr total de 1180 probe individuale valide, provenite din 96 sondaje permanente, distribuite în cadrul celor trei rețele de inventariere statistică (rețea AM, rețea FA și rețea MO). Astfel, în rețeaua AM (48 sondaje permanente) au fost prelevate probe de creștere radială de la un număr de 667 arbori, 356 aparținând speciei molid, iar 311 speciei fag. În rețeaua FA (38 sondaje permanente) a fost prelevat un număr de 405 probe de creștere, iar în rețeaua MO (10 sondaje permanente) un număr de 108. Așadar, la nivelul întregului set de date, pentru specia fag au fost prelevate 716 carote, reprezentând 60,6% din numărul total, iar pentru specia molid 464 carote (39,4%).

Pentru a analiza diferențele dintre distribuțiile pe specii ale numărului de carote prelevate pe categorii de diametre de bază (de 2 cm) între rețelele de inventariere a fost utilizat testul de verificare a semnificației Kolmogorov-Smirnov (KS). Astfel, pentru specia fag, nu au fost identificate diferențe semnificative între rețeaua FA și rețeaua AM ($D=0,040$; $p = 0,942$). În mod similar, pentru specia molid, comparația dintre rețeaua MO și rețeaua AM nu a evidențiat diferențe statistice semnificative ($D=0,379$; $p<0,001$). În schimb, în cadrul rețelei AM, se poate afirma faptul că există diferențe semnificative statistic între specia fag și molid ($D=0,379$, $p < 0,001$) (Figura 4.18).

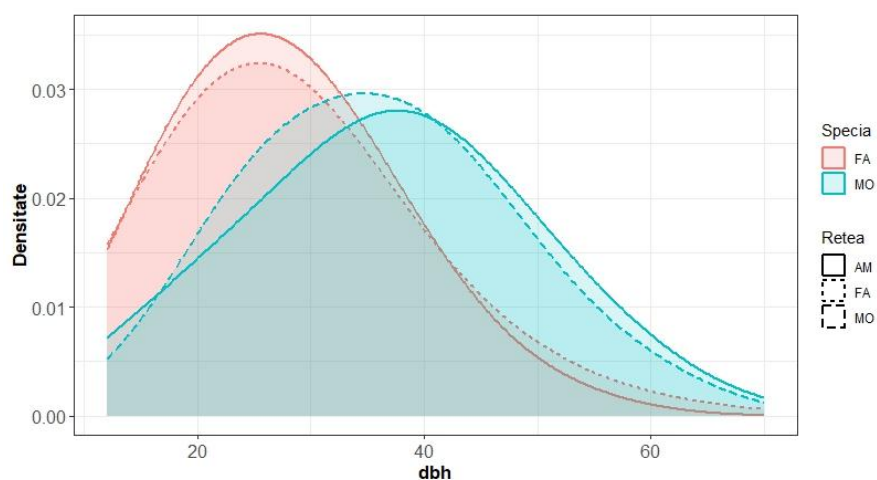


Figura 4.18 – Distribuțiile numărului de carote pe categorii de diametru de bază (2 cm), în raport cu rețeaua de inventariere statistică și specială.

În cadrul rețelelor de inventariere statistică, creșterea radială medie pe ultimii 10 ani (2015 – 2024) a înregistrat valori variabile în funcție de specie și rețea. Astfel, în rețeaua AM, fagul a prezentat o medie a creșterilor anuale de $0,83 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$, iar molidul $0,99 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$. Ca și comparație între rețele, pentru aceeași specie, diferențele sunt mai reduse decât variația interspecifică. În rețeaua FA, media creșterilor anuale a fost de $0,7 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$, corespunzând în același timp unei reduceri de aproximativ 15%, față de specia fag din rețeaua AM. Testul nonparametric Wilcoxon a indicat diferențe semnificative statistic între cele două rețele pentru specia fag ($W=69296$; $p < 0,001$), confirmând existența unui efect al rețelei (populației de amestec) asupra nivelului mediei creșterilor radiale.

Pentru specia molid, media creșterilor anuale a fost de $0,99 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$, în rețeaua AM, și de $1,1 \text{ mm} \cdot \text{an}^{-1}$ în rețeaua MO, ceea ce reprezintă o diferență de creștere cu aproximativ 14% mai mare în rețeaua MO comparativ cu rețeaua AM. În acest caz testul nonparametric Wilcoxon nu a evidențiat diferențe semnificative statistic între cele două rețele ($W=16100$; $p = 0,080$). Prin aplicarea testului ANOVA s-a evidențiat existența unor diferențe semnificative statistic ($F=78,83$; $p < 0,001$) între mediile creșterilor radiale înregistrate de cele două specii analizate (fag și molid) în cele trei rețele de cercetare.

4.4. MODELAREA CREȘTERII RADIALE A ARBORILOR ÎN RAPORT CU DIMENSIUNILE COROANEI ȘI COMPETIȚIA ARBORILOR

Analiza comparativă a caracteristicilor dimensionale ale coroanei arborilor (diametrul și lungimea) și a indicatorilor de creștere radială, în raport cu rețeaua de inventariere statistică (rețea AM, FA, MO), a evidențiat existența unor diferențe semnificative statistic între rețele, atât în cazul creșterii radiale, cât și al coroanei arborilor ($p < 0,05$). În ceea ce privește indicatorii de creștere radială, coeficientul de variație al lățimii inelelor (cvTRW) a indicat diferențe semnificative între rețele ($p = 0,021$), evidențiind existența unor variații specifice fiecărei rețele în determinarea creșterii arborilor. De asemenea, s-a evidențiat faptul că lățimea medie a inelelor de creștere (TRW) a diferit semnificativ între rețelele de inventariere statistică ($p = 0,012$).

În același timp, diferențe semnificative au fost identificate și în cazul caracteristicilor coroanei. Indicele de asimetrie (asim), proiecția coroanei (CPA), raza coroanei (CR), precum și raportul dintre lungimea coroanei și raza coroanei (CSLC) a prezentat variații semnificative între rețelele de inventariere statistică ($p < 0,001$), indicând faptul că la nivel individual arborii din cele trei rețele de inventariere statistică sunt caracterizați prin forme diferite ale coroanelor, reflectând condiții distincte de competiție și organizare structurală pe verticală a arboretelor.

Analiza corelației Pearson a evidențiat existența unor corelații moderate între indicatori de creștere și caracteristicile coroanei. Creșterea radială (TRW) a fost corelată pozitiv cu lungimea coroanei (CL; $r = 0,460$), înălțimea arborelui (h ; $r = 0,480$) și diametrul coroanei (CD; $r = 0,250$) și negativ cu indicii de competiție (CI; $r = -0,330$) (Figura 4.19). De asemenea, creșterea în suprafața de bază (BAI) prezintă corelații de la moderat la puternic pozitive cu dimensiunile coroanei, în special cu lungimea acesteia (CL; $r = 0,570$) dar și cu înălțimea arborelui ($r = 0,590$) și o corelație moderat negativă cu indicii de competiție (CI; $r = -0,400$).

Coeficientul de variație al creșterii radiale (cvTRW) a fost de la slab până la moderat corelat cu dimensiunile coroanei, prezentând corelații negative cu lungimea coroanei ($r = -0,110$) dar și cu înălțimea arborelui ($r = -0,120$), respectiv corelații pozitive slabe cu indicii de competiție ($r = 0,070$). *Aceste rezultate sugerează că arborii cu coroane mai dezvoltate tind să înregistreze o creștere radială mai stabilă, în timp ce competiția este asociată cu o variabilitate ușor ridicată a creșterii radiale.*

În ansamblu, se poate evidenția faptul că variabilele coroanei, în special CL, sunt asociate pozitiv cu TRW, în timp ce indicii de competiție (CI) are un efect negativ moderat. Valorile coeficienților de corelație Pearson (r) cuprinse între 0,3 – 0,6 reflectă asocieri liniare de intensitate moderată până la ridicată între variabile ale coroanei și indicatorii de creștere radială. Aceste rezultate evidențiază că o parte semnificativă a variației creșterii radiale este asociată cu dimensiunile coroanei.

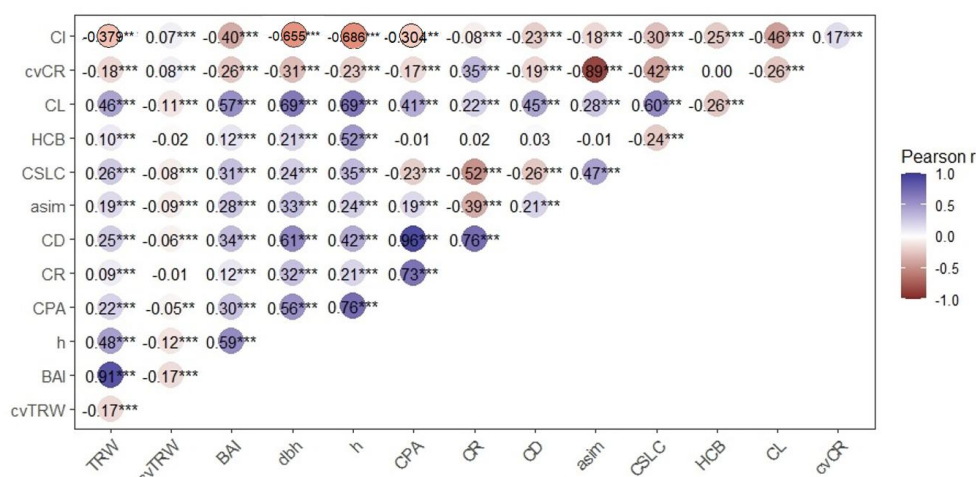


Figura 4.19 – Corelație între variabile ale coroanei și indicatori de creștere: creștere radială – TRW; coeficient de variație a creșterii radiale – cvTRW; creștere în suprafața de bază – BAI; diametrul de bază – dbh; înălțimea arborilor – h; proiecția coroanei – CPA; raza coroanei – CR; diametrul coroanei – CD; asimetria coroanei – asim; raportul dintre lungimea coroanei (CL) și raza coroanei (CR) – CSLC; înălțimea bazei coroanei – HCB; coeficientul de variație a razei coroanei – cvCR.

Pentru a evalua, la nivelul fiecărei rețele de inventariere (AM, FA, MO) interacțiunea dintre caracteristicile coroanei și creșterea radială, au fost adoptate modele liniare mixte, care au luat în considerare structura ierarhică a datelor la nivel de suprafață de probă permanentă (SP).

Rezultatele obținute au evidențiat faptul că lungimea coroanei (CL) are un efect pozitiv și semnificativ ($p < 0,001$) asupra creșterii radiale. În toate tipurile de arborete analizate, arborii care au coroane mai lungi prezintă, în medie, valori mai ridicate ale creșterii radiale. Deși intensitatea relației variază între rețele, sensul acesteia rămânând același (pozitiv).

Analizând comparativ, s-a evidențiat faptul că relația liniară dintre lungimea coroanei (CL) și creșterea radială este semnificativ mai puternică în arboretele de amestec (rețea AM) decât în arboretele de fag (rețea FA; $\beta = 0,0138$; $p < 0,001$). Diferențele înregistrate între dreptele de regresie specifice la nivelul rețelei AM și respectiv rețelei MO este la limita semnificației statistice ($p=0,055$), în timp ce între cele specifice rețelei FA și rețelei MO nu au fost identificate diferențe semnificative ($p=0,925$). Astfel, s-a

constatat că tipul de arboret influențează intensitatea relației dintre lungimea coroanei (CL) și creșterea radială, fără a modifica sensul acesteia.

Un fapt similar a fost observat pentru diametrul coroanei (CD), care are, de asemenea, un efect pozitiv și semnificativ statistic ($p < 0.001$) asupra creșterii radiale. Astfel, dimensiunea coroanei, exprimată prin CL și CD, este asociată pozitiv cu creșterea radială, iar această relație este prezentă în toate rețelele de inventariere statistică, cu diferențe moderate de intensitate între acestea.

În ceea ce privește capacitatea explicativă a modelelor adoptate, modelul care include interacțiunea CL x rețea (AM, FA, MO) explică 26,4% din variația creșterii radiale ($R^2 = 0,264$), iar 37,1% atunci când este inclusă și variația între suprafețele de probă din cadrul fiecărei rețele ($R^2 = 0,371$). Modelul care include CD explică 20,6% din variația creșterii radiale ($R^2 = 0,206$) și 36,0% atunci când este inclusă și variația între SP ($R^2 = 0,360$). Astfel, lungimea coroanei (CL) prezintă o capacitate explicativă mai ridicată, în timp ce diametrul coroanei (CD) are coeficienți mai mari, sugerând o sensibilitate mai accentuată a creșterii radiale la variația lățimii coroanei.

Pentru a evalua contribuția simultană a CL și CD asupra creșterii radiale (TRW), a fost adoptat un model liniar mixt de forma (3):

$$TRW_i \sim CL * rețea + CD * rețea + (1|SP) \quad (3)$$

unde:

TRW_i reprezintă lățimea inelului, mm;

CL - lungimea coroanei, m;

CD - diametrul coroanei, m;

rețea - rețea de inventariere statistică (AM, FA, MO);

SP - suprafața de probă.

Rezultatele obținute au evidențiat faptul că modelul care a inclus simultan lungimea coroanei (CL), diametrul coroanei (CD) și interacțiunile acestora cu tipul de arboret (rețea AM, FA, MO), a evidențiat efecte pozitive ale ambelor variabile asupra creșterii radiale (Figura 4.20). Coeficientul estimat (β) pentru CL a fost 0,044 ($p < 0,001$), iar pentru CD a fost 0,057 ($p < 0,001$), indicând faptul că fiecare dintre cele două dimensiuni ale coroanei arborilor contribuie independent la explicarea variației TRW. Interacțiunile au arătat că efectul CL variază între rețele, în timp ce efectul CD este mai stabil între rețele de inventariere statistică.

Comparația pe baza criteriului AIC a modelelor candidate a evidențiat că modelul care include CL și CD descrie datele considerabil mai bine decât modelul care include CL ca singură variabilă ($\Delta AIC = 123$), ceea ce indică faptul că CD îmbunătățește modelul și contribuie pozitiv la explicarea creșterii radiale. Modelul explică 28,7% din variația creșterii radiale ($R^2 = 0,287$) și aproximativ 40% atunci când este luată în considerare și variația între suprafețele de probă ($R^2 = 0,404$). Mai mult, valorile factorilor de caracterizare a varianței (lungimea și diametrul coroanei) ($VIF < 2,1$) respectă condiția de coliniaritate, susținând stabilitatea estimărilor obținute, procedându-se la utilizarea simultan a acestora.

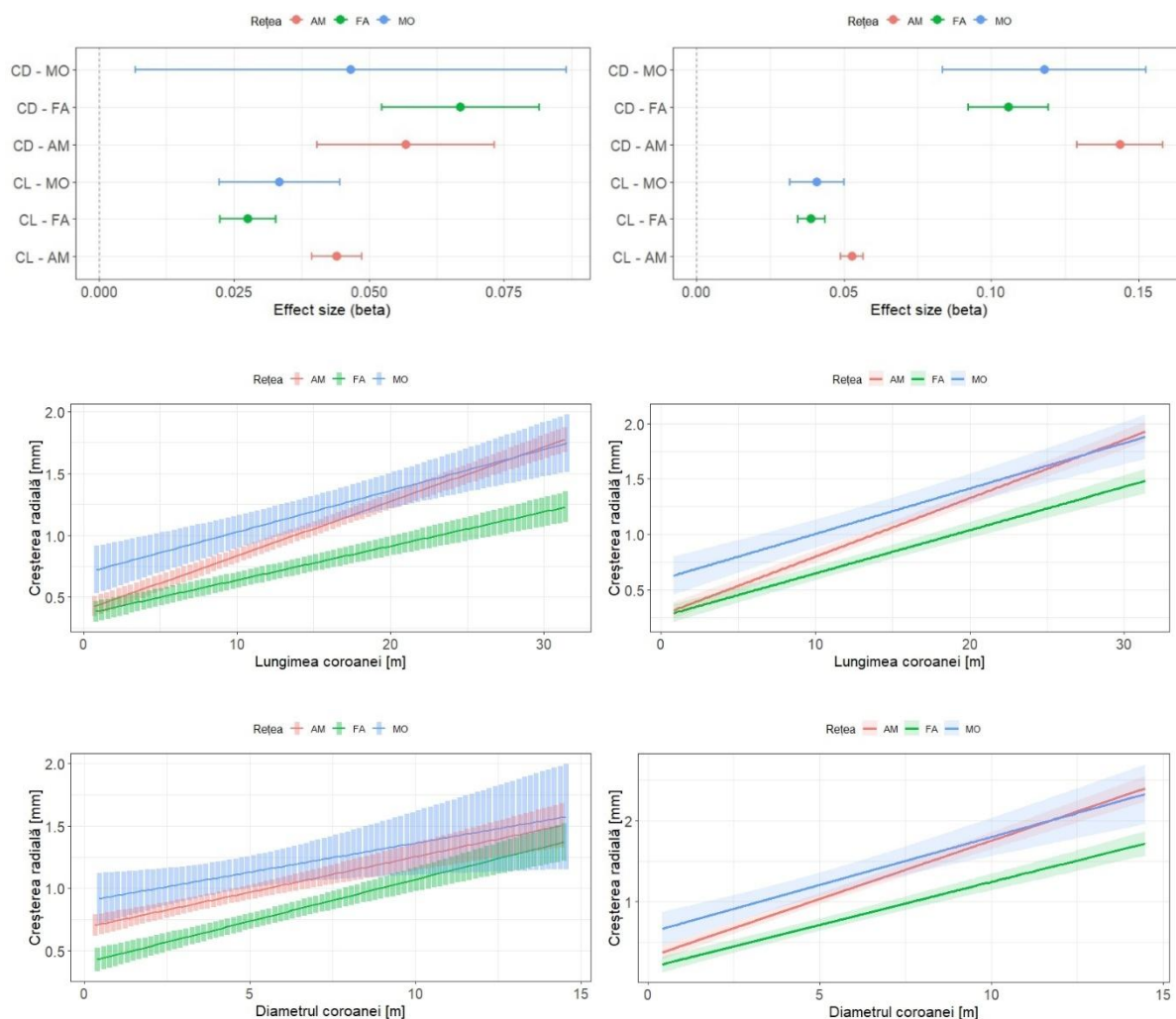


Figura 4.20 – Impactul tipurilor de arborete asupra legăturii dintre creșterea radială și variabilele coroanei CL/CD. Graficele din partea stângă ilustrează relațiile estimate pe baza modelului combinat care include simultan lungimea coroanei (CL) și diametrul coroanei (CD).

Pentru cuantificarea efectului competiției locale asupra creșterii radiale, a fost adoptat un model liniar mixt (4), care include valorile standardizate ale coroanei utilizate anterior (CLz, CDz), precum și valoarea standardizată a indicelui de competiție (Clz). Înainte de modelare, variabilele au fost scalate în intervalul 0 – 1 utilizând transformarea min-max $f(x) = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$, unde x_i reprezintă valoarea estimată a variabilei, iar $x_{\min}$ și $x_{\max}$ reprezintă valorile minimă și maximă ale acesteia. Modelul a inclus interacțiunile dintre variabilele explicative și rețelele de inventariere statistică, precum și un intercept aleator la nivel de sondaj permanent (SP).

$$TRWz_i \sim CLz * re\text{țea} + CDz * re\text{țea} + Clz + CLz: Clz + CDz: Clz + (1|SP) \quad (4)$$

unde:

TRW_z reprezintă valoarea standardizată a lățimii inelului anual, mm;

CLz - valoarea standardizată a lungimii coroanei, m;

CDz – valoarea standardizată a diametrului coroanei, m;

rețea - rețea de inventariere statistică (AM, FA, MO);

Clz - valoarea standardizată a indicelui de competiție, m;

SP - suprafața de probă.

Cercetările au evidențiat că indicele de competiție (Clz) a avut un efect negativ puternic și semnificativ asupra valorilor standardizate ale creșterii radiale (TRWz) ($\beta = -0,194$, $SE = 0,022$, $t = -8,97$, $p < 0,001$), indicând reducerea creșterii radiale pe măsura intensificării competiției locale. Lungimea coroanei (CLz) a prezentat cel mai pronunțat efect pozitiv asupra TRWz ($\beta = 0,329$, $p < 0,001$), iar diametrul coroanei (CDz) a avut de asemenea un efect pozitiv semnificativ ($\beta = 0,159$, $p < 0,001$), evidențiind faptul că arborii cu coroane dezvoltate înregistrează valori mai mari ale creșterii radiale (Tabelul 4.9).

Interacțiunea dintre lungimea coroanei și competiție (CLz : Clz) a fost negativă și semnificativă ($\beta = -0,110$, $p < 0,001$), ceea ce indică faptul că efectul favorabil al unei coroane lungi este diminuat în condiții de competiție ridicată. În schimb, interacțiunea dintre diametrul coroanei și competiție (CDz : Clz) nu a fost semnificativă ($p = 0,920$), ceea ce indică faptul că influența diametrului coroanei asupra creșterii radiale nu este condiționată de intensitatea competiției în același mod.

Efectele asociate rețelelor de inventariere statistică indică diferențe structurale între tipurile de arborete. Comparativ cu rețeaua AM, rețeaua FA a înregistrat valori semnificativ mai reduse ale TRWz ($\beta = -0,334$, $p < 0,001$), în timp ce rețeaua MO a prezentat valori semnificativ mai ridicate ($\beta = 0,317$, $p = 0,013$). Interacțiunea CLz : rețea FA a fost negativă și semnificativă ($\beta = -0,100$, $p = 0,003$), indicând o pantă mai redusă dintre lungimea coroanei și creșterea radială.

Tabelul 4.9 - Coeficienții estimați ai efectelor fixe din modelul liniar mixt

Efect fix	Coeficient estimat [β]	Eroare standard	Statistica t	Valoare p
(Intercept)	0,021	0,052	0,412	$p = 0,681$
CLz	0,329	0,023	13,738	$p < 0,001$
rețeaFA	-0,334	0,078	-4,260	$p < 0,001$
rețeaMO	0,317	0,125	2,519	$p = 0,013$
CDz	0,159	0,025	6,125	$p < 0,001$
Clz	-0,194	0,021	-8,967	$p < 0,001$
CLz:rețeaFA	-0,099	0,034	-2,923	$p = 0,003$
CLz:rețeaMO	-0,109	0,057	-1,913	$p = 0,056$
rețeaFA:CDz	0,024	0,034	0,693	$p = 0,488$
rețeaMO:CDz	-0,019	0,067	-0,292	$p = 0,770$
CLz:Clz	-0,109	0,016	-6,614	$p < 0,001$
CDz:Clz	-0,001	0,017	-0,099	$p = 0,920$

Pentru a cuantifica modul în care competiția locală modifică relația dintre parametrii coroanei și creșterea radială, valorile standardizate ale indicelui de competiție (Clz) au fost sintetizate în trei niveluri diferite prin percentilele p10, p50 și p90. Pentru a verifica relevanța structurală a acestor praguri, distribuția arborilor în raport cu poziția cenotică (clasa Kraft) a fost analizată în raport cu valoarea indicelui de competiție standardizat (Clz).

Testul χ^2 a evidențiat o asociere ridicată și semnificativă între Clz și poziția cenotică ($\chi^2 = 1019,4$; $df = 9$; $p < 0,001$). Astfel, în condiții de competiție slabă, arborii aparțin preponderent claselor superioare

(Kraft I – II), în timp ce la competiție ridicată domină clasele Kraft III – V. Proportia arborilor din clasa Kraft III crește de la 2,5%, la competiție slabă, la peste 46% la competiție ridicată, evidențiind un gradient structural coerent între poziția cenotică și intensitatea competiției.

Relația dintre creșterea radială și lungimea coroanei evidențiază un efect dependent de intensitatea competiției. În condiții de competiție slabă, intensitatea relației este mai ridicată, indicând un răspuns pozitiv mai puternic al creșterii radiale la creșterea lungimii coroanei. Pe măsură ce competiția crește, intensitatea relației se reduce progresiv, reflectând diminuarea efectului pozitiv al lungimii coroanei în condiții de competiție ridicată. Această tendință este rezultatul interacțiunii negative semnificative dintre CLz și Clz identificată anterior ($\beta = -0,109$, $p < 0,001$) (Figura 4.21).

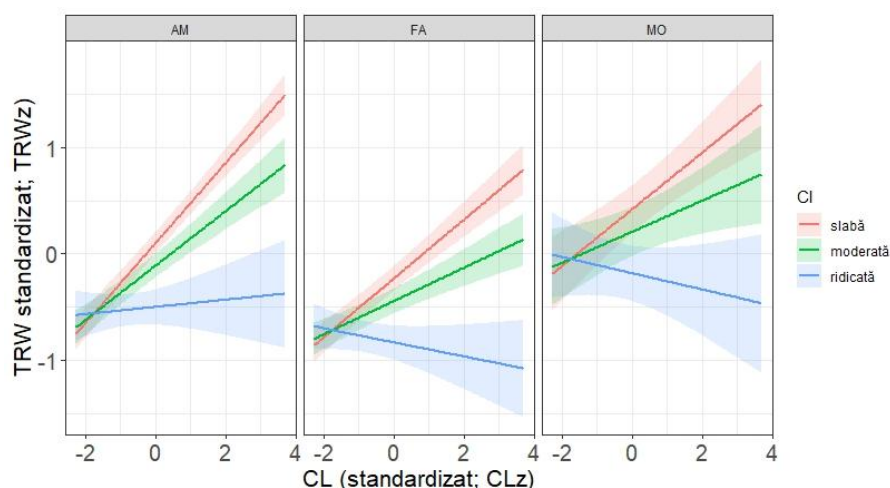


Figura 4.21 – Efectul competiției (Clz) asupra relației dintre lungimea coroanei (CLz) și creșterea radială (TRWz).

În schimb, relația dintre TRWz și CDz a evidențiat un efect pozitiv relativ constant în raport cu nivelul competiției, fără modificări evidente ale intensității relației. Absența interacțiunii semnificative dintre CDz și Clz ($\beta = -0,001$, $p = 0,920$) confirmă faptul că influența diametrului coroanei (CD) asupra creșterii radiale nu este condiționată de intensitatea competiției în același mod ca lungimea coroanei (CL). Independent de aceste interacțiuni, efectul direct al competiției rămâne negativ și puternic semnificativ ($\beta = -0,194$, $p < 0,001$), indicând reducerea sistematică a creșterii radiale odată cu intensificarea competiției (Figura 4.22).

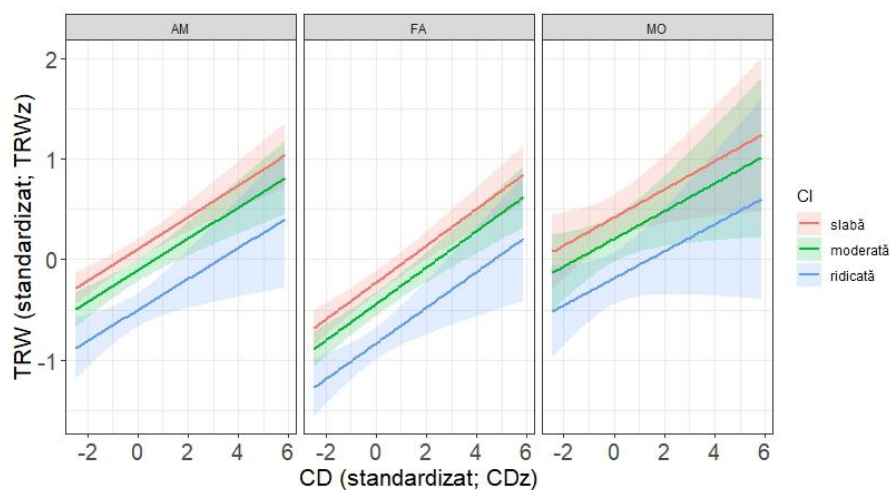


Figura 4.22 – Efectul competiției (Clz) asupra relației dintre diametrul coroanei (CDz) și creșterea radială (TRWz).

Pentru a evalua impactul direct și indirect al competiției asupra creșterii radiale, a fost utilizat un model de ecuații structurale (SEM), estimat la nivel de sondaj permanent (SP). Structura modelului ajustat include relațiile dintre competiție (CI), variabilele coroanei (CL, CD) și creșterea radială. Modelul adoptat și aplicat s-a dovedit potrivit și eficient pentru ajustarea foarte bună a datelor ($\chi^2 = 0,066$; $p = 0,798$; CFI = 1,00; SRMR = 0,005).

Rezultatele obținute indică faptul că intensitatea competiției exercită un efect negativ semnificativ asupra dezvoltării pe verticală a coroanei ($\beta = -0,462$, $p < 0,001$). Totodată, CL favorizează creșterea în diametru a acesteia ($\beta = 0,324$, $p < 0,001$), evidențiind dependența directă între cele două variabile (Figura 4.23). Modelul explică 32% din variația lungimii coroanei ($R^2 = 0,321$) și 17% din variația diametrului coroanei ($R^2 = 0,169$).

În ceea ce privește creșterea radială (TRW), competiția prezintă un efect direct negativ semnificativ ($\beta = -0,257$, $p < 0,001$). Lungimea coroanei (CL) prezintă o contribuție pozitivă asupra creșterii radiale ($\beta = 0,236$, $p < 0,029$), în timp ce diametrul coroanei (CD) nu are un efect direct semnificativ asupra TRW ($\beta = -0,068$, $p < 0,435$). Însă, efectul indirect al competiției asupra creșterii radiale (TRW), exercitat prin CL, este semnificativ ($\beta_{\text{indirect}} = -0,109$, $p < 0,044$). Efectul total al competiției asupra TRW este de $\beta = -0,356$ ($p < 0,001$), ceea ce indică faptul că aproximativ o treime din influența asupra creșterii radiale este exercitată prin intermediul CL, în timp ce componenta directă rămâne predominantă. La nivel de sondaj permanent (SP) variabilele incluse în model surprind 47,5% din variația creșterii radiale ($R^2 = 0,475$) (Figura 4.23).

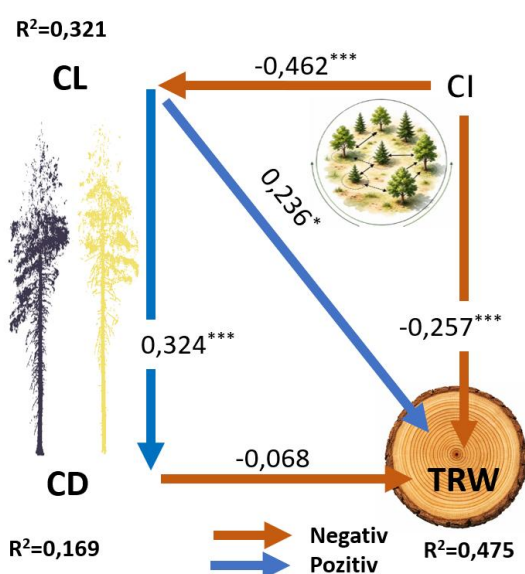


Figura 4.23 – Reprezentarea grafică a modelului de ecuații structurale (SEM).

Pentru a evalua în ce măsură caracteristicile coroanei și intensitatea competiției pot explica dinamica creșterii radiale în timp, a fost realizată modelarea și predicția curbelor de creștere pe baza caracteristicilor arborilor. În acest scop, creșterea radială (TRW) a fost modelată în raport cu dimensiunile coroanei, respectiv lungimea (CL) și diametrul acesteia (CD), precum cu indicii de competiție (CI), variabile care reflectă poziția arborilor în arboret și accesul acestora la resurse. Componenta temporală a creșterii radiale a fost integrată prin includerea anului observației ca variabilă

explicativă, precum și prin introducerea interacțiunilor dintre anul observației și variabilele coroanei și competiției, permițând estimarea modului în care influența caracteristicilor coroanei și a competiției asupra creșterii radiale se modifică în timp.

În vederea evaluării efectului direct al competiției, au fost adoptate două modele candidate. Primul model a luat în considerare exclusiv variabilele coroanei și componenta temporală a creșterii, alături de variabila care determină rețeaua de inventariere statistică. În cel de-al doilea model au fost incluse indicele de competiție (CI) și interacțiunea acestuia cu variabila temporală (5).

$$TRWz_i \sim CDz + CLz + Clz + year + CLz:year + CDz:year + Clz:year + retea + (1|tree_id) \quad (5)$$

unde:

$TRWz_i$ reprezintă valoarea standardizată a lățimii inelului anual, mm;

CLz - valoarea standardizată a lungimii coroanei, m;

CDz - valoarea standardizată a diametrului coroanei, m;

Clz - valoarea standardizată a indicelui de competiție, m;

rețea - rețeaua de inventariere statistică (AM, FA, MO);

year - anul observației;

tree_id - număr de identificare al arborelui.

Compararea celor două modele a evidențiat o ușoară îmbunătățire a performanței acestora care include indicele de competiție (CI). Modelul extins prezintă o valoare mai redusă a criteriului informațional Akaike ($AIC = 10536,7$) în comparație cu modelul care nu include CI ($AIC = 10552,3$). Testul LRT (Likelihood Ratio Test) a evidențiat faptul că această diferență este semnificativă statistic ($\chi^2 = 19,68$; $df = 2$; $p < 0,001$). Curba creșterilor radiale cumulate exprimată prin utilizarea parametrilor formei coroanei reproduce traiectoriile valorilor măsurate ale creșterilor pentru fiecare din cele trei rețele de inventariere statistică analizate (AM, FA, MO), valorile prezise fiind comparabile cu cele observate (Figura 4.24).

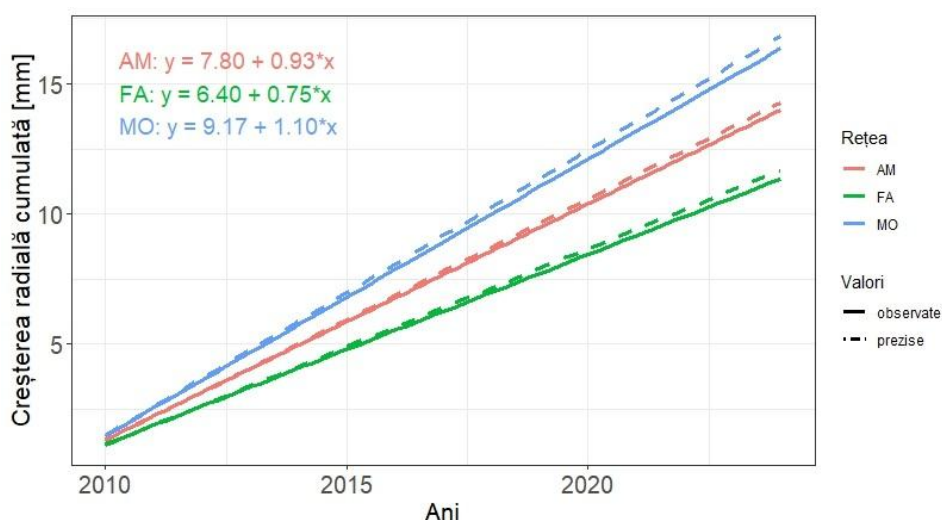


Figura 4.24 – Creșterea radială cumulată observată și prezisă pentru cele trei rețele de inventariere statistică (AM, FA, MO).

Deși includerea indicelui de competiție îmbunătățește performanța modelului, contribuția acestuia la capacitatea explicativă rămâne relativ scăzută comparativ cu variabilele coroanei. Coeficientul de determinare marginal (R^2_m) crește sensibil de la 0,169 (rețeaua AM), în cazul modelului fără indice de competiție, la $R^2_m = 0,177$, respectiv în cazul celui care include indicele de competiție, în timp ce coeficientul de determinare condițional (R^2_c) rămâne aproximativ constant ($R^2_m = 0,686$), în ambele cazuri. Totodată, coeficientul de determinare marginal crește sensibil de la 0,189 (rețea FA), respectiv de la 0,215 (rețea MO), în cazul modelului fără indice de competiție, la $R^2_m = 0,209$ (rețea FA), respectiv $R^2_m = 0,220$ (rețea MO), în cazul modelului care include indicele de competiție, în timp ce coeficientul de determinare condițional (R^2_c) rămâne aproximativ constant, $R^2_m = 0,643$ (rețea FA), respectiv $R^2_m = 0,743$ (rețea MO), pentru ambele cazuri (Figura 4.25).

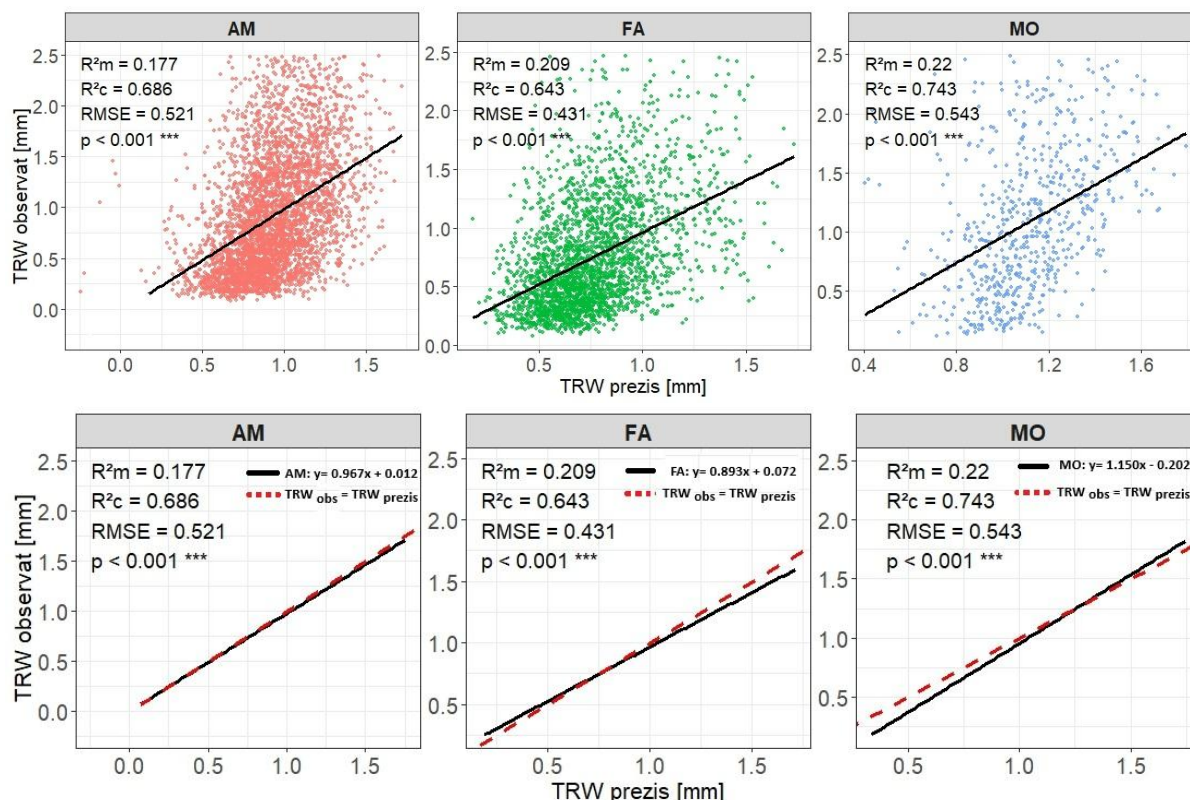


Figura 4.25 – Relația dintre valorile observate și cele prezise ale creșterii radiale (TRW) estimate pe baza variabilelor coroanei (CL; CD), pentru cele trei rețele de inventariere statistică (AM, FA, MO).

Aceste rezultate indică faptul că variabilele formei coroanei reprezintă principalii predictorii ai creșterii radiale (TRW). Evaluarea preciziei modelului, realizată prin compararea valorilor măsurate și prezise ale creșterii radiale, indică faptul că variabilele coroanei pot estima dinamica creșterii inelelor anuale. Luând în considerare toate rețelele analizate, modelul bazat exclusiv pe variabilele coroanei a înregistrat o valoare a RMSE = 0,49 mm, iar includerea indicelui de competiție a condus la o reducere marginală a erorii (RMSE = 0,48 mm), indicând faptul că utilizarea variabilelor coroanei pot prezice eficient modelele de creștere și valida rezultatele obținute în urma aplicării modelului de ecuații structurale (SEM).

5. CONCLUZII

Pe baza cercetărilor efectuate cu ocazia elaborării tezei de doctorat și a rezultatelor obținute în raport cu scopul și obiectivele propuse privind determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și analiza creșterii radiale în arborete din vestul Carpaților Meridionali, prin utilizarea datelor integrate de teledetecție achiziționate de senzori activi și pasivi, se pot desprinde următoarele concluzii:

❖ **Cu privire la estimarea unor caracteristici dimensionale ale arborilor prin utilizarea tehnicilor specifice teledetecției.**

- Pentru estimarea caracteristicilor dimensionale ale arborilor, în urma analizei erorilor de coregistrare a norilor de puncte s-a evidențiat că la nivelul majorității suprafețelor de probă permanente (SPP), coregistrarea norilor de puncte se realizează în limite reduse ale erorilor, majoritatea valorilor acestora fiind încadrate sub pragurile considerate acceptabile (sub 10 mm în două treimi din cazuri și sub 20 mm în peste 90% dintre acestea). În același timp, analiza comparativă între rețelele cercetare analizate, rezultate performante au fost obținute la arborii din cuprinsul rețelei de fag (FA), unde la nivelul majorității suprafețelor de probă permanente (SPP) se încadrează în intervale reduse ale erorii, în timp ce în cadrul rețelei de amestec (AM) și a celei de molid (MO) s-au obținut valori apropiate și o variabilitate mai accentuată, indicând o influență a condițiilor structurale și a modului de achiziție asupra calității coregistrării norilor de puncte. Totodată, suprafețele de probă permanente (SPP) în care se înregistrează erori de coregistrare mai ridicate (≥ 20 mm), erorile sunt asociate frecvent cu un grad redus de suprapunere între scanări, ceea ce evidențiază rolul determinant al acestuia în stabilitatea procesului de coregistrare și necesitatea asigurării unor condiții adecvate de achiziție a datelor de teledetecție pentru obținerea unor estimări precise.
- În ceea ce privește *relația dintre numărul de arbori inventariați și acuratețea de detecție*, s-a evidențiat faptul că, pe măsură ce numărul total de arbori inventariați din suprafețele de probă permanente (SPP) crește, numărul de arbori detectați corect (TP) urmează aceeași tendință, reflectând capacitatea metodei de a identifica o pondere ridicată din arborii de referință (inventariați la sol). Cu toate acestea, acuratețea detecției înregistrează o scădere odată cu creșterea numărului de arbori din cuprinsul SPP, ceea ce indică o reducere a eficienței procesului de segmentare a arborilor în condiții de desime ridicată ceea ce demonstrează faptul că, în suprafețele de probă permanente cu număr mare de arbori, creșterea complexității structurale, determinată de suprapunerea coroanelor și distanța redusă dintre arbori, conduce la o frecvență mai ridicată a omisiunilor (FN), afectând performanța totală a detecției.
- Pentru estimarea diametrului de bază (dbh) al arborilor prin scanarea cu laser terestru (TLS), rezultatele au scos în evidență existența unei strânse concordanțe (apropieri foarte ridicată) între valorile estimate și valorile măsurate în teren la arborii de referință, caracterizată prin relații liniare foarte puternice și o variabilitate redusă a erorilor. Putem astfel afirma că prin utilizarea TLS s-au obținut valori de precizie ridicată ale diametrului de bază măsurat în teren la arborii de referință, la nivelul tuturor rețelelor

analizate (AM, FA, MO), ceea ce indică o stabilitate ridicată a metodei în condiții diferite. Gradul ridicat de concordanță (apropiere) dintre valorile estimate și cele de referință confirmă capacitatea tehnologiei TLS de a reproduce fidel dimensiunile trunchiului arborilor la nivel unitar (individual). Tendința de abatere față de valorile de referință este redusă și sistematic pozitivă, indicând o ușoară supraestimare a dbh, însă de amplitudine mică și constantă, fără impact semnificativ asupra acurateței la nivel general. Această tendință evidențiază existența unui bias sistematic redus, dar care nu afectează robustețea estimărilor (precizia estimărilor). Astfel, diametrul de bază al arborilor poate fi determinat cu un nivel ridicat de precizie, confirmând potențialul ridicat al TLS pentru determinarea diametrului de bază al arborilor (dbh) din cuprinsul unui arboret.

- *Estimarea înălțimii totale a arborilor prin scanarea cu laser terestru (TLS) se caracterizează printr-o acuratețe mai redusă comparativ cu estimarea diametrului de bază al arborilor (dbh), precum și o variabilitate mai ridicată a erorilor.* Estimările înălțimii arborilor sunt caracterizate predominant de o tendință sistematică de subestimare, prezentă în toate rețelele cercetare (AM, FA, MO), dar cu o intensitate diferită în funcție de particularitățile structurale ale arboretelor. Această tendință nu este constantă pe întreg intervalul de variație al înălțimii arborilor, în anumite situații evidențiindu-se și supraestimări asociate identificării incorecte a vârfului arborelui, cauzată de particularitățile specifice ale coroanelor arborilor.

Subestimarea sistematică a înălțimilor arborilor este determinată de limitările implicite ale tehnologiei TLS, performanța algoritmilor de segmentare, cât și de complexitatea arboretelor, în special prin efectele de ocluzie generate de arborii vecini și de stratificarea coroanelor arborilor. În aceste condiții fasciculul laser nu reușește întotdeauna să intercepteze apexul (vârful arborelui), ceea ce conduce la o reconstrucție incompletă a părții superioare a coroanei și, implicit la subestimarea înălțimii totale. În acest context, erorile de estimare a înălțimii arborilor nu au un caracter aleatoriu, ci sunt dependente de structura arboretului și de dimensiunile arborilor, indicând o limitare sistematică a scanărilor cu laser terestru (TLS) în reprezentarea completă a treimii superioare a coroanei arborilor.

- *Estimarea înălțimii arborilor prin integrarea datelor TLS și UAV evidențiază o îmbunătățire a acurateței față de estimările bazate exclusiv pe scanarea cu laser terestru, caracterizată printr-o concordanță ridicată cu valorile de referință și prin reducerea erorilor de estimare.* Tendința sistematică de subestimare observată în cazul TLS este diminuată, fără evidențierea unei abateri consistente de supraestimare sau subestimare, ceea ce indică o corectare eficientă a erorilor specifice scanărilor cu laser terestru. Îmbunătățirea performanței fiind determinată de contribuția datelor UAV, care permit reprezentarea completă a părții superioare a coroanei și identificarea mai precisă a vârfului arborilor, reducând efectele de ocluzie caracteristice scanării cu laser terestru. În aceste condiții, estimările înălțimilor arborilor prin utilizarea integrat a tehnicilor TLS și UAV, devin mai stabile pe întreg intervalul de variație a înălțimilor, iar

diferențele față de valorile de referință (măsurate la arbori în teren) sunt mai reduse și mai uniform distribuite, inclusiv în cazul arborilor de talie mare. Totodată, acuratețea estimărilor se menține relativ constantă între rețelele analizate (AM, FA, MO), fără diferențe semnificative ale erorilor, ceea ce indică o aplicabilitate ridicată a metodei în condiții variate. Astfel, integrarea datelor TLS și UAV se conturează ca o abordare eficientă pentru estimarea înălțimii arborilor, prin compensarea limitărilor TLS și îmbunătățirea reprezentării complete a coroanei arborilor.

- În ceea ce privește *relația dintre intensitatea competiției și caracteristicile dimensionale ale arborilor* (diametrul de bază, înălțimea arborilor, proiecția coroanei), s-a evidențiat faptul că o creștere a intensității competiției este asociată cu o diminuare a dimensiunilor individuale ale arborilor. Astfel, arborii supuși unei competiții intense tind să prezinte valori mai reduse ale diametrului de bază și a înălțimii, precum și o dezvoltare mai limitată coroanei. Această tendință reflectă restricțiile impuse de competiția pentru resurse esențiale, precum lumina, apa și nutrienții, care conduc la o alocare mai redusă a resurselor către creșterea radială (TRW) și dezvoltarea arborilor. În același timp, relațiile identificate au evidențiat că dimensiunile coroanei arborilor au un rol esențial în atenuarea efectelor competiției, arborii cu coroane mai bine dezvoltate reușind să atenueze parțial impactul negativ al acesteia. Așadar, intensitatea competiției reprezintă un factor determinant în creșterea și dezvoltarea arborilor, în special în condiții de desime ridicată a arboretului.

❖ **Cu privire la stabilirea caracteristicilor coroanelor arborilor prin procesarea datelor de teledetecție și utilizarea modelelor de creștere radială în raport cu acestea.**

- Prin *estimarea caracteristicilor coroanelor arborilor* derivate din datele de teledetecție s-a pus în evidență existența unei corelații pozitive între dimensiunile coroanei și creșterea radială a arborilor, precum și a unei corelații negative între indicii de competiție și aceasta. Astfel, creșterea radială (TRW) este moderat corelată pozitiv cu lungimea coroanei (CL) și înălțimea arborilor, iar în ceea ce privește corelația cu diametrul coroanei (CD), aceasta este mai slabă, în timp ce cu indicii de competiție (CI) prezintă o corelație negativă de intensitate moderată. Acest fapt conduce la ipoteza potrivit căreia arborii care au coroane dezvoltate tind să înregistreze valori ridicate ale creșterii radiale.
- În urma *analizei variabilității creșterii radiale* s-a observat existența unei corelații mai slabe între coeficienții de variație ai creșterii radiale (cvTRW) și caracteristicile coroanei, acesta fiind negativ corelat cu lungimea coroanei (CL) și înălțimea arborilor și pozitiv, deși de intensitate mai redusă, cu indicii de competiție (CI), indicând astfel faptul că arborii care au coroane dezvoltate tind să prezinte o creștere radială mai stabilă, în timp ce intensitatea competiției este asociată cu o variabilitate ușor mai ridicată a valorilor creșterii radiale (TRW).
- În ceea ce privește *capacitatea explicativă a modelelor specifice utilizate* care includ interacțiunea dintre lungimea coroanei (CL) și creșterea radială la nivelul rețelelor de

cercetare (AM, FA, MO), s-a evidențiat faptul că CL a avut o contribuție mai ridicată la explicarea variației creșterii radiale comparativ cu diametrul coroanei (CD), atunci când este inclusă și variația între suprafețele de probă (SP). În același timp, coeficienții specifici diametrului coroanei indică o sensibilitate mai accentuată a TRW la variațiile laterale ale coroanei, ceea ce indică faptul că cele două dimensiuni ale coroanei arborilor (lungimea și diametrul) au roluri complementare în explicarea creșterii radiale. Adoptând un model mixt care a inclus atât lungimea (CL) cât și diametrul acesteia (CD), precum și interacțiunile acestora cu cele la nivelul celor trei rețele de cercetare, a evidențiat efecte pozitive ale ambelor variabile asupra creșterii radiale (TRW), indicând faptul că acestea contribuie atât independent cât și complementar la explicarea variației acesteia. Includerea diametrului coroanei (CD) în model a adus o îmbunătățire a performanței acestuia cu aproximativ 12%, comparativ cu utilizarea exclusivă a lungimii coroanei (CL).

- În ceea ce privește *relația dintre variabilele coroanei și creșterea radială (TRW)* la nivelul rețelelor de inventariere cercetate (AM, FA, MO), prin adoptarea modelului liniar mixt a fost pus în evidență faptul că lungimea coroanei (CL) are un efect pozitiv și semnificativ asupra creșterii în toate tipurile de arborete analizate (arborete pure de fag și de molid, dar și amestecate de molid cu fag). Astfel, relația dintre CL și TRW pronunțată în arboretele amestecate de molid cu fag (AM), comparativ cu cele pure de fag (FA), în timp ce pentru arboretele pure de molid (MO), diferențele sunt reduse sau ne semnificative. Diametrul coroanelor arborilor (CD), exercită de asemenea un efect pozitiv dar semnificativ asupra creșterii radiale (TRW), prezent în toate rețelele analizate (AM, FA, MO), cu variații moderate ale intensității relației. Prin aplicarea modelului de ecuații structurale (SEM) care a luat în considerare relațiile dintre caracteristicile coroanei inclusiv indicii de competiție și creșterea radială, a permis evidențierea faptului că efectul competiției asupra creșterii radiale nu a fost exclusiv direct, ci parțial transmis prin modificarea dimensiunilor coroanei, în special prin reducerea lungimii acesteia (CL). În consecință, competiția a acționat atât prin limitarea directă a creșterii cât și prin modificarea dimensiunilor coroanei, ceea ce a condus stabilirea unui efect total mai complex asupra creșterii radiale (TRW). În acest sens, rezultatele obținute au evidențiat faptul că lungimea coroanei (CL) reprezintă principalul indicator prin care competiția influențează creșterea radială, în timp ce diametrul coroanei nu a prezentat o contribuție directă semnificativă.
- În ceea ce privește *modelarea dinamicii în timp a creșterii radiale (TRW)*, au fost adoptate două modele candidate: primul model a luat în considerare exclusiv valorile standardizate ale variabilelor coroanei (CLz, CDz) precum și anul observației, în timp ce al doilea model a integrat și valoarea standardizată a indicelui de competiție, împreună cu interacțiunea acestuia cu variabila temporală (anul observației). Compararea celor două modele a evidențiat o îmbunătățire a performanței modelului care include valoarea standardizată a indicelui de competiție. Deși includerea indicelui de competiție îmbunătățește performanța modelului, comparativ cu variabilele coroanei, contribuția

acestui la capacitatea explicativă rămâne relativ scăzută. Totodată se evidențiază faptul că variabilele coroanei derivate din datele de teledetecție reprezintă principalii predictor ai variației creșterii, acestea fiind capabile să reproducă tendințele observate la nivelul rețelelor de inventariere. Aceste rezultate indică faptul că dimensiunile coroanei, estimate prin teledetecție, integrează efectele competiției și reflectă nivelul competiției dintre arbori, constituind variabile-cheie pentru explicarea și modelarea creșterii radiale.

❖ **Cu privire la analiza creșterii radiale a arborilor pe baza datelor obținute prin tehnici ale teledetecției în raport cu cele obținute pe baza măsurărilor efectuate cu ocazia inventarierilor de teren**

- Prin *analiza corelației dintre caracteristicile coroanei (lungimea și diametrul coroanei), indicii de competiție și creșterea radială*, s-a evidențiat faptul că influența dimensiunilor coroanei asupra creșterii radiale nu este uniformă, aceasta fiind dependentă de intensitatea competiției. În timp ce diametrul coroanei are un efect pozitiv relativ constant asupra creșterii radiale, indiferent de intensitatea competiției, lungimea coroanei manifestă un efect dependent de intensitatea acesteia, contribuția sa fiind redusă progresiv în condiții de competiție ridicată. Această diferențiere indică faptul că dezvoltarea pe orizontală a coroanei arborilor acționează ca un factor stabil al creșterii, în timp ce dezvoltarea pe verticală a acesteia (lungimea coroanei) este mai sensibilă la constrângerile impuse de competiția locală. S-a constatat că intensitatea competiției dintre arbori exercită, de asemenea, un efect negativ direct asupra creșterii radiale, reducând sistematic nivelul de creștere odată cu intensificarea acestui proces. În același timp (SEM) evidențiază faptul că acest efect nu este exclusiv direct, ci parțial manifestat prin modificarea caracteristicilor (dimensiunilor) coroanei, în special prin reducerea lungimii (CL) acesteia. Astfel, competiția influențează creșterea radială atât prin limitarea directă a resurselor de spațiu și de lumină, cât și indirect, prin modificarea dimensiunii coroanelor arborilor.
- Analizând *mediile anuale ale creșterii radiale* s-a pus în evidență existența unor diferențe statistic semnificative între valorile înregistrate de cele două specii analizate (fag și molid), existente în cele trei rețele de cercetare (AM, FA, MO). Astfel, fagul a înregistrat creșteri anuale mai reduse decât în arboretele pure de fag (rețeaua FA), cu aproximativ 15%, comparativ cu cele din rețeaua AM, fapt ce se explică prin intensificarea competiției intraspecifice în arboretele pure, comparativ cu cele de amestec, unde interacțiunile dintre specii pot conduce la o utilizare mai eficientă a resurselor, demonstrându-se pe această cale încă o dată superioritatea arboretelor amestecate, predominant cu fag, în ceea ce privește creșterea înregistrată de această specie. La molid s-a înregistrat creșteri anuale mai mari (cu aproximativ 14%) în rețeaua MO, comparativ cu cele din rețeaua AM, însă diferențele observate între rețele nu au fost semnificative din punct de vedere statistic

- În ceea ce privește *modul în care competiția modifică relația dintre parametrii coroanei și creșterea radială (TRW)*, se evidențiază faptul că valorile standardizate ale indicelui de competiție (CIz) au fost asociate semnificativ cu poziția cenotică a arborilor, înregistrând un gradient coerent al intensității competiției (slabă, moderată, ridicată). Astfel, relația dintre TRW și lungimea coroanei (CL) evidențiază un efect dependent de intensitatea competiției, în sensul că influența pozitivă a acesteia a fost mai pronunțată în condiții de competiție redusă (slabă) și se diminuează progresiv odată cu creșterea intensității competiției (ridicăta). În schimb, diametrul coroanei (CD) a prezentat un efect pozitiv relativ constant asupra creșterii radiale, fără variații semnificative în raport cu intensitatea competiției, ceea ce indică o contribuție stabilă a CD. Totodată, independent de aceste relații, intensitatea competiției exercită un efect negativ și direct asupra creșterii radiale, determinând reducerea acesteia pe măsura ce intensitatea competiției este ridicată.

*

*

*

Prin cercetările efectuate cu ocazia elaborării tezei de doctorat și a rezultatelor obținute se evidențiază faptul că utilizarea integrată a datelor de teledetecție permite nu doar estimarea precisă a caracteristicilor dendrometrice ale arborilor, cât și explicarea mecanismelor care influențează creșterea radială în raport cu dimensiunile coroanei și intensitatea competiției. În acest sens, rezultatele obținute evidențiază faptul că variabilele coroanei au o capacitate explicativă mai ridicată în raport cu indicii de competiție, lungimea coroanei evidențiindu-se ca principal predictor al creșterii radiale, având un efect pozitiv și consistent în toate tipurile de arborete analizate, în timp ce diametrul coroanei are un rol complementar, caracterizat printr-o influență mai stabilă și mai puțin sensibilă la variația intensității competiției. Analiza relațiilor dintre caracteristicile coroanei indică faptul că efectul competiției asupra creșterii radiale nu se manifestă preponderent direct, ci în mare parte prin intermediul modificărilor produse la nivelul coroanei, în special prin reducerea lungimii acesteia. În același timp, influența lungimii coroanei asupra creșterii radiale se diminuează progresiv în condiții de competiție ridicată, în timp ce efectul diametrului coroanei rămâne relativ constant, evidențiind mecanisme diferențiate de control ale creșterii radiale. Totodată, relațiile identificate variază în raport cu tipul de arboret, fiind mai pronunțate în arboretele amestecate de molid cu fag comparativ cu cele pure (fag, molid), ceea ce indică o dependență clară de structura și compoziția acestora.

În același timp, includerea volumului arborilor în analize reprezintă un pas firesc pentru completarea evaluării creșterii radiale și a productivității, în special prin integrarea acestuia cu caracteristicile coroanei. Luarea în considerare a volumului arborilor ar permite o înțelegere mai clară a modului în care se dezvoltă arborii. În acest sens, includerea volumului arborilor în analize viitoare poate contribui la dezvoltarea unor modele cu aplicabilitate mai largă în evaluarea și gestionarea arboretelor.

6. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Cu ocazia cercetărilor desfășurate pentru elaborarea tezei de doctorat în arborete din vestul Carpaților Meridionali pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și analiza creșterii radiale prin utilizarea de date integrate achiziționate prin tehnici ale teledetecției (senzori activi și pasivi). Pe baza rezultatelor obținute și a concluziilor desprinse, pot fi formulate următoarele contribuții originale:

- ❖ Crearea în premieră a unei baze de date geospațiale unitare, cu seturi comune de informații la nivel de arbore, specifice arboretelor din vestul Carpaților Meridionali, obținută prin integrarea datelor de teledetecție achiziționate de senzori activi și pasivi cu măsurătorile din teren efectuate prin inventarieri în suprafețe de probă permanente.
- ❖ Perfecționarea procesului de achiziție a datelor de scanare cu laser terestru (TLS) prin aplicarea unui flux de lucru bazat pe scanări multiple (patru stații) și distribuția uniformă a reperelor sferice, pentru minimizarea efectului de ocluzie la nivelul trunchiurilor arborilor și al coronamentului la nivelul părții inferioare, asigurându-se o reprezentare completă a la nivel de arboret.
- ❖ Optimizarea procesului de identificare a arborilor individuali prin aplicarea unui flux de procesare bazat pe segmentarea norilor de puncte și utilizarea integrată a datelor de teledetecție achiziționate de senzori activi și pasivi, ceea ce a condus la o delimitare precisă a arborilor în arborete pure de fag și de molid, dar și amestecate de fag cu molid.
- ❖ Determinarea, pentru prima dată, a contribuției variabilelor coroanei în explicarea creșterii radiale, în arborete pure de fag și de molid, precum și în arborete amestecate de fag cu molid, evidențiindu-se rolul predominant al lungimii coroanei asupra diametrului coroanei, în cadrul unor modele specifice care includ variația între suprafețele de probă permanente.
- ❖ Adoptarea unui model mixt de integrare atât a lungimii coroanei cât și a diametrului acesteia, precum și a interacțiunilor dintre acestea la nivel de arboret, care să permită evaluarea contribuției acestora asupra creșterii radiale la nivel de arbore.
- ❖ Aplicarea, pentru prima dată, a unui model de ecuații structurale (SEM), în arborete pure de fag și de molid, dar și amestecate de fag cu molid, pentru analiza relațiilor dintre caracteristicile coroanei arborelui (lungimea și diametrul coroanei), indicele de competiție și creșterea radială, care să permită evaluarea efectelor directe și indirecte ale indicelui de competiție asupra creșterii radiale, la nivel de arbore.
- ❖ Caracterizarea modului în care competiția între arbori modifică relația dintre parametrii coroanei și creșterea radială, prin definirea și utilizarea a trei niveluri de intensitate a competiției (slabă, moderată, ridicată), stabilite în raport cu percentilele indicelui de competiție (p10, p50 și p90), evidențiind astfel variația răspunsului răspunsul creșterii radiale la modificarea lungimii și diametrului coroanelor arborilor.
- ❖ Evidențierea faptului că lungimea coroanei (CL) reprezintă principalul indicator prin care competiția dintre arbori influențează creșterea radială, în timp ce diametrul coroanei nu exercită o influență directă semnificativă asupra creșterii și dezvoltării arborilor.
- ❖ Determinarea în premieră a efectului direct exercitat de competiția dintre arbori asupra creșterii radiale prin adoptarea a două modele liniare mixte, care includ atât caracteristicile coroanelor

arborilor cât și o componentă temporală (anul observației) și respectiv, suplimentar, indicele de competiție și interacțiunea acestuia cu anul observației.

- ❖ Identificarea rolului esențial pe care dimensiunile coroanei îl au în atenuarea efectelor competiției, demonstrând capacitatea arborilor cu coroane mai bine dezvoltate de a atenua parțial impactul negativ al acesteia asupra creșterii radiale, în special în condiții de desime ridicată a arboretelor.

7. DISEMINAREA REZULTATELOR

A. Lucrări din tematica tezei de doctorat, publicate în reviste ISI

1. **CAPALB, F., APOSTOL, B., LORENT, A., PETRILA, M., MARCU, C., & BADEA, N.O., 2024.** Integration of Terrestrial Laser Scanning and field measurements data for tree stem volume estimation: exploring parametric and non-parametric modeling approaches. *Annals of Forest Research, Res.* 67(1): 77-94. (FI=2,9) (Q1).
<https://www.afrjournal.org/index.php/afr/article/view/3664/1286>

B. Lucrări din tematica tezei de doctorat, publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. **CAPALB, F., PETRILA, M., LORENT, A., APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2023.** Estimarea volumului la arbori individuali pe baza norilor de puncte obținuți prin scanare cu laser terestru (TLS) – studiu de caz pentru arborete de molid din vestul Carpaților Meridionali (Estimating volume for individual trees based on point clouds obtained through terrestrial laser scanning (TLS) – a case study for spruce stands in the western part of Southern Carpathians). *Revista de Silvicultură și Cinegetică Anul XXVIII, nr. 53:* 12-18.
<https://www.revistapadurilor.com/wp-content/uploads/2025/03/53-1.pdf>
2. **CAPALB, F., APOSTOL, B., CHIVULESCU, S., PETRILA, M., MARCU, C., LORENT, A., BADEA, O., 2022.** Determinarea înălțimilor arborilor prin intermediul unui model nelinear de predicție, aplicabil arboretelor de molid din vestul Carpaților Meridionali. *Revista de Silvicultură și Cinegetică, anul XXVII, nr. 51:* 56-61. <http://progresulsilvic.ro/numarul-51-al-revistei-de-silvicultura-si-cinegetica>

C. Lucrări în afara tematicii tezei de doctorat, publicate în reviste indexate ISI

1. **LORENT, A., PETRILA, M., APOSTOL, B., CAPALB, F., CHIVULESCU, Ș., ȘAMȘODAN, C., MARCU, C., BADEA, O., 2025.** Assessing and Mapping Forest Fire Vulnerability in Romania Using Maximum Entropy and eXtreme Gradient Boosting. *Forests*, 16(7), 1156.
<https://doi.org/10.3390/f16071156>
2. **CHIVULESCU, S., RADU, R., CAPALB, F., HAPA, I.H., PITAR, D., MARMUREANU, L., LECA, S., PETREA, S., BADEA, N.O., 2023.** Cost Valuation and Climate Mitigation Impacts of Forest Management: A Case Study from Piatra Craiului National Park, Romania. *Land* 13(1):17.
<https://www.mdpi.com/2073-445X/13/1/17>
3. **CHIVULESCU, S., CADAR, N., HAPA, I.H., CAPALB, F., RADU, R., BADEA, N.O., 2023.** The Necessity of Maintaining the Resilience of Peri-Urban Forests to Secure Environmental and Ecological Balance: A Case Study of Forest Stands Located on the Romanian Sector of the Pannonian Plain. *Diversity* 15(3):380. <https://www.mdpi.com/1424-2818/15/3/380>

D. Lucrări în afara tematicii tezei de doctorat, publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. **PETRILA, M., CAPALB, F., LORENT, A., APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2025.** Metodă de evaluare a gradului de vulnerabilitate la doborâturi produse de vânt în ecosisteme forestiere montane. *Revista Pădurilor, Volumul 140(4), nr. 3/2025:* 3-25.
2. **LORENT, A., PETRILA, M., APOSTOL, B., CAPALB, F., BIBART, C.I., BURLUI, I., 2025.** Sebastien Lahaye, Domingos Xavier Viegas, Luis Mario Ribeiro, Miguel Almeida, Tiago Rodrigues,

- Antonio Jorge Ferreira, Ana Isabel Miranda, Diogo Lopes, Tobias Osswald, Johan Sjostrom, Rick McRae, Kiki Yunianti, Fanny Verhilac, 2024. Manual cu instrucțiuni pentru pompieri pentru a face față incendiilor extreme, incendiilor în zona de interfață natural-construit și incendiilor la latitudini/altitudini mari (Livrabil D2.6, Proiect H2020 FirEURisk), 93p. Revista Pădurilor, Volumul 140(4), nr. 3/2025: 53-58.
3. **CAPALB, F.**, APOSTOL, B., LORENT, A., LECA, Ș., CHIVULESCU, S., PETRILA, M., MARCU, C., BADEA, O., 2025. Posibilități de utilizare a imaginilor hiperspectrale Hyperion pentru identificarea unor specii de arbori. Revista de Silvicultură și Cinegetică Anul XXIX, nr. 56: 12-20. <https://www.progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/2025/09/2025.56.pdf>
 4. LORENT, A., PETRILA, M., **CAPALB, F.**, APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2024. Overview of the Forest Fires Defense System in Romania. In: Dobrinkova, N., Fidanova, S. (eds) Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024). EnviroRISks 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 883. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_29
 5. LORENT, A., GANCZ, V., PETRILA, M., APOSTOL, B., **CAPALB, F.**, MARCU, C., BADEA, O., 2023. Detection and localization of forest fires and tracking their evolution based on high temporal resolution satellite images (Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală). Revista de Silvicultură și Cinegetică Anul XXVIII, nr. 52: 63-69. <http://progresulsilvic.ro/aparut-numarul-52-al-revistei-de-silvicultura-si-cinegetica-il-puteti-descarca-in-format-pdf>

E. Participări la conferințe internaționale

1. **CAPALB, F.**, PETRILA, M., APOSTOL, B., LORENT, A., MARCU, C., BADEA, O., 2025. A Comparative Analysis of TLS and MLS Technologies for Estimation of Dendrometric Tree Characteristics in Mixed Temperate Forests. Silvilaser 2025, Quebec, Canada, 29 September – 3 October 2025. *(prezentare)*
2. **CAPALB, F.**, APOSTOL, B., LORENT, A., PETRILA, M., MARCU, C., BADEA, O., 2025. Combining Terrestrial Laser Scanning and Field Measurements for Estimating Tree Stem Volume. COST Action CA20118 - 3DForEcoTech Final conference. Three-dimensional forest ecosystem monitoring and better understanding by terrestrial-based technologies. Forest Research Institute, Sękocin Stary, Poland, 2-4 July 2025. *(poster)*
3. LORENT, A., PETRILA, M., **CAPALB, F.**, APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2024. Overview of the Forest Fires Defense System in Romania. EnviroRISks 2024 – 12th CMDR-COE Annual Conference on Crisis Management and Disaster Response and 3rd International Conference on ENVIRONMENTAL Protection and Disaster Risks, 4 – 6 iunie 2024, Sofia, Bulgaria. *(prezentare)*
4. PETRILA, M., **CAPALB, F.**, LORENT, A., APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2024. A Comparative Analysis of TLS and GeoSLAM Technologies for Forest Monitoring. Integrating biodiversity conservation in forest management - Final Conference COST Action CA18207- Biodiversity Of Temperate forest Taxa Orienting Management Sustainability by Unifying Perspectives (BOTTOMS-UP) 19-21 March 2024, Botanical Garden, Rome, Italy. *(poster)*

5. COULIBALY, F., APOSTOL, B., PASCU, I.S., **CAPALB, F.**, SICARD, P., BADEA O., 2023. Urban Trees Detection Using Very High-Resolution Satellite Imagery – Smart Solution for Municipal Green Cadaster. Forest science for people and societal challenges - The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 octombrie 2023, București, România. *(prezentare)*
6. **CAPALB, F.**, PETRILA, M., LORENT, A., APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2023. Predicting Tree Crown Width of Individual Trees In The Western Southern Carpathians Using Terrestrial Laser Scanning And Random Forest Algorithm. Forest science for people and societal challenges - The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 octombrie 2023, București, România. *(prezentare)*
7. **CAPALB, F.**, PETRILA, M., LORENT, A., APOSTOL, B., MARCU, C., BADEA, O., 2023. Experimenting an improved tree point cloud segmentation method of TLS data in a spruce forest inventory network. SilviLaser 2023, Londra, UK, 6-8 septembrie 2023. *(poster)*
8. LORENT A., PETRILA M., APOSTOL B., **CAPALB F.**, MARCU C., BADEA O., 2023. Identification Of The Driving Factors For The Occurrence Of Forest Fires And The Zoning Of Forest Fire Hazard Through Logistic Regression And Random Forest In Romania Fire Hazard Through Logistic Regression and Random Forest in Romania, al 42-lea simpozion EARSeL, Bucuresti, Romania, 3-6 iulie 2023. *(prezentare)*
9. APOSTOL B., LORENT A., CHIVULESCU Ș., CICEU A., PETRILA M., **CAPALB F.**, MARCU C., BADEA O., 2022. Integration of Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Airborne Laser Scanning (ALS) Processed Data for the Assessment of Norway Spruce Dendrometric Characteristics – a Case Study, al 41-lea simpozion EARSeL, Paphos, Cipru, 13-16 septembrie 2022. *(poster)*
10. APOSTOL B., PETRILA M., DURO J.G., LORENT A., **CAPALB F.**, MARCU C., FARCAȘ S., 2022. Integration of Canopy Height Models Derived from Airborne LiDAR Data and UAV Aerial Imagery by DTM-DSM Matching in the Forest Free Areas, al 41-lea simpozion EARSeL, Paphos, Cipru, 13-16 septembrie 2022. *(poster)*
11. LORENT A., GANCZ V., PETRILA M., **CAPALB F.**, APOSTOL B., SOARE I., 2022. A web GIS mapping service for a better exploitation of the forest melliferous resources in South East Romania, al 41-lea simpozion EARSeL, Paphos, Cipru, 13-16 septembrie 2022. *(poster)*

LISTA DE TABELE

<i>Tabelul 3.1 – Numărul de sondaje corespunzător rețelelor de inventariere statistică.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabelul 4.1 – Parametri statistici ai distribuțiilor diametrului de bază al arborilor la nivel de rețea de inventariere.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabelul 4.2 – Parametri statistici ai distribuțiilor înălțimii arborilor la nivel de rețea de inventariere ...</i>	<i>19</i>
<i>Tabelul 4.3 – Înălțimea arborilor în raport cu poziția cenotică (clasele Kraft) în cadrul rețelelor de inventariere.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabelul 4.4 - Determinarea coeficienților ecuației de regresie de forma $\ln h = a_0 + a_1 \cdot d a_2$ (Giurgiu, Decei & Draghiciu, 2004).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabelul 4.5 - Valorile coeficienților de corelație (r) și ale rapoartelor de corelație (r^2) dintre diametrul de bază al arborilor și înălțimea lor.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabelul 4.6 – Indicatori de precizie pentru diametrul de bază.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelul 4.7 – Indicatorii de precizie pentru înălțimea arborilor segmentați în urma scanărilor cu laser terestru</i>	<i>29</i>
<i>Tabelul 4.8 – Indicatorii de precizie pentru înălțimea arborilor obținuți în urma coregistrării norilor de puncte din scanarea cu laser terestru (TLS) și din UAV.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelul 4.9 - Coeficienții estimați ai efectelor fixe din modelul liniar mixt.....</i>	<i>38</i>

LISTA DE FIGURI

<i>Figura 3.1 – Localizarea suprafețelor de cercetare în raport cu distribuția acoperirii cu vegetație forestieră la nivel național. Fundalul cartografic reprezintă clasele de vegetație forestieră derivate din CORINE Land Cover (European Environment Agency (EEA) 2020), păduri de foioase (clasa 311), păduri de conifere (clasa 312) și păduri de amestec (clasa 313). Punctele/suprafețele (culoare roșie) indică amplasamentul rețelei de inventariere statistică.</i>	11
<i>Figura 3.2 – Amplasarea suprafețelor de probă permanente (SPP_{1,2}) în raport cu centrul sondajului (N_i).</i>	12
<i>Figura 3.3 – Amplasarea stațiilor TLS în raport cu suprafața de probă scanată.</i>	13
<i>Figura 4.1 - Distribuția diametrului de bază (dbh) al arborilor inventariați, în cuprinsul rețelelor de inventariere.</i>	17
<i>Figura 4.2 – Distribuția coeficientului de variație al diametrului de bază al arborilor la nivel de sondaj și de rețea de inventariere statistică.</i>	18
<i>Figura 4.3 – Distribuția coeficientului de variație a înălțimii arborilor la nivel de sondaj în raport cu rețeaua de inventariere statistică.</i>	19
<i>Figura 4.4 – Ponderea relativă pe clase de diametru de bază (<20 cm, 20 – 60 cm, >60 cm) la nivel rețea de inventariere și specie.</i>	20
<i>Figura 4.5 – Ponderea relativă pe clase de înălțimi (<16 m, 16 – 32 m, >32 m) la nivel de rețea de inventariere și specie.</i>	21
<i>Figura 4.6 - Distribuția arborilor pe clase de înălțime (2m) la nivel de rețeaua de inventariere : AM (a), FA (b), MO (c).</i>	22
<i>Figura 4.7 – Curbele înălțimilor la nivel de rețea de inventariere și specie: rețea AM; rețea fag FA, rețea MO.</i>	22
<i>Figura 4.8 – Nor de puncte tridimensional obținut prin scanarea cu laser terestru (TLS) la nivel de SPP (ex: SPP 232).</i>	23
<i>Figura 4.9 – Distribuția erorii medii de coregistrare (valori absolute) la nivelul suprafețelor de probă permanente (SPP).</i>	24
<i>Figura 4.10 – Nor de puncte tridimensional obținut prin coregistrarea diferitelor poziții de scanare, suprafața permanentă de probă (SPP) 232 (a); nor de puncte segmentat, fiecărui arbore îi este atribuit o poziție și un număr de identificare unic (ID) (b); arbori segmentați rezultați din norul de puncte (c).</i>	25
<i>Figura 4.11 – Reprezentarea grafică a variabilității F1-score, precizia de detecție și acuratețea de detecție, în raport cu suprafața permanentă de probă (SPP).</i>	26
<i>Figura 4.12 – Relația dintre acuratețea de detecție și numărul de arbori inventariați</i>	26
<i>Figura 4.13 – Estimarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor extrase din norii de puncte segmentați: diametrul coroanei (CD); lungimea coroanei (CL); înălțimea până la baza coroanei (HCB); diametrul de bază (dbh); înălțimea totală a arborilor (h); proiecția coroanei (CPA); raza maximă a coroanei (R_{max}).</i>	27
<i>Figura 4.14 – Distribuția erorilor de estimare a înălțimii arborilor: eroarea absolută (a) și valori reziduale (b).</i>	30

Figura 4.15 - Distribuția erorilor de estimare a înălțimii obținută din coreistrarea norilor de puncte TLS și UAV.....	32
Figura 4.16 - Matricea coeficienților de corelație Pearson (r) între indicii de competiție și principalele caracteristici dendrometrice ale arborilor	32
Figura 4.17 - Matricea coeficienților de corelație Pearson (r) între indicii de competiție RK3 și principalele caracteristici dendrometrice ale arborilor	33
Figura 4.18 - Distribuțiile numărului de carote pe categorii de diametru de bază (2 cm), în raport cu rețeaua de inventariere statistică și specia.	33
Figura 4.19 - Corelație între variabile ale coroanei și indicatori de creștere: creștere radială – TRW; coeficient de variație a creșterii radiale – cvTRW; creștere în suprafața de bază – BAI; diametrul de bază – dbh; înălțimea arborilor – h; proiecția coroanei – CPA; raza coroanei – CR; diametrul coroanei – CD; asimetria coroanei – asim; raportul dintre lungimea coroanei (CL) și raza coroanei (CR) – CSLC; înălțimea bazei coroanei – HCB; coeficientul de variație a razei coroanei – cvCR.	35
Figura 4.20 - Impactul tipurilor de arborete asupra legăturii dintre creșterea radială și variabilele coroanei CL/CD. Graficele din partea stângă ilustrează relațiile estimate pe baza modelului combinat care include simultan lungimea coroanei (CL) și diametrul coroanei (CD).	37
Figura 4.21 - Efectul competiției (Clz) asupra relației dintre lungimea coroanei (CLz) și creșterea radială (TRWz).	39
Figura 4.22 - Efectul competiției (Clz) asupra relației dintre diametrul coroanei (CDz) și creșterea radială (TRWz).	39
Figura 4.23 - Reprezentarea grafică a modelului de ecuații structurale (SEM).....	40
Figura 4.24 - Creșterea radială cumulată observată și prezisă pentru cele trei rețele de inventariere statistică (AM, FA, MO).	41
Figura 4.25 - Relația dintre valorile observate și cele prezise ale creșterii radiale (TRW) estimate pe baza variabilelor coroanei (CL; CD), pentru cele trei rețele de inventariere statistică (AM, FA, MO).	42

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Abegg M., Bösch R., Kükenbrink D., Morsdorf F., 2023. Tree volume estimation with terrestrial laser scanning — Testing for bias in a 3D virtual environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 331: . <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109348>
- Agisoft LLC, 2021. Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.7. Agisoft Metashape (September): .
- Ahmed S., Hilmers T., Uhl E., Tupinambá-Simões F., Bravo F., del Río M., Pretzsch H., 2025. Crown structure indicates tree secondary growth, competition legacy, and growth potential of dominant species in Europe. *Ecological Indicators* 170(December 2024): . <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113074>
- Ahmed S., Pretzsch H., 2023. TLidar-based crown shape indicates tree ring pattern in Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) trees across competition gradients. A modeling and methodological approach. *Ecological Indicators* 148: . <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110116>
- Apostol B., Chivulescu S., Ciceu A., Petrila M., Pascu I.S., Apostol E.N., Leca Ș., Lorent A., Tănase M., Badea O., 2018. Data collection methods for forest inventory: A comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Research* 61(2): . <https://doi.org/10.15287/afr.2018.1189>
- Arrizza S., Marras S., Ferrara R., Pellizzaro G., 2024. Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 36(September): 101364. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101364>
- Badea O., 2008. *Manual privind metodologia de supraveghere pe termen lung a stării ecosistemelor forestiere aflate sub acțiunea poluării atmosferice și modificărilor climatice*. Bucharest: Editura Silvică.
- Badea O., 2013. *Cercetări ecologice pe termen scurt în ecosisteme forestiere reprezentative din Parcul Natural Bucegi*. i. Badea, O. (ed.). Editura Silvică.
- Ball J.G.C., Hickman S.H.M., Jackson T.D., Koay X.J., Hirst J., Jay W., Archer M., Aubry-Kientz M., Vincent G., Coomes D.A., 2023. Accurate delineation of individual tree crowns in tropical forests from aerial RGB imagery using Mask R-CNN. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 9(5): . <https://doi.org/10.1002/rse2.332>
- Bates D., Mächler M., Bolker B., Walker S., 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1 SE-Articles): 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bayer D., Seifert S., Pretzsch H., 2013. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees - Structure and Function* 27(4): . <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0854-4>
- Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H., 2018. Integrating Airborne LiDAR and Terrestrial Laser Scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 73: . <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026>
- Beloiu M., Heinzmann L., Rehush N., Gessler A., Griess V.C., 2023. Individual Tree-Crown Detection and Species Identification in Heterogeneous Forests Using Aerial RGB Imagery and Deep Learning. *Remote Sensing* 15(5): . <https://doi.org/10.3390/rs15051463>
- Bienert A., Georgi L., Kunz M., Maas H.G., von Oheimb G., 2018. Comparison and combination of mobile

- and terrestrial laser scanning for natural forest inventories. *Forests* 8(2): . <https://doi.org/10.3390/f9070395>
- Bogdanovich E., Perez-Priego O., El-Madany T.S., Guderle M., Pacheco-Labrador J., Levick S.R., Moreno G., Carrara A., Pilar Martín M., Migliavacca M., 2021. Using terrestrial laser scanning for characterizing tree structural parameters and their changes under different management in a Mediterranean open woodland. *Forest Ecology and Management* 486: . <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118945>
- Bornand A., Rehush N., Morsdorf F., Thürig E., Abegg M., 2023. Individual tree volume estimation with terrestrial laser scanning: Evaluating reconstructive and allometric approaches. *Agricultural and Forest Meteorology* 341: . <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109654>
- Bunn A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26(2): . <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Calders K., Adams J., Armston J., Bartholomeus H., Bauwens S., Bentley L.P., Chave J., Danson F.M., Demol M., Disney M., Gaulton R., Krishna Moorthy S.M., Levick S.R., Saarinen N., Schaaf C., Stovall A., Terry L., Wilkes P., Verbeeck H., 2020. Terrestrial laser scanning in forest ecology: Expanding the horizon. *Remote Sensing of Environment*. 251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112102>
- Campelo F., García-González I., Nabais C., 2012. DetrendeR - A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia* 30(1): . <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.010>
- Chen J., Zhao D., Zheng Z., Xu C., Pang Y., Zeng Y., 2024. A clustering-based automatic registration of UAV and terrestrial LiDAR forest point clouds. *Computers and Electronics in Agriculture* 217: . <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108648>
- Chifunda E.F., Kirigiti P.J., Balan R.T., 2025. Modelling tree-level aboveground biomass and carbon stock in Tanzania's Miombo Woodlands incorporating spectral indices using machine learning algorithms. *Environmental Research Communications* 7(10): . <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ae0ac9>
- Chivulescu S., Ciceu A., Leca S., Apostol B., Popescu O., Badea O., 2020. Development phases and structural characteristics of the Penteleu-Viforta virgin forest in the Curvature Carpathians. *iForest - Biogeosciences and Forestry* (5): 389–395. <https://doi.org/10.3832/for3094-013>
- Collazos Fernández E., Rubiales J.M., 2025. Reconstruction of Torrential Activity in Cerradillas Valley (Sierra de Guadarrama National Park, Spain) Using Dendrogeomorphic Techniques. *Geosciences (Switzerland)* 15(10): . <https://doi.org/10.3390/geosciences15100402>
- Compeán-Aguirre J.L., López-Serrano P.M., Silván-Cárdenas J.L., Martínez-García-Moreno C.A., Vega-Nieva D.J., Corral-Rivas J.J., Pompa-García M., 2024. Evaluation of Two-Dimensional DBH Estimation Algorithms Using TLS. *Forests* 15(11): . <https://doi.org/10.3390/f15111964>
- Corte A.P.D., Souza D.V., Rex F.E., Sanquetta C.R., Mohan M., Silva C.A., Zambrano A.M.A., Prata G., Alves de Almeida D.R., Trautenmüller J.W., Klauberg C., de Moraes A., Sanquetta M.N., Wilkinson B., Broadbent E.N., 2020. Forest inventory with high-density UAV-Lidar: Machine learning approaches for predicting individual tree attributes. *Computers and Electronics in Agriculture* 179: . <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105815>
- Demol M., Verbeeck H., Gielen B., Armston J., Burt A., Disney M., Duncanson L., Hackenberg J., Kükenbrink D., Lau A., Ploton P., Sewdien A., Stovall A., Takoudjou S.M., Volkova L., Weston C., Wortel V., Calders K., 2022. Estimating forest above-ground biomass with terrestrial laser scanning: Current status and future directions. *Methods in Ecology and Evolution*. 13 (8).

<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13906>

- Dinca L., Nita M.D., Hofgaard A., Alados C.L., Broll G., Borz S.A., Wertz B., Monteiro A.T., 2017. Forests dynamics in the montane-alpine boundary: A comparative study using satellite imagery and climate data. *Climate Research* 73(1–2): . <https://doi.org/10.3354/cr01452>
- Dobre A.C., Pascu I.S., Leca Ștefan, Garcia-Duro J., Dobrota C.E., Tudoran G.M., Badea O., 2021. Applications of tIs and aIs in evaluating forest ecosystem services: A southern carpathians case study. *Forests* 12(9): . <https://doi.org/10.3390/f12091269>
- Dubayah R., Blair J.B., Goetz S., Fatoyinbo L., Hansen M., Healey S., Hofton M., Hurtt G., Kellner J., Luthcke S., Armston J., Tang H., Duncanson L., Hancock S., Jantz P., Marselis S., Patterson P.L., Qi W., Silva C., 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing* 1: . <https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002>
- European Environment Agency (EEA), 2020. Copernicus Land Monitoring Service 2020. European Environment Agency (EEA)
- Fan G., Nan L., Dong Y., Su X., Chen F., 2020. AdQSM: A new method for estimating above-ground biomass from TLS point clouds. *Remote Sensing* 12(18): . <https://doi.org/10.3390/RS12183089>
- FARO Technologies Inc, 2019.
- Fox J., Weisberg S., Price B., Adler D., Bates D., Baud-bovy G., Bolker B., Ellison S., Firth D., Friendly M., Gorjanc G., Graves S., Heiberger R., Laboissiere R., Maechler M., Monette G., Murdoch D., Nilsson H., Ogle D., Ripley B., Venables W., Walker S., Winsemius D., Zeileis A., R-Core, 2021. Package 'car': Companion to Applied Regression. CRAN Repository
- García M., Danson F.M., Riaño D., Chuvieco E., Ramirez F.A., Bandugula V., 2011. Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 13(4): . <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.03.006>
- Giannetti F., Puletti N., Quatrini V., Travaglini D., Bottalico F., Corona P., Chirici G., 2018. Integrating terrestrial and airborne laser scanning for the assessment of single-tree attributes in Mediterranean forest stands. *European Journal of Remote Sensing* 51(1): . <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1482733>
- Giurgiu V., 1979. *Dendrometrie și auxologie forestieră*. Ceres.
- Giurgiu V., Decei I., Draghiciu D., 2004. *Metode și tabele dendrometrice*. București: Editura Ceres.
- Griese N., Ritzert M., Nölke N., 2025. A large dataset of labelled single tree point clouds, QSMs and tree graphs. *Scientific Data* 12(1): . <https://doi.org/10.1038/s41597-025-06421-7>
- Han T., Sánchez-Azofeifa G.A., 2022. Extraction of Liana Stems Using Geometric Features from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds. *Remote Sensing* 14(16): . <https://doi.org/10.3390/rs14164039>
- He M., Hu Y., Zhao J., Li Y., Wang B., Zhang J., Noguchi H., 2025. Exploring Stand Parameters Using Terrestrial Laser Scanning in Pinus tabuliformis Plantation Forests. *Remote Sensing* 17(7): . <https://doi.org/10.3390/rs17071228>
- Henrich J., van Delden J., Seidel D., Kneib T., Ecker A.S., 2024. TreeLearn: A deep learning method for segmenting individual trees from ground-based LiDAR forest point clouds. *Ecological Informatics* 84: . <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102888>
- Holvoet J., Eichhorn M.P., Giannetti F., Kükenbrink D., Liang X., Mokroš M., Novotný J., Pitkänen T.P., Puliti S., Skudnik M., Stereńczak K., Terryn L., Vega C., Torresan C., 2025. Terrestrial and mobile laser scanning for national forest inventories: From theory to implementation. *Remote Sensing*

- of Environment 329(August 2024): . <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114947>
- Iglhaut J., Cabo C., Puliti S., Piermattei L., O'Connor J., Rosette J., 2019. Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*. 5 (3). <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Jacob J., Varadharajan R., 2024. Robust Variance Inflation Factor: A Promising Approach for Collinearity Diagnostics in the Presence of Outliers. *Sankhya B* 86(2): . <https://doi.org/10.1007/s13571-024-00342-y>
- Jiang H., Hu R., Yan G., Cheng S., Li F., Qi J., Li L., Xie D., Mu X., 2021. Influencing factors in estimation of leaf angle distribution of an individual tree from terrestrial laser scanning data. *Remote Sensing* 13(6): . <https://doi.org/10.3390/rs13061159>
- Jucker T., Fischer F.J., Chave J., Coomes D.A., Caspersen J., Ali A., Loubota Panzou G.J., Feldpausch T.R., Falster D., Usoltsev V.A., Jackson T.D., Adu-Bredu S., Alves L.F., Aminpour M., Angoboy Ilondea B., Anten N.P.R., Antin C., Askari Y., Ayyappan N., Banin L.F., Barbier N., Battles J.J., Beeckman H., Bocko Y.E., Bond-Lamberty B., Bongers F., Bowers S., van Breugel M., Chanttrain A., Chaudhary R., Dai J., Dalponte M., Dimobe K., Domec J.C., Doucet J.L., Dupuy Rada J.M., Duursma R.A., Enríquez M., van Ewijk K.Y., Farfán-Rios W., Fayolle A., Ferretti M., Forni E., Forrester D.I., Gilani H., Godlee J.L., Haeni M., Hall J.S., He J.K., Hemp A., Hernández-Stefanoni J.L., Higgins S.I., Holdaway R.J., Hussain K., Hutley L.B., Ichie T., Iida Y., Jiang H.S., Joshi P.R., Kaboli H., Kazempour Larsary M., Kenzo T., Kloeppel B.D., Kohyama T.S., Kunwar S., Kuyah S., Kvasnica J., Lin S., Lines E.R., Liu H., Lorimer C., Loumeto J.J., Malhi Y., Marshall P.L., Mattsson E., Matula R., Meave J.A., Mensah S., Mi X., Momo S.T., Moncrieff G.R., Mora F., Muñoz R., Nissanka S.P., Nur Hajar Z.S., O'Hara K.L., Pearce S., Pelissier R., Peri P.L., Ploton P., Poorter L., Pour M.J., Pourbabaei H., Ribeiro S.C., Ryan C., Sanaei A., Sanger J., Schlund M., Sellan G., Shenkin A., Sonké B., Sterck F.J., Svátek M., Takagi K., Trugman A.T., Vadeboncoeur M.A., Valipour A., Vanderwel M.C., Vovides A.G., Waldner P., Wang W., Wang L.Q., Wirth C., Woods M., Xiang W., de Aquino Ximenes F., Xu Y., Yamada T., Zavala M.A., Zimmermann N.E., 2025. The global spectrum of tree crown architecture. *Nature Communications* 16(1): 45–50. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60262-x>
- Keskes M.I., Mohamed A.H., Borz S.A., Niță M.D., 2025. Improving National Forest Mapping in Romania Using Machine Learning and Sentinel-2 Multispectral Imagery. *Remote Sensing* 17(4): . <https://doi.org/10.3390/rs17040715>
- Kröner K., Larysch E., Schindler Z., Obladen N., Frey J., Stangler D.F., Seifert T., 2024. Influence of crown morphology and branch architecture on tree radial growth of drought-affected *Fagus sylvatica* L. *Forest Ecosystems* 11(August): . <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2024.100237>
- Kuznetsova A., Brockhoff P.B., Christensen R.H.B., 2017. ImerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* 82(13): . <https://doi.org/10.18637/JSS.V082.I13>
- Labrecque-Foy J.P., Angers-Blondin S., Ropars P., Simard M., Boudreau S., 2023. The Use of Basal Area Increment to Preserve the Multi-Decadal Climatic Signal in Shrub Growth Ring Chronologies: A Case Study of *Betula glandulosa* in a Rapidly Warming Environment. *Atmosphere* 14(2): . <https://doi.org/10.3390/atmos14020319>
- Liang X., Kankare V., Hyyppä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., Vastaranta M., 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115: . <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- Maas H.G., Bienert A., Scheller S., Keane E., 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. In: *International Journal of Remote Sensing*. 2008 p.

<https://doi.org/10.1080/01431160701736406>

- Mîzgaciu L., Tudoran G.M., Ciocan A.E., Stăncioiu P.T., Niță M.D., 2025. A Comparative Analysis of UAV LiDAR and Mobile Laser Scanning for Tree Height and DBH Estimation in a Structurally Complex, Mixed-Species Natural Forest. *Forests* 16(9): 1–21. <https://doi.org/10.3390/f16091481>
- Mohan M., Silva C.A., Klauberg C., Jat P., Catts G., Cardil A., Hudak A.T., Dia M., 2017. Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests* 8(9): . <https://doi.org/10.3390/f8090340>
- Nasiri V., Darvishsefat A.A., Arefi H., Pierrot-Deseilligny M., Namiranian M., Le Bris A., 2021. Unmanned aerial vehicles (Uav)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest). *Canadian Journal of Forest Research*. 51 (7). <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0125>
- Niță M.D., 2021. Testing forestry digital twinning workflow based on mobile lidar scanner and ai platform. *Forests* 12(11): . <https://doi.org/10.3390/f12111576>
- Olivier M.D., Robert S., Fournier R.A., 2016. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. *Forest Ecology and Management* 374: . <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.047>
- Olofsson K., Holmgren J., Olsson H., 2014. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sensing* 6(5): . <https://doi.org/10.3390/rs6054323>
- Onishi M., Ise T., 2021. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific Reports* 11(1): . <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79653-9>
- Pascu I.S., Dobre A.C., Badea O., Tanase M.A., 2020. Retrieval of forest structural parameters from terrestrial laser scanning: A Romanian case study. *Forests* 11(4): . <https://doi.org/10.3390/F11040392>
- Pascu I.S., Dobre A.C., Badea O., Tănase M.A., 2019. Estimating forest stand structure attributes from terrestrial laser scans. *Science of the Total Environment* 691: . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.536>
- Penanhoat A., Guerrero Ramirez N., Aubry-Kientz M., Diekmann L., Paligi S., Audisio M., Mrak K., Seidel D., 2024. Effect of competition intensity and neighbor identity on architectural traits of *Fagus sylvatica*. *Trees - Structure and Function* 38(5): 1177–1187. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02544-3>
- Perles-Garcia M.D., Kunz M., Fichtner A., Meyer N., Härdtle W., von Oheimb G., 2022. Neighbourhood Species Richness Reduces Crown Asymmetry of Subtropical Trees in Sloping Terrain. *Remote Sensing* 14(6): . <https://doi.org/10.3390/rs14061441>
- Petrila M., Apostol B., Lorenț A., Gancz V., Silaghi D., 2012. Forest biomass estimation by the use of airborne laser scanning data and in situ FieldMap measurements in a spruce forest stand. *Folia Forestalia Polonica, Series A* 54(2): .
- Picos J., Bastos G., Míguez D., Alonso L., Armesto J., 2020. Individual tree detection in a eucalyptus plantation using unmanned aerial vehicle (UAV)-LiDAR. *Remote Sensing* 12(5): . <https://doi.org/10.3390/rs12050885>
- Pikiński P., Szaban J., Šilingienė G., Korzeniewicz R., Pazdrowski W., 2021. Selected physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood from stands of younger age classes as criteria for rational utilization of timber. *Baltic Forestry* 27(1): . <https://doi.org/10.46490/BF363>
- Pitkänen T.P., Raunonen P., Liang X., Lehtomäki M., Kangas A., 2021. Improving TLS-based stem

- volume estimates by field measurements. *Computers and Electronics in Agriculture* 180: .
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105882>
- Posit team, 2025.
- Pretzsch H., 2021. Tree growth as affected by stem and crown structure. *Trees - Structure and Function* 35(3): . <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02092-0>
- Purves D.W., Lichstein J.W., Pacala S.W., 2007. Crown plasticity and competition for canopy space: A new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species. *PLoS ONE* 2(9): . <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000870>
- R Core Team, 2025.
- Rieder J.S., Link R.M., Köthe K., Seidel D., Ullmann T., Žmegač A., Zang C., Schuldt B., 2024. TreeCompR: Tree competition indices for inventory data and 3D point clouds. *Methods in Ecology and Evolution* 15(12): . <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14414>
- Roussel J.-R., 2025.
- Salmerón-Gómez R., García-García C.B., García-Pérez J., 2025. A Redefined Variance Inflation Factor: Overcoming the Limitations of the Variance Inflation Factor. *Computational Economics* 65(1): . <https://doi.org/10.1007/s10614-024-10575-8>
- Schneider F.D., Kükenbrink D., Schaepman M.E., Schimel D.S., Morsdorf F., 2019. Quantifying 3D structure and occlusion in dense tropical and temperate forests using close-range LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology* 268: . <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.033>
- Shang C., Treitz P., Caspersen J., Jones T., 2019. Estimation of forest structural and compositional variables using ALS data and multi-seasonal satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 78: . <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.002>
- Shrestha N., 2020. Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics* 8(2): . <https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1>
- Signorell A, Aho K, Alfons A, Anderegg N, Aragon T, Arachchige C, ve ark, 2024. R Package 'DescTools'. Tools for Descriptive Statistics. <https://cran.r-project.org/> 0.99.54: .
- So K., Chau J., Rudd S., Robinson D.T., Chen J., Cyr D., Gonsamo A., 2025. Direct Estimation of Forest Aboveground Biomass from UAV LiDAR and RGB Observations in Forest Stands with Various Tree Densities. *Remote Sensing* 17(12): 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs17122091>
- Solano F., Modica G., Praticò S., Box O.F., Piovesan G., 2022. Unveiling the complex canopy spatial structure of a Mediterranean old-growth beech (*Fagus sylvatica* L.) forest from UAV observations. *Ecological Indicators* 138: . <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108807>
- Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W., 2015. Terrestrial laser scanning as an effective tool to retrieve tree level height, crown width, and stem diameter. *Remote Sensing* 7(2): . <https://doi.org/10.3390/rs70201877>
- Terryn L., Calders K., Åkerblom M., Bartholomeus H., Disney M., Levick S., Origo N., Raunonen P., Verbeeck H., 2023. Analysing individual 3D tree structure using the R package ITSMe. *Methods in Ecology and Evolution* 14(1): . <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14026>
- Terryn L., Calders K., Bartholomeus H., Bartolo R.E., Brede B., D'hont B., Disney M., Herold M., Lau A., Shenkin A., Whiteside T.G., Wilkes P., Verbeeck H., 2022. Quantifying tropical forest structure through terrestrial and UAV laser scanning fusion in Australian rainforests. *Remote Sensing of Environment* 271: . <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112912>
- Tudoran G.-M., 2022. Using Mathematical Models Based On Unmanned Aerial Vehicle Optical Imagery to Estimate Tree and Stand Characteristics. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov.*

- Vorovencii I., 2024. Assessing Various Scenarios of Multitemporal Sentinel-2 Imagery, Topographic Data, Texture Features, and Machine Learning Algorithms for Tree Species Identification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 17: 15373–15392. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3436624>
- Wallace L., Lucieer A., Malenovsky Z., Turner D., Vopěnka P., 2016. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests* 7(3): . <https://doi.org/10.3390/f7030062>
- Wang D., Liang X., Mofack G.I., Martin-Ducup O., 2021. Individual tree extraction from terrestrial laser scanning data via graph pathing. *Forest Ecosystems* 8(1): . <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00340-w>
- Weiser H., Schäfer J., Winiwarter L., Krašovec N., Fassnacht F.E., Höfle B., 2022. Individual tree point clouds and tree measurements from multi-platform laser scanning in German forests. *Earth System Science Data* 14(7): . <https://doi.org/10.5194/essd-14-2989-2022>
- Wezyk P., Koziol K., Glista M., Pierzchalski M., 2007. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Finland*. 2007 p.
- White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P., 2016. Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories: A Review. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 42 (5). <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>
- Wielgosz M., Puliti S., Xiang B., Schindler K., Astrup R., 2024. SegmentAnyTree: A sensor and platform agnostic deep learning model for tree segmentation using laser scanning data. *Remote Sensing of Environment* 313: . <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114367>
- Xiang B., Wielgosz M., Kontogianni T., Peters T., Puliti S., Astrup R., Schindler K., 2024. Automated forest inventory: Analysis of high-density airborne LiDAR point clouds with 3D deep learning. *Remote Sensing of Environment* 305: . <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114078>
- Zeferino S.L., Gama N.C., Souza D.V., de Souza A.S., Ruz E.J.H., da Silva S.D.B., 2023. Generalized Linear Models for Describing Tree Gaps in Forest Management Areas in the Brazilian Amazon. *Forests* 14(4): . <https://doi.org/10.3390/f14040841>
- Zhang Y., Liao J., Xu C., Du M., Zhang X., 2024. Optimizing variables selection of random forest to predict radial growth of *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* in temperate regions. *Forest Ecology and Management* 569: . <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122159>
- Zhou R., Sun H., Ma K., Tang J., Chen S., Fu L., Liu Q., 2023. Improving Estimation of Tree Parameters by Fusing ALS and TLS Point Cloud Data Based on Canopy Gap Shape Feature Points. *Drones* 7(8): . <https://doi.org/10.3390/drones7080524>
- Zhu Z., Kleinn C., Nölke N., 2020. Towards tree green crown volume: A methodological approach using terrestrial laser scanning. *Remote Sensing* 12 (11). <https://doi.org/10.3390/rs12111841>

SCURT REZUMAT

Cercetările efectuate cu ocazia elaborării prezentei teze de doctorat au avut drept scop fundamentarea științifică și aplicarea tehnicilor de teledetecție privind utilizarea integrată a datelor achiziționate de senzori activi și pasivi cu măsurătorile din teren efectuate prin inventarieri în suprafețe de probă permanente, pentru determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și ale coroanelor acestora și analiza creșterii radiale, în arborete din vestul Carpaților Meridionali. În acest sens, au fost analizate un număr de 96 sondaje permanente aparținând unor tipuri diferite de arborete (amestecate și pure), utilizând date obținute prin scanarea cu laser terestru (TLS) și platforme UAV, în vederea estimării parametrilor dimensionali ai arborilor și a caracteristicilor coroanei, precum și pentru evaluarea relațiilor dintre creșterea radială și intensitatea competiției. Rezultatele obținute au evidențiat faptul că procesul de coregistrare a norilor de puncte se realizează, în majoritatea cazurilor, în limite reduse ale erorilor de coregistrare, fiind influențat în principal de gradul de suprapunere între scanări și de complexitatea structurală a arboretelor. De asemenea, s-a constatat faptul că acuratețea detecției arborilor scade odată cu creșterea desimii arboretului, pe fondul suprapunerii coroanelor arborilor și al creșterii frecvenței omisiunilor. Estimarea diametrului de bază a indicat o concordanță ridicată cu valorile de referință, măsurate în teren, confirmând stabilitatea metodei în condiții variate, în timp ce estimarea înălțimii arborilor a fost afectată de limitări specifice scanării cu laser terestru, în special de efectele de ocluzie, limitări care au fost diminuate prin integrarea datelor UAV. Analiza relațiilor dintre creșterea radială, caracteristicile coroanei arborilor și competiție a evidențiat faptul că dimensiunile coroanei au un rol determinant în explicarea variației creșterii radiale, lungimea coroanei evidențiindu-se ca principal predictor, în timp ce diametrul coroanei are un rol complementar, iar indicele de competiție o contribuție mai redusă. În același timp, s-a pus în evidență faptul că efectul competiției asupra creșterii radiale nu este exclusiv direct, ci se manifestă în mare parte prin modificarea dimensiunilor coroanei, în special prin reducerea lungimii acesteia. Totodată, relațiile identificate variază în raport cu tipul de arboret, fiind mai pronunțate în arboretele de amestec (molid cu fag) comparativ cu cele pure (fag, molid). Modelele utilizate au confirmat capacitatea caracteristicilor coroanei de a explica dinamica creșterii radiale. Rezultatele obținute evidențiază potențialul utilizării integrate a datelor de teledetecție achiziționate de senzori activi și pasivi în determinarea caracteristicilor dendrometrice ale arborilor și analiza creșterii radiale a acestora.

SHORT ABSTRACT

The research conducted within the framework of this doctoral thesis aimed at the scientific substantiation and application of remote sensing techniques, focusing on the integrated use of data acquired by active and passive sensors together with field measurements obtained through forest inventories in permanent sample plots, for the determination of tree dendrometric characteristics and crown attributes, as well as for the analysis of radial growth in forest stands located in the part of the Southern Carpathians. In this context, a total of 96 permanent sample plots across to different types of stands (mixed and pure) were analyzed, using data obtained from terrestrial laser scanning (TLS) and UAV platforms, with the aim of estimating tree dimensional parameters and crown characteristics, as well as assessing the relationships between radial growth and competition intensity. The results showed that the co-registration process of point clouds is generally achieved within low error limits, being mainly influenced by the degree of overlap between scans and structural complexity of the stands. It was also found that tree detection accuracy decreases with increasing stand density, due to crown overlap and the higher frequency of omission errors. The estimation of diameter at breast height showed a high level of concordance with reference values measured in the field, confirming the robustness of the method under different conditions. While tree height estimation was affected by limitations specific to terrestrial laser scanning, particularly due to occlusion effects, these limitations were reduced through the integration of UAV data. The analysis of relationship between radial growth, crown characteristics and competition highlighted the determinant role of crown dimensions in explaining radial growth variation, with crown length emerging as the main predictor, while crown diameter played a complementary role and the competition index had a lower contribution. At the same time, it was demonstrated that the effect of competition on radial growth is not exclusively direct, but is largely mediated through changes in crown dimensions, especially through the reduction of crown length. Moreover, the identified relationships vary depending on stand type, being more pronounced in mixed stands (spruce-beech) compared to pure stands (beech, spruce). The applied models confirmed the capacity of crown characteristics to explain the dynamics of radial growth. Overall, the results highlight the strong potential of integrating remote sensing data acquired from active and passive sensors for the determination of tree Dendrometric characteristics and for the analysis of radial growth.