



**ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ**

**Facultatea: Silvicultură și Exploataři Forestiere**

**Ing. Ionuț Silviu PASCU**

**Dezvoltarea unui Sistem de  
Monitorizare Forestieră pe baza  
seriilor multi-temporale de date  
achiziționate de senzori activi și pasivi**

**Designing a prototype forest  
monitoring system based on multi-  
temporal active and passive data  
series**

**REZUMAT / ABSTRACT**

**Conducător științific**

**CS I. Dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA  
Membru corespondent al Academiei Române**

**BRAȘOV, 2020**

D-lui (D-nei) .....

**COMPONENTA**  
**Comisiei de doctorat**

Numită prin ordinul Rectorului Universităţii Transilvania din Braşov  
Nr. .... din .....

PREŞEDINTE: Prof. univ. dr. ing. Alexandru Lucian CURTU

CONDUCĂTOR ŞTIINŢIFIC: CS I. dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA

REFERENŢI: Prof. univ. dr. ing. Iosif VOROVENCII

CS I. dr. ing. Ioan SECELEANU

CS II. dr. ing. Bogdan APOSTOL

Data, ora şi locul susţinerii publice a tezei de doctorat: ....., ora ....., online

Eventualele aprecieri sau observaţii asupra conţinutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa [ionut.pascu@unitbv.ro](mailto:ionut.pascu@unitbv.ro)

Totodată, vă invităm să luaţi parte la şedinţa publică de susţinere a tezei de doctorat.

Vă mulţumim.

## CUPRINS

	Pg. Teză	Pg. rezumat
<b>CUPRINS</b>	1	1
<b>PREFAȚĂ</b>		-
<b>LISTA DE NOTAȚII</b>	5	7
<b>LISTA DE ABREVIERI</b>	7	9
<b>1. INTRODUCERE</b>	9	11
<b>2. SCOP ȘI OBIECTIVE</b>	14	13
<b>3. LOCALIZARE</b>	15	14
<b>4. METODOLOGIE</b>	20	15
4.1. Prelevarea datelor de teren	20	15
4.1.1. Măsurători de referință	20	15
4.1.2. Scanări laser singulare	20	15
4.1.3. Scanări laser multiple	20	15
4.1.4. Înregistrări LiCor	22	16
4.2. Pre-procesare	23	16
4.2.1. Pre-procesare scanări laser	23	16
i. Coregistrarea scanărilor individuale	23	16
ii. Filtrarea norului de puncte	24	17
iii. Segmentarea norului de puncte	24	17
4.2.2. Pre-procesare date LiCor	27	18
4.3. Procesarea scanărilor laser	27	18
4.3.1 Extragerea caracteristicilor biometrice	27	18
i. Identificarea arborilor individuali	27	18
ii. Calculul coordonatelor XYZ	28	19
iii. Calculul diametrului de bază (DbH)	28	19
iv. Calculul înălțimii arborelui (H)	28	19
v. Calculul suprafeței proiecției coroanelor arborilor	28	19
4.3.2. Calculul indicilor structurali	29	19
i. Indicele de desime ( $I_{DNS}$ )	30	20
ii. Distanța dintre arbori ( $I_{ESP}$ )	30	21
iii. Indicele de acoperire ( $I_{CD}$ )	31	21
iv. Gradul de închidere a coronamentului ( $I_{CC}$ )	31	21
a) Calculul bazat pe date TLS	31	21
b) Calculul bazat pe date DCP	32	22
v. Indicele de densitate ( $I_{DG}$ )	33	22
vi. Indicele suprafeței foliare ( $I_{LAI}$ )	33	22



a) Calculul bazat pe date DCP	33	23
b) Calculul bazat pe date TLS (Pgap)	34	23
c) Calculul bazat pe date TLS (secţiuni orizontale)	35	24
d) Calculul bazat pe date TLS (reinterpretare metodologie ALS)	36	24
4.3.3. Corecţia valorilor indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )	36	25
<b>5. REZULTATE OBȚINUTE</b>	38	26
5.1. Determinarea caracteristicilor biometrice	38	26
5.1.1. Identificarea arborilor individuali din norul de puncte	38	26
5.1.2. Calculul suprafeţei proiecţiei coroanelor	39	26
5.1.3. Extragerea diametrului de bază (DbH)	40	27
5.1.4. Extragerea înălţimii arborelui (H)	44	29
5.2. Indici structurali	50	33
5.2.1. Aspecte particulare procesului de calculare a indicilor structurali	50	33
i. Cuantificarea triangulaţiei tip Delaunay ( $I_{ESP}$ )	50	33
ii. Evaluarea dimensiunii optime a voxelilor ( $I_{CC}$ )	50	33
iii. Simularea fotografiei emisferice folosind intensitatea de reflectanţă ( $I_{CC}$ )	51	34
iv. Evaluarea intervalului de variaţie al orientării frunzelor ( $I_{LAI}$ )	52	34
v. Interpolarea impulsurilor nereturnate ( $I_{LAI}$ )	53	35
vi. Definirea regiunii optime calculului Indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )	54	36
vii. Corecţia valorilor indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )	55	36
5.2.2. Analiza corelativă a indicilor structurali	57	38
5.2.3. Analiza multitemporală a indicilor structurali robuste	62	40
<b>6. CONCLUZII</b>	72	45
<b>7. CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	76	48
<b>LISTA DE FIGURI</b>	78	-
<b>LISTA DE TABELE</b>	80	-
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	81	50
<b>ANEXE</b>		
Scurt rezumat (română/engleză)	-	56

## CONTENT

	Pg. Teză	Pg. rezumat
<b>TABLE OF CONTENTS</b>	1	1
<b>FOREWORD</b>		-
<b>NOTATIONS LIST</b>	5	7
<b>ABREVIATIONS LIST</b>	7	9
<b>1. INTRODUCTION</b>	9	11
<b>2. AIM AND OBJECTIVES</b>	14	13
<b>3. LOCATION</b>	15	14
<b>4. METHODOLOGY</b>	20	15
4.1. Field data	20	15
4.1.1. Reference measurements	20	15
4.1.2. Single laser scans	20	15
4.1.3. Multiple laser scans	20	15
4.1.4. LiCor measurements	22	16
4.2. Pre-processing	23	16
4.2.1. Laser scans pre-processing	23	16
i. Individual scans coregistration	23	16
ii. Point cloud filtering	24	17
iii. Point cloud segmentation	24	17
4.2.2. LiCor data pre-processing	27	18
4.3. Laser scans processing	27	18
4.3.1 Biometric features extraction	27	18
i. Individual tree identification	27	18
ii. XYZ coordinates	28	19
iii. Diameter at breast height (DbH)	28	19
iv. Total height (H)	28	19
v. Crown projection area	28	19
4.3.2. Structural indices	29	19
i. Densness ( $I_{DNS}$ )	30	20
ii. Espacement ( $I_{ESP}$ )	30	21
iii. Canopy closure ( $I_{CD}$ )	31	21
iv. Canopy cover ( $I_{CC}$ )	31	21
a) TLS based computations	31	21
b) DCP based computations	32	22
v. Density ( $I_{DG}$ )	33	22
vi. Leaf area ( $I_{LAI}$ )	33	22
a) DCP based computation	33	23

b) TLS based computation (Pgap)	34	23
c) TLS based computation (horizontal layers)	35	24
d) TLS based computation (ALS methodology)	36	24
4.3.3. Leaf area index correction ( $I_{LAI}$ )	36	25
<b>5. RESULTS</b>	38	26
5.1. Biometric features	38	26
5.1.1. Individual tree identification	38	26
5.1.2. Crown projection area	39	26
5.1.3. Diameter at breast height (DbH)	40	27
5.1.4. Total height (H)	44	29
5.2. Structural indices	50	33
5.2.1. Particularities of the structural indices computation process	50	33
i. Assessment of the Delaunay triangulation ( $I_{ESP}$ )	50	33
ii. Evaluation of the optimal voxel size ( $I_{CC}$ )	50	33
iii. Hemispherical photography simulation based on intensity of reflectance ( $I_{CC}$ )	51	34
iv. Assessment of the leaves orientation range ( $I_{LAI}$ )	52	34
v. Non-return pulses interpolation ( $I_{LAI}$ )	53	35
vi. Defining the optimal region for computing leaf area index ( $I_{LAI}$ )	54	36
vii. Leaf area index correction ( $I_{LAI}$ )	55	36
5.2.2. Correlative analysis of the structural indices	57	38
5.2.3. Multitemporal analysis of robust structural indices	62	40
<b>6. CONCLUSIONS</b>	72	45
<b>7. ORIGINAL CONTRIBUTIONS</b>	76	48
<b>FIGURES LIST</b>	78	-
<b>TABLES LIST</b>	80	-
<b>REFERENCES</b>	81	50
<b>ANEXES</b>		
Short abstract (romanian/english)	-	56

## LISTA DE NOTAȚII

- Amprenta secțiunii – *suprafața descrisă de proiecția ortogonală a secțiunii*
- Autocorelație serie temporală – *corelația parțială a unei serii de date staționale cu ea însăși decalată în timp*
- Bias – *pondere disproporționată a unei valori față de setul de date căruia îi aparține*
- Centru de nucleere – *elementul în jurul căruia se poate dezvolta un cluster*
- Cluster – *set de puncte grupate pe baza proximității lor spațiale*
- Coregistrare – *procesul prin care sunt identificate elemente comune între doi sau mai mulți nori de puncte, pe baza cărora sunt stabilite transformări ce permit alinierea acestora*
- Digital Canopy Photography – *Fotografie digitală a coronamentului, utilizată ca și substitut al fotografiilor emisferice*
- Distanță Euclidiană – *distanța cea mai scurtă între două puncte*
- Exponential Smoothing State Space Model – *set de metode de prognoză, centrate pe proprietatea conform căreia orice previziune este rezultatul ponderat al erorilor, trendului și sezonabilității*
- Filtrare nor de puncte – *procesul prin care sunt eliminate elemente ce nu îndeplinesc criteriile stabilite*
- Fotografie emisferică – *proces de evaluare a radiației solare în scopul descrierii geometriei coronamentului*
- Geometrii primitive – *cele mai simple elemente geometrice*
- Intensitate de reflectanță – *procentul din intensitatea înregistrată la emiter, cu care este recepționat un impuls laser*
- LOESS Smoothing (regresie LOESS) – *proces utilizat în uniformizarea unei serii de date neregulate*
- Mărci coregistrare – *elemente artificial introduse în scena studiată pentru a facilita procesul de coregistrare*
- MegaPixel – *unitate de măsură utilizată în exprimarea numărului de pixeli dintr-o imagine digitală, cât și a dimensiunii senzorului, echivalent cu un milion de pixeli*
- Nor de puncte – *set de date punctuale (XYZ), în general obținut prin intermediul scanării laser, ce descrie suprafața obiectelor din scena studiată*
- Nor rezidual – *nor de puncte imposibil de prelucrat datorită structurii relaționale interne (ex.: densitate, distribuție) sau unei ponderi crescute zgomot/informație*
- Normala locală – *linie, direcție sau vector perpendicular pe o suprafață dată*
- Octree – *structură de date tip arbore, în care fiecare nivel de ramificare crește gradul de segmentare al precedentului cu exact opt eșantioane (fiecare nod intern are exact opt subdiviziuni)*
- Optimizare coregistrare – *procesul prin care sunt selectate transformările optime pentru alinierea norilor de puncte*
- Outlier – *valoare care nu se încadrează în toleranțe*

Partial Autocorrelation Factor – *factorul ce ilustrează corelația parțială a unei serii de date staționale cu ea însăși decalată*

Perspectivă bottom-up – *perspectivă unde sensul axei verticale este inversat (ascendent)*

Perspectivă top-down – *perspectivă unde sensul axei verticale este unul descendent*

Proiecție echirectangulară – *sistem de proiecție unde distanța între cercuri (OX) și meridiane (OY) este constantă*

Pixel – *unitatea elementară a unei imagini digitale*

Proiecție ortogonală – *sistem de proiecție în care axele se află la  $90^\circ$  una față de cealaltă*

Proiecție polară – *sistem de proiecție azimutală, centrat pe un plan tangent suprafeței de proiectat*

Scanare laser terestră – *tehnica specifică teledetecției terestre, capabilă să înregistreze nori denși de puncte ca și descriptori ai scenei studiate*

Scanări multiple – *multiple înregistrări specifice scanării laser terestre ce necesită coreregistrare*

Scanări singulare – *o singură înregistrare TLS*

Segmentare – *în prezentul studiu, proces prin care norul de puncte este clasificat în multiple clase omogene în funcție de setul de descriptori selectați*

Subeșantionare – *procesul de reeșantionare a norului de puncte în vederea reducerii dimensiunii sale fie prin modificarea densității, fie a amprentei sale*

Subplot – *eșantion circular ( $500 \text{ m}^2$ ) din suprafața de probă*

Supraestimare – *procesul prin care norul de puncte înregistrat prezintă un număr de elemente superior celui minim necesar descrierii scenei studiate*

Suprafață de probă – *suprafața selectată pentru cercetare (1 hectar)*

Trend – *tendență*

Triangulație Delaunay – *procesul prin care este generată o rețea triunghiulară, ce îndeplinește condiția ca oricare punct de pe suprafața sa să nu fie încadrat în cercurile circumscrise fațetelor*

Autoregressive Integrated Moving Average – *model de autoregresie bazat pe o valoare medie dinamică*

AIC - Akaike Information Criterion – *valoare ce estimează probabilitatea de deviere de la trend*

AICc - AIC corectat – *AIC corectat pentru un potențial bias*

BIC - Bayesian Information Criterion – *criteriu de selecție dintr-un set finit de modele*

Voxel – *elementul structural minim al unui caroiaj 3D*

Voxelizare – *proces de generare a unui caroiaj tridimensional*

Zgomot – *valori corupte, distorsionate sau care nu aduc niciun plus de informație în setul de date, ce nu pot fi interpretate corespunzător*



## LISTA DE ABREVIERI

- 3D – Spațiu tridimensional (XYZ)
- A - Amestec
- BR – Brad (*Abies alba*)
- C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> – Subplot (Cerc)
- CCC – Coeficient de corelație de concordanță (Concordance Correlation Coefficient)
- CSM – Model digital al coronamentului (Crown Surface Model)
- DbH – Diametru de bază (Diameter at breast Height)
- DCP – Fotografie digitală a coronamentului (Digital Canopy Photography)
- DSM – Model digital al suprafeței (Digital Surface Model)
- DTM – Model digital al terenului (Digital Terrain Model)
- ETS – Model exponențial de uniformizare (Exponential Smoothing State Space Model / Error, Trend, Seasonability)
- FA – Fag (*Fagus sylvatica*)
- FOV – Câmp de vedere (Field Of View)
- GO – Gorun (*Quercus robur*)
- H – Înălțime (Height)
- I<sub>CC</sub> – Gradul de închidere a coronamentului
- I<sub>CC FMP</sub> – Grad de închidere a coronamentului conform amenajamentului silvic
- I<sub>CC HEMI</sub> – Grad de închidere a coronamentului (imagini emisferice)
- I<sub>CC PIX</sub> – Grad de închidere a coronamentului (rasterizare)
- I<sub>CD CVC</sub> – Indicele de acoperire (limită concavă)
- I<sub>CD CVX</sub> – Indicele de acoperire (limită convexă)
- I<sub>CP</sub> – Porozitatea coronamentului
- ID – Cod identificare
- I<sub>DG</sub> – Indicele de densitate (suprafață de bază)
- I<sub>DNS</sub> – Indicele de desime (Raportul numărului de arbori la hectar)
- I<sub>DV</sub> – Indicele de densitate (volum)
- I<sub>ESP</sub> – Distanța dintre arbori
- I<sub>FC</sub> – Indicele de acoperire foliară
- I<sub>GF2D</sub> – Raport non-vegetație/vegetație provenit din fotografii
- I<sub>GF3D</sub> – Raport non-vegetație/vegetație provenit din scanări 3D
- I<sub>LAI2D CK</sub> – Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (corectat factor de agregare, corectat orientare frunze)
- I<sub>LAI2D CNK</sub> – Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (corectat factor de agregare, necorectat orientare frunze)
- I<sub>LAI2D NCK</sub> – Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (necorectat factor agregare, corectat orientare frunze)
- I<sub>LAI2D NCNK</sub> – Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (necorectat factor de agregare, necorectat orientare frunze)
- I<sub>LAI3DM</sub> – Indicele suprafeței foliare provenit din Scanări 3D Multiple

$I_{LAI3DS}$  – Indicele suprafeței foliare provenit din Scanări 3D Singulare  
LOESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) – Regresia locală sau regresia polinomială locală, cunoscută și sub denumirea de regresie mobilă, este o generalizare a regresiei medii mobile, bazată pe generalizarea dispersiei  
MO – Molid (*Picea abies*)  
MPx - Megapixel  
OS – Ocol Silvic  
PACF – Funcție de autocorelația parțială (Partial Autocorrelation Function)  
R - Rărituri  
RGB – Culoare în sistem Roșu – Verde – Albastru (Red – Green - Blue)  
SGM – Suprafață Gorun Matur  
SGT – Suprafață Gorun Tânăr  
SMM – Suprafață Molid Matur  
SMT – Suprafață Molid Tânăr  
SFT - Suprafață Fag Tânăr  
SFM - Suprafață Fag Matur  
SAT - Suprafață Amestec Tânăr  
SAM - Suprafață Amestec Matur  
SP / S – suprafață de probă  
ACF – Funcție de autocorelație (Autocorrelation Function)  
AIC – Criteriul de informație Akaike (Akaike Information Criterion)  
AICc – Criteriul de informație Akaike corectat (bias-corrected Akaike Information Criterion)  
ARIMA – Regresie automată pe baza unei medii mobile (Autoregressive Integrated Moving Average)  
BIC – Criteriul de informație Bayesian (Bayesian Information Criterion)  
T – Tăieri de regenerare  
TLS – Scaner laser terestru (Terrestrial Laser Scanner)  
XYZ – Coordonate planimetrice (X, Y) și altimetrice (Z) în sistem de proiecție cartezian

## 1. INTRODUCERE

Înțelegerea evoluției ecosistemelor forestiere, a factorilor de influență și a reacțiilor acestora față de schimbările permanente ale mediului, este esențială în dezvoltarea unui sistem de management durabil. Informațiile referitoare la structura ecosistemelor forestiere ocupă o poziție importantă în înțelegerea proceselor ce se desfășoară în cadrul acestora, distribuția aparatului foliar ce conduce schimbul de energie între vegetație și atmosferă având o semnificație deosebită [1]. Indicii de caracterizare a structurii arboretelor permit înregistrarea și măsurarea schimbărilor menționate anterior, prin cuantificarea diferitelor variații și modificări ale biomasei, a deviațiilor în ciclul de carbon, modificărilor gradului de absorbție al radiațiilor și precipitațiilor sau reducerii activității fotosintetice [2]. Astfel, informațiile privind întregul arboret, de la distribuția arborilor (i.e.: densitate, distanța dintre arbori) până la structura internă a coronamentului prezintă un interes ridicat.

Inventarierea arboretelor reprezintă cea mai bună modalitate de a obține informații cu privire la caracteristicile structurale ale arboretului atât pentru caracterizarea dendrometrică cât și pentru monitorizarea stării și biodiversității acestora pentru evaluarea lor cât și pentru evaluarea efectului lucrărilor de gospodărire. După un deceniu de cercetări active, tehnologia TLS nu a fost încă acceptată ca instrument operațional în monitorizarea forestieră [34]. Acest aspect este împiedicat în principal de dificultăți în automatizarea procesării norilor de puncte, care oferă rezultate convingătoare privind determinarea automată și exactă a unor atribute importante ale arborilor, precum specia și înălțimea, fapt ce necesită studii suplimentare.

Numeroase publicații științifice tratează aspecte privind structura și evoluția arboretelor. De cele mai multe ori, acestea se concentrează pe un singur aspect și pe efectul imediat al schimbărilor ce apar asupra lui. Câteva exemple se referă la estimarea biomasei [14], evaluarea dimensiunii trunchiului arborilor [15–17], estimarea indicelui suprafeței foliare [18]. Din studiul specific asupra lucrărilor publicate pe această temă, rezumat și în cele ce urmează, nu a putut fi identificată o abordare holistică, a sistemului în integralitatea lui. Diferite metodologii de achiziție și procesare au fost de asemenea implementate și descrise în literatura de specialitate: utilizarea de scanări multiple [19,20] sau analiza diferențiată în funcție de distanța senzor - scenă [21], uneori folosind abordări dependente de specia urmărită [22]. Rezultate semnificative au fost atinse în extragerea parametrilor biofizici [25], ajungându-se la identificarea a aproape 100% dintre arbori printr-o abordare de proximitate a segmentării; rezultate similare sunt reiterate în alte câteva lucrări [26]. Valori similare prezintă și studiile asupra estimării parametrilor biofizici, care se referă atât la diametrul [27–29] cât și la înălțimile arborilor [30,31]. Cu toate acestea, există încă factori ce limitează aplicabilitatea tehnologiei, ducând la imposibilitatea de a obține astfel de rezultate pentru toți parametrii de interes (i.e.: diametrul, înălțimea, volumul, suprafața coroanei). Au fost publicate de asemenea, studii care propun aspectul combinării norilor de puncte din mai multe poziții [32] sau pe cel al pre-proiectării rețelei de achiziții [33] ca și măsuri compensatorii. Ca atare, pentru multe dintre obiectivele propuse, am urmat și extins lucrările anterioare, ce au prezentat atât analize la nivel individual, cât și la nivel de arboret [34,35], influența compoziției [36] și chiar ghidurile de bune practici generalizate, în utilizarea scanărilor laser în silvicultură [37,38]. Cu toate acestea, a fost necesară o analiză care să țină cont de perspectiva actuală asupra tehnologiei TLS, care în general

În țara noastră este percepută prin comparație directă din mai multe puncte de vedere (ex.: mod de utilizare, precizie, nivel de expertiză necesar operării și procesării, etc.) cu instrumentele convenționale. Majoritatea studiilor desfășurate până acum s-au bazat în principal pe această perspectivă. În consecință, scanările singulare au fost considerate ca fiind inferioare celor multiple în special din cauza capacității reduse de identificare a tuturor arborilor dintr-o suprafață de probă, în ciuda preciziei de măsurare a atributelor arborilor (ex.: diametru de bază - DbH) comparabilă cu cea asociată scanărilor multiple. Un aspect care necesită dezvoltare este, prin urmare, implementarea de corecții sau depășirea aspectelor supuse ideii preconceptuate bazată pe teoria omisiunii, în vederea aducerii în prim plan a calității atributelor extrase chiar și numai din zona vizibilă. Astfel de teme au fost adresate în studii precedente [39], rezultatele lor identificând dimensiunea arborilor precum și caracteristicile structurale ale acestora ca fiind caracteristici limitative.

De asemenea eforturi numeroase s-au depus în direcția extragerii parametrilor biometrici până în punctul atingerii toleranțelor specifice naționale, fapt ce conduce către concluzia conform căreia accentul trebuie pus în continuare pe modul de integrare a acestor tehnici în lanțul de procesare. Modul în care ele pot aduce un plus de valoare activităților specifice silviculturii prin tranziția de la studii pur teoretice către practica de specialitate [34] constituie următorul pas.

Cu toate acestea, TLS are propriile limitări datorate complexității structurii coronamentului cât și umbririi cauzată de ocluzia trunchiului, sau incapacitatea unui laser cu o singură lungime de undă de penetrare a coronamentelor constituite din coroanele arborilor aparținând mai multor poziții cenotice. Capacitatea de penetrare a fasciculelor de lumină este direct proporțională cu lungimea de undă a acestora. Literatura nu tratează foarte detaliat tehnologia LiDAR (Light Detection And Ranging) în analize privind penetrabilitatea coronamentului din cauza faptului că intervalul spectral specific este caracterizat de lungimi de undă mai scurte decât microundele. Cu toate acestea, în pofida gradului scăzut de adresare, tehnologia laser polarimetric (cu înregistrarea parametrilor Stokes ca și bază pentru obținerea unghiului azimutal, a elipticității fiecărei lungimi de undă și a gradului de polarizare)[59], cu multiple lungimi de undă, este o alternativă viabilă [60].

Pentru a profita de avantajele furnizate atât de tehnicile de teledetecție active, cât și de cele pasive, și simultan a evita limitările individuale ale acestora, lucrarea de doctorat își propune să combine scanarea TLS și datele optice de la camera încorporată, ca sumă de surse de date în evaluarea măsurii în care această tehnologie poate fi folosită în estimarea de indici structurali.

Cercetările întreprinse în cadrul tezei de doctorat au fost desfășurate în cadrul proiectului EO\_ROFORMON "*Proiectarea unui sistem prototip de monitorizare și prognoză bazat pe tehnici moderne ale teledetecției (Earth-Observation) pentru pădurile din România*", ID P\_37\_651/105058 finanțat de Ministerul Educației și Cercetări și cofinanțat din Fondul European pentru Dezvoltare Regională prin Programul Operațional Competitivitate 2014-2020, Axa 1, Secțiunea E.

## 2. SCOP ŞI OBIECTIVE

Aşa cum reiese şi din titlul tezei de doctorat "Dezvoltarea unui sistem de monitorizare forestieră pe baza seriilor multi-temporale de date achiziţionate de senzori activi şi pasivi", **scopul** cercetărilor este acela de a perfecţiona procedurile specifice scanărilor laser terestre sub aspect metodologic şi al tehnologiei de procesare, în vederea includerii în cadrul unui sistem integrat de monitorizare forestieră.

Necesitatea unei asemenea îmbunătăţiri vine în contextul actual al efectelor schimbărilor climatice din ce în ce mai intense şi al influenţei antropice negative manifestată uneori printr-un management al pădurilor fără suport ştiinţific, sincronizat atât cu ritmul neregulat, dar alert, al modificărilor ce au loc, dar şi cu tehnologiile de investigare nou apărute.

Lucrarea urmăreşte să evidenţieze faptul că un management eficient şi capabil de a se adapta cerinţelor în schimbare nu se poate realiza exclusiv prin metode moderne de teledetecţie, sau abordări clasice, ci numai prin sincronizarea celor două.

De asemenea, nu se poate discuta despre măsuri de management eficiente, bazate pe un sistem de monitorizare actual, fără a înţelege prin aceasta un grad de precizie ridicat, corelat cu estimări în timp cât mai scurt ale schimbărilor ce intervin în structura şi distribuţia spaţială a arboretelor.

Astfel, altfel spus, **obiectivul principal** al cercetărilor desfăşurate cu ocazia elaborării prezentei teze de doctorat, este acela de a extinde gradul de cunoaştere şi mai ales utilizarea tehnicilor şi metodologiilor teledetecţiei terestre în vederea perfecţionării metodologiei de evaluare a stării ecosistemelor forestiere.

În vederea atingerii acestui scop, se urmăreşte îndeplinirea unui cumul de obiective ştiinţifice, după cum urmează:

- Identificarea şi implementarea metodelor de extragere a parametrilor biofizici ai arboretelor, prin tehnici specifice teledetecţiei terestre, cu precădere scanarea laser terestră.
- Identificarea şi implementarea metodelor de analiză a descriptorilor structurali, în vederea evaluării şi selectării unui set coerent şi unitar de indicatori de caracterizare a structurii arboretelor şi adaptarea calculului acestora la datele specifice teledetecţiei terestre, cu precădere scanarea laser terestră.
- Fuzionarea datelor provenite de la senzorii pasivi şi activi în vederea optimizării rezultatelor obţinute.
- Analiza multitemporală a informaţiilor rezultate din fuzionarea datelor, în vederea identificării tendinţei de evoluţie a arboretelor şi în special a deviaţiilor de la un trend normal.
- Identificarea punctelor de abatere de la trendul normal şi intensitatea asociată lor.

Pentru realizarea acestor obiective ştiinţifice, un accent s-a pus pe scanări laser terestre ca sursă de date, şi pe procesarea tuturor informaţiilor înregistrate de acesta (nori de puncte, informaţii cu privire la intensitatea de reflectanţă, înregistrări optice panoramice) şi a derivatelor lor (proiecţii emisferice, nori de puncte segmentaţi şi clasificaţi, modele numerice ale terenului şi arborilor).

### 3. LOCALIZARE

Cercetările de teren s-au desfășurat în 24 suprafețe de probă permanente, amplasate în arborete echiene, din zona centrală și central sudică a României, în etajele montan și submontan.

Fiecare suprafață de probă (SP) are o formă rectangulară, cu aria de un hectar, iar în fiecare dintre acestea, s-au departajat trei subploturi individuale de formă circulară (raza de 12,62 m).

Două dintre tipurile de arboretele cercetate se regăsesc în cadrul Ocolului Silvic (OS) Mihăești (~45°06"N ~25°00"E), iar restul în OS Mușătești (~45°25"N ~24°41"E). Aceste arborete au fost selectate în funcție de speciile principale studiate, gorun - *Quercus petraea* (SGM 1, 2, martor; SGT 1, 2, martor) și fag - *Fagus sylvatica* (SFT 1, 2, martor; SFM 1, 2, martor) în zonele deluroase și molid - *Picea abies* (SMM 1, 2, martor; SMT 1, 2, martor) și amestec fag, molid, brad - *Abies alba* (SAT 1, 2, martor; SAM 1, 2, martor) în cele montane (Figura 1). S-a optat pentru aceste specii datorită ponderii relativ ridicate pe care o au acestea în pădurile din România. Suprafețele de probă unde specia dominantă este fagul, au fost utilizate în etapele prealabile analizei structurale a arboretelor. Această abordare a survenit ca urmare a metodelor aplicate. Analiza parametrilor biometrici (ex.: Diametru de bază - DbH și înălțime - H) este specifică cercetării la scară individuală (la nivel de arbore), iar calculul de indici forestieri structurali (ex: grad de închidere a coronamentului, indice de acoperire, indice de densitate) este realizat numai la nivel de arboret. Pentru a putea reuni cele două abordări (arbore și arboret) într-o metodologie unitară și coerentă a fost necesară o analiză inițială mai detaliată, suportând apoi generalizarea și tratarea a două mari clase: foioase și rășinoase.

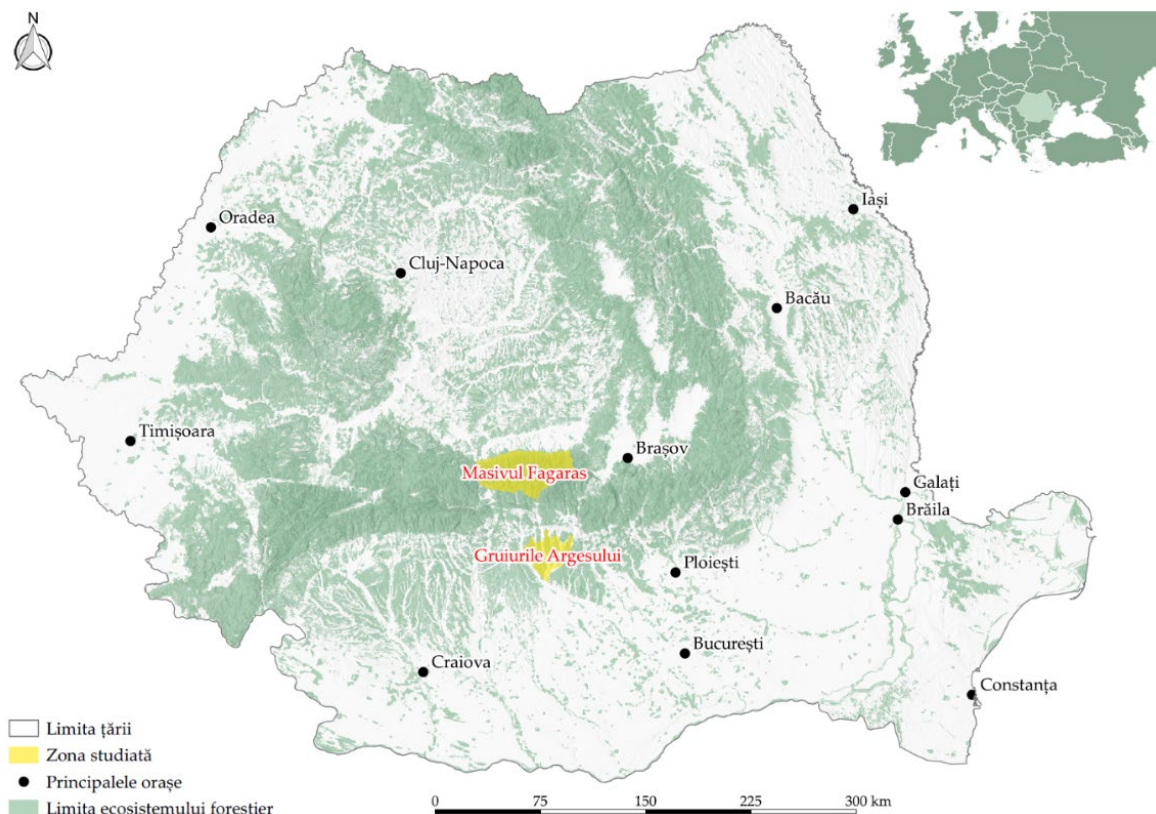


Figura 1. Zona de studiu

## 4. METODOLOGIE

### 4.1 Prelevarea datelor de teren

#### 4.1.1 Măsurători de referință

Măsurătorile în teren, folosind metodologia clasică (inventariere forestieră a arboretelor) s-au desfășurat în decursul sezonelor de vegetație din perioada 2017 - 2019 și s-au concentrat pe măsurarea de diametre de bază (DbH), înălțimi (H) și înregistrarea poziției (X, Y, Z).

Coordonatele locale au fost înregistrate utilizând sistemul FieldMap [62], un sistem software-hardware flexibil, destinat cartografierii și măsurătorilor dendrometrice [63], sprijinite pe măsurători Global Navigation Satellite System (GNSS) inițiale privind poziția și orientarea SP. Pentru a crește precizia de măsurare a valorilor diametrelor și înălțimilor, s-au folosit clupe și hipsometre de tip Vertex IV [64]. În același timp au fost recoltate cu ajutorul unor echipamente specifice (i.e.: scări, foarfece telescopice, arma de vânătoare, etc.), eşantioane de frunze din coronamentul arboretelor. Acestea au fost utilizate ulterior la evaluarea dimensiunilor aparatului foliar, valori folosite mai departe în calculul indicilor de structură a coronamentului.

#### 4.1.2 Scanări laser singulare

Simultan cu măsurătorile menționate anterior, s-a realizat scanarea fiecărui subplot (cerc), din poziție centrală, folosind un scanner laser terestru marca Focus 3D X130 [65], ce înregistrează diferența de fază pentru determinarea distanței. Amplasamentul central în fiecare suprafață de probă a fost ales deoarece coordonatele erau cunoscute și folosite ca referință în măsurătorile de teren clasice.

Pe lângă scanarea laser, au fost achiziționate imagini digitale optice de înaltă rezoluție cu ajutorul camerei integrată în TLS.

Procedeul de achiziționare a acestor imagini digitale a fost repetat la fiecare aproximativ 30 zile, asigurând acoperirea sezonului de vegetație cu date lunare.

#### 4.1.3 Scanări laser multiple

Abordarea bazată pe scanări multiple a avut ca scop creșterea numărului de puncte înregistrate, simultan cu uniformizarea densității acestora. S-a urmărit o eventuală echivalență a acestei creșteri în densitate cu o creștere a preciziei în etapa de reconstrucție a arborilor (Figura 2).

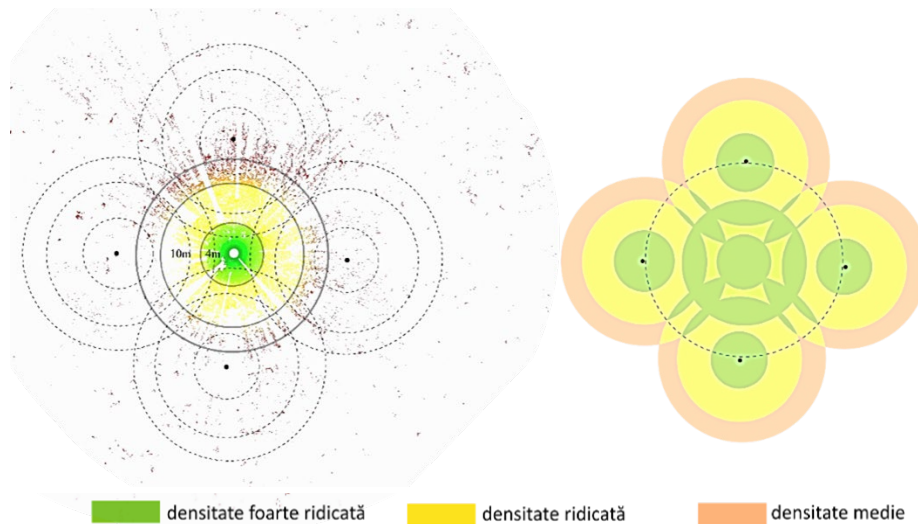


Figura 2. Degradarea densității norului de puncte

Totodată, prin scanarea aceleiași suprafețe din direcții diferite este posibilă eliminarea majorității conurilor de umbră.

#### 4.1.4 Înregistrări LiCor

În decursul sezonului de vegetație aferent anului 2019, s-a recurs și la înregistrarea de valori ale indicelui de acoperire foliară cu ajutorul unui echipament optic tip LiCor, în vederea validării metodologiilor de procesare TLS.

Au fost implementate, în cadrul metodologiei utilizate i) algoritmi ce simulează, în spațiul descris de arboret, traseul urmat de fasciculele laser identificând obstacolele ca raport între valoarea teoretică și cea reală a unui grad de închidere tridimensional; ii) metode ce analizează relația dintre numărul de impulsuri lansate și cel recepționat după parcurgerea iterativă a coronamentului în straturi de grosimi variabile și iii) metode ce dezvoltă principiile bidimensionale de calcul al gradului de închidere prin adăugarea volumului în relații. Cu toate acestea, datorită limitărilor specifice scanării laser terestre, respectiv datorită incapacității acestora de a penetra coronamentul în întregime, metodele de calcul fie recurg la teoretizarea spațiului înregistrat pentru a completa lipsa de date, fie au încercat aplicarea de diferiți factori de corecție pentru ocluzii, unghiul de orientare a frunzelor, variabilitatea dimensiunii unei laser pe măsură ce se îndepărtează de emițător sau reducerea rezoluției spațiale pentru același pas unghiular al lentilei, odată cu creșterea distanței scanner-țintă.

## 4.2. Pre-procesare

### 4.2.1 Pre-procesare scanări laser

#### i. Coregistrarea scanărilor individuale

Aceasta a fost realizată prin identificarea supervizată a țintelor de coregistrare (sferele de referință) urmată de analiza „cloud to cloud” (verificare și optimizare prin comparea 1:1 a norilor de puncte).



După extragerea datelor coregistrate sub forma unui nor de puncte unitar și coerent, punctele ce definesc terenul au fost eliminate.

## ii. Filtrarea norului de puncte

O filtrare inițială a fost necesară, pentru a reduce dimensiunea norului de puncte și a optimiza timpul de procesare, analiza fiind concentrată strict pe o suprafața circulară (rază 12,56 m), eșantionată și cu ajutorul LiCor. Punctele poziționate dincolo de limitele acestei arii au fost eliminate. În medie, norii de puncte au suferit o reducere cu aproximativ 30% din volumul inițial, fiind de asemenea eliminate și punctele provenite de la ținte dincolo de înălțimea arboretelor evaluată în teren. Rezoluția spațială a fost redusă până la un punct per celulă cu dimensiunea de 0,05m<sup>3</sup>. Cota fiecărui impuls recepționat a fost redusă la o cotă constantă, în etapa de normalizare, pas a cărui utilitate va fi evidentă în cele ce urmează. Metoda utilizată pentru reducerea la orizontală a fost CSF (Cloth Simulation Filter) [71], algoritm specific modelării și simulării 3D cu parametrii deschiși spre definirea rigidității și forței de frecare dintre o suprafață virtuală și teren, pentru a completa golurile și a genera un model numeric al suprafeței terenului.

## iii. Segmentarea norului de puncte

O metodă simplă de evitare a vegetației subarborescente cât și a ramurilor pendente a fost utilizarea de secțiuni de grosime 0,3 m măsurate la o înălțime de referință constantă (2 m deasupra DTM) pentru fiecare individ. Această sub-eșantionare spațială a avut ca scop simplificarea etapei de identificare a trunchiurilor. Zgomotul din secțiunile astfel rezultate a fost eliminat folosind metoda bazată pe calculul normalei, descrisă anterior. O operațiune de grupare (fast spatial clustering) bazată pe cercetările desfășurate de Hackenberg, Spiecker, Calders, Disney, & Raumonon [9], a fost de asemenea implementată, pentru rafinarea rezultatelor. Rezultatul acestei etape a fost separat în două clase, actualizând relațiile ce descriu elementele acestora. Astfel, una dintre clase a reunit grupurile mari, ce cuprindeau un procent ridicat din numărul de puncte originale, fiind caracterizat de un număr mai scăzut de elemente, pe când cea de a doua clasă a reunit un număr mai ridicat de elemente, definind însă un procent mai mic din setul original de date.

Secțiuni prin norul de puncte au fost generate pornind de la aceste centre de referință (nuclee) în ambele direcții verticale, la intervale de 0,10 m. O diferență importantă în modul de grupare al clusterelor rezultate a fost luarea în considerare nu doar a distanței dintre punctele definitorii ci și distanța față de nucleu. Numai dacă proiecția centrului cilindrului rezultat s-a încadrat în amprenta centrului de nucleere și raza sa a respectat Relația (1) (pentru  $n = 1,2$ ), cilindrul a fost considerat parte din arborele analizat. Procesul a fost repetat până în momentul în care fie au fost atinse cotele extreme (minim / maxim) ale norului de puncte.

$$r_h = \frac{1}{2} \sqrt{x^2 * h^2} \quad (1)$$

$h$  – înălțimile corespunzătoare diametrelor măsurate,  $r_h$  – raza cilindrului la înălțimea  $h$ ,  $x$  – generatoarea suprafeței de rotație,  $n$  – coeficientul specific geometriei approximate

Relația 1 derivă din ipoteza inițială conform căreia trunchiul unui arbore poate fi redus la una dintre geometriile primitive tridimensionale. Pentru a profita de calculele simplificate specifice lucrului cu un cilindru și simultan a menține o aproximare cât mai precisă a formei reale, s-a utilizat Relația (1). O valoare teoretică pentru  $n$  poate varia între 0 pentru un cilindru și 3 pentru un neiloid. Literatura arată însă că aceste valori nu permit obținerea unor rezultate realiste. Astfel, sunt recomandate valori pentru  $n$  cuprinse în intervalul 0,9 - 1,5 în scopul definirii optime a unui trunchi [72].

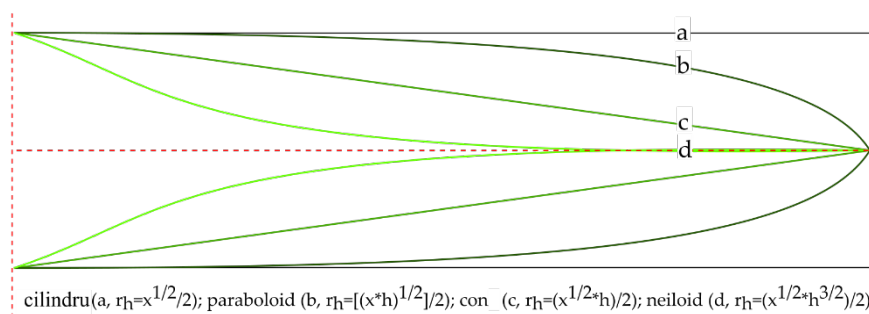


Figura 4. Diferențele dintre formele curbilor de contur specifice cilindrului (a), paraboloidului (b), conului (c) și neiloidului (d)

Pentru a reduce dimensiunea clusterelor rezultate s-a utilizat o subeșantionare bazată pe un caroiaj 3D (voxelizare). Pentru a nu se pierde informații relevante, pentru fiecare celulă din caroiajul voxel (0,01m), s-a extras centroidul punctelor înscrise, nu al celei voxel în sine. Fiecare punct al norului voxelizat este considerat ca potențial centru pentru un fus. Secțiuni paralele de grosime predefinită sunt parcurse cu un filtru ce rezultă în regiuni de probabilitate. Zone de probabilitate cu un vot ridicat pentru cel puțin  $\frac{3}{4}$  dintre straturile analizate este considerat un potențial fus.

#### 4.2.2 Pre-procesare înregistrări LiCor

Determinările suprafeței foliare (LAI) de referință s-au realizat cu ajutorul unei lentile emisferice. Intensitatea luminoasă a fost înregistrată cu ajutorul a cinci inele foto-sensibile. LAI este estimat cu ajutorul unui model de inversie ce compară valorile coeficientului de extincție a luminii solare, înregistrat simultan deasupra și sub coronament [75]. Determinările s-au realizat de la aceeași înălțime relativă față de teren (aproximativ 1,5m), în condiții de iluminare difuză, cu soarele sub linia orizontului, pentru a evita supraexpunerea sensorului. Valorile LAI au fost extrase folosind software-ul specific echipamentului LI-COR 2200 [75].

### 4.3. Procesarea scanărilor laser

#### 4.3.1 Extragerea caracteristicilor biometrice

##### i. Identificarea arborilor individuali

Pentru a putea analiza seturile de date într-un mod unitar și a identifica diferențele în estimarea parametrilor biofizici, s-a recurs la o echivalare spațială. Ca urmare, atât setul de date din teren cât și cel provenit din scanări multiple au fost subeșantionate astfel încât să acopere numai indivizii

identificaţi prin scanări singulare. S-a optat pentru scanări singulare ca referinţă, deoarece acest grup a ilustrat cel mai redus număr de indivizi segmentaţi (arbori identificaţi în norul de puncte original)

#### ii. Calculul coordonatelor XYZ

Ulterior, pentru grupurile validate ca fiind arbori, poziţia planimetrică a fiecărui individ a fost calculată ca o medie între toate punctele norului specific, poziţionate deasupra modelului digital al terenului, până la o înălţime stabilită experimental. Amplasarea altimetrică a fost calculată tot ca o medie între cotele tuturor punctelor din norul ce descrie arborele, aflate în interiorul cilindrului ce aproximează cel mai precis trunchiul arborelui la înălţimea de 0,1 m.

#### iii. Calculul diametrului de bază (DbH)

Diametrul de bază (DbH) a fost extras procesând secţiunea paralelă cu modelul digital al terenului, cuprinsă între 1,25 și 1,35 m, în scopul identificării trunchiului real (fără ramuri pendente sau defecte). Pentru aceasta s-a folosit o transformare Hough randomizată, urmată de identificarea razei cercului ce aproximează cel mai bine distribuţia proiecţiilor punctelor, evaluată prin metoda celor mai mici pătrate.

#### iv. Calculul înălţimii arborelui (H)

Înălţimea, sau proiecţia nadirală a trunchiurilor arborilor a fost calculată prin două metode. Prima s-a bazat pe calcularea diferenţei maxime pe axa Z dintre poziţia arborelui stabilită anterior și extremitatea superioară a norului de puncte. Cea de a doua metodă a utilizat proiecţia întregului nor de puncte care definea arborele, pentru a delimita extinderea spaţială a coroanei sale. Apoi, din norul de puncte original, nefiltrat, a fost extrasă cea mai mare valoare Z înscrisă în conturul convex definit anterior.

#### v. Calculul suprafeţei proiecţiei coroanelor arborilor

În acest scop, este generat un model numeric al suprafeţei coronamentului (Crown Surface Model - CSM). Pentru fiecare pixel al rasterului final (0,05m), este preluată din norul de puncte, cota medie a celor mai apropiaţi opt vecini ai punctului caracterizat de Z maxim. Din cauza incapacităţii de penetrare a coronamentului până în straturile sale superioare, procesarea bottom-up, într-o perspectivă ascendentă, nu oferă o măsură realistă a distribuţiei coroanelor.

### 4.3.2 Calculul indicilor structurali

În prezent, există o multitudine de indici care descriu structura arboretelor. Indicele suprafeţei foliare ( $I_{LA}$ ), numărul de arbori la hectar ( $I_{DNS}$ ), distanţa dintre arbori ( $I_{ESP}$ ), indicele de acoperire ( $I_{CD}$ ), gradul de închidere a coronamentului ( $I_{CC}$ ) și indicele de densitate ( $I_{DV/G}$ ) sunt unii dintre indicii cu cea mai mare utilitate în activităţile de inventariere a arboretelor [49]. Pe lângă aceştia, lucrarea de doctorat abordează câţiva indici extraşi pe baza imaginilor achiziţionate de senzori optici (fotografii digitale) care ar putea fi utilizaţi în estimarea structurii arborilor (acoperirea foliară -  $I_{FC}$ , raportul non-vegetaţie/vegetaţie -  $I_{GF}$ , porozitatea (penetrabilitatea) coronamentului -  $I_{CP}$ ). Indicii care au putut fi calculaţi prin mai multe metode au fost consideraţi indici distincţi și incluși în analiza ulterioară ( $I_{DV}$  &

$I_{DG}$ ,  $I_{LAI3D}$  &  $I_{LAI2D C}$  &  $I_{LAI2D NC}$  &  $I_{LAI2D CK}$  &  $I_{LAI2D NCK}$ ,  $I_{GF3D}$  &  $I_{GF2D}$ ,  $I_{CC HEMI}$  &  $I_{CC PIX}$ ,  $I_{CD CVX}$  &  $I_{CD CVC}$ , fiind identificată astfel o abordare optimă, în analiza corelativă finală (Tabel 3).

Tabel 3. Clasificarea indicilor de caracterizare a structurii arboretului

Clasă	Indicator	Notație
Inventariere clasică	Grad de închidere a coronamentului conform amenajamentului silvic	$I_{CC FMP}$
Nori de puncte nesegmentați	Indicele suprafeței foliare provenit din Scanări 3D Singulare	$I_{LAI3DS}$
	Indicele suprafeței foliare provenit din Scanări 3D Multiple	$I_{LAI3DM}$
	Raport non-vegetație/vegetație provenit din scanări 3D	$I_{GF3D}$
	Grad de închidere a coronamentului (imagini emisferice)	$I_{CC HEMI}$
	Grad de închidere a coronamentului (rasterizare)	$I_{CC PIX}$
Nori de puncte segmentați	Indicele de desime (Raportul numărului de arbori la hectar)	$I_{DNS}$
	Distanța dintre arbori	$I_{ESP}$
	Indicele de acoperire (limită convexă)	$I_{CD CVX}$
	Indicele de acoperire (limită concavă)	$I_{CD CVC}$
	Indicele de densitate (suprafață de bază)	$I_{DG}$
	Indicele de densitate (volum)	$I_{DV}$
Fotografii digitale	Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (necorectat factor de agregare, necorectat orientare frunze)	$I_{LAI2D NCNK}$
	Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (corectat factor de agregare, necorectat orientare frunze)	$I_{LAI2D CNK}$
	Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (corectat factor de agregare, corectat orientare frunze)	$I_{LAI2D CK}$
	Indicele suprafeței foliare provenit din fotografii (necorectat factor de agregare, corectat orientare frunze)	$I_{LAI2D NCK}$
	Raport non-vegetație/vegetație provenit din fotografii	$I_{GF2D}$
	Indicele de acoperire foliară	$I_{FC}$
	Gradul de închidere a coronamentului	$I_{CC}$
	Porozitatea coronamentului	$I_{CP}$

i. Indicele de desime ( $I_{DNS}$ )

Relația (3) a fost utilizată în calculul indicelui de desime al arboretului, ca raport între numărul real de arbori identificați în etapa de segmentare a norului de puncte și numărul normal (tabelar) de arbori care teoretic, sunt specifici unor condiții staționale și de vegetație similare [49], pentru arboretele normale.

$$I_{DNS} = \frac{n_r}{n_{th}} \quad (3)$$

$I_{DNS}$  – indicele de desime,  $n_r$  – numărul real de arbori,  $n_{th}$  – numărul teoretic de arbori

## ii. Distanța dintre arbori ( $I_{ESP}$ )

Complementar numărului real de arbori la hectar, distanța dintre arbori a fost calculată în raport cu aria suprafeței de studiu, descriind poziția indivizilor din arboret sub forma unei rețele (Relația 4).

Ampronta convexă a poziției tuturor arborilor a fost mozaicată astfel încât sferile circumscrise oricăreia dintre piramidele triunghiulare ale rețelei să nu conțină un al cincilea punct. Rezultatul a fost stocat într-o matrice de dimensiune  $3 \times n$  (unde  $n$  este numărul de prisme rezultate pe baza numărului și poziției arborilor). Din fiecare înregistrare a acestei matrici, s-a generat o nouă matrice cu coordonatele XY ale vertexilor. Media suprafețelor triunghiurilor rezultate a fost calculată, obținându-se astfel valoarea indicelui (Relația 4).

$$I_{ESP} = \frac{\sum_1^n \frac{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}}{2}}{n} \quad (4)$$

$I_{ESP}$  – distanța dintre arbori,  $n$  – numărul de tetraedre,  $XYZ_{123}$  – coordonatele vertexilor tetraedrelor

## iii. Indicele de acoperire ( $I_{CD}$ )

Valoarea indicelui de acoperire se exprimă ca raport între suma suprafețelor proiecțiilor orizontale ale coroanelor și suprafața efectivă a arboretului (Relația 5).

$$I_{CD} = \frac{\sum S_{coroane}}{s} \quad (5)$$

$I_{CD}$  – indicele de acoperire,  $S_{coroane}$  – suprafața proiecției coroanei,  $s$  – suprafața arboretului

## iv. Gradul de închidere a coronamentului ( $I_{CC}$ )

### a) Calculul bazat pe date TLS

Relația de determinare a acestui indice se bazează pe raportarea suprafeței coronamentului proiectată în plan orizontal la aria suprafeței de probă (Relația 6).

Pentru a extrage această valoare din datele TLS, a fost implementată o clasificare pentru eliminarea din norul de puncte a elementelor lemnoase. Separarea s-a bazat pe valoarea normalei locale, densitatea punctelor și ponderea culorii verde în croma fiecărui punct (preluată din imaginile digitale) prin conversie de la 8 biți, calculate într-o structură de date arborescentă în care fiecare nivel a adus o multiplicare cu opt a numărului de noduri (octree).

$$I_{CC} = \frac{\sum (s_{\text{coroane}} - s_{\text{suprapunere}})}{s} \quad (6)$$

$I_{CC}$  – gradul de închidere,  $s_{\text{coroane}}$  – suprafața proiecției coroanei,  $s_{\text{suprapunere}}$  – suprafața zonelor de suprapunere între coroane,  $s$  – suprafața arboretului

#### b) Calculul bazat pe date DCP

O altă abordare în calcularea acestui indice pornind de la norul 3D, adaptează cercetările lui Antonarakis et al. și Danson et al. [7,81]. Metoda are la bază transformarea norului de puncte de la sistemul de referință nativ (cartezian), la unul sferic, simulând astfel fotografierea emisferică. Intensitatea de reflectanță a fascicolului laser înlocuiește valorile RGB pentru eliminarea erorilor cauzate de supra- sau sub-expunerea fotografiilor digitale.

Relația (11) utilizată în calculul indicelui de închidere bazat pe simularea fotografiei emisferice, a putut fi aplicată ulterior clasificării porozității coronamentului [84] (Relația 7).

$$g_L \geq \frac{\sum g}{n} + \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (7)$$

$g_L$  – goluri mari,  $g$  – suprafața golurilor,  $n$  – numărul de goluri,  $\sigma$  – abaterea standard a claselor de goluri

#### v. Indicele de densitate ( $I_{DG}$ )

Raportul ce definește acest indice ia în considerare volumul real al suprafeței de probă și volumul normal (tabelar) pentru condiții staționale și de vegetație similare arboretelor normale (Relația 8).

Cu scopul simplificării calculului, Relația utilizată în practică substituie volumul cu suprafața de bază (Relațiile 9, 10) [78].

$$I_{DV} = \frac{v_r}{v_{th}} \quad (8)$$

$I_{DV}$  – indicele de densitate (volum),  $v_r$  – volum real al arboretului,  $v_{th}$  – volum teoretic al arboretului

$$g = d^2 \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

$$\log_v = a_0 + a_1 \log_d + a_2 \log_d^2 + a_3 \log_H + a_4 \log_H^2$$

$d$  - diametru,  $v$ - volum,  $H$ - înălțime,  $a_{01234}$ - coeficienți de regresie specifici speciei,  $g$  - suprafața de bază

$$I_{DG} = \frac{g_r}{g_{th}} \quad (10)$$

$I_{DG}$  – indicele de densitate (suprafață de bază),  $g_r$  – suprafața de bază a arboretului,  $g_{th}$  – suprafața de bază teoretică a arboretului

#### vi. Indicele suprafeței foliare ( $I_{LAI}$ )

Acest parametru este definit ca "raportul dintre aria frunzelor coronamentului și aria totală a suprafeței de probă" (Relațiile 12 - 15) [1,87,88].

a) Calculul bazat pe date DCP

$$I_{CC}=1 - \frac{g_L}{r} \quad (11)$$

$I_{CC}$  – gradul de închidere,  $g_L$  – numărul de goluri mari,  $r$  – rezoluția spațială a imaginii

$$I_{FC}=1 - \frac{g_T}{r} \quad (12)$$

$I_{FC}$  – indicele de acoperire foliară,  $g_T$  – numărul de goluri,  $r$  – rezoluția spațială a imaginii

$$I_{CP}=1 - \frac{I_{FC}}{I_{CC}} \quad (13)$$

$I_{CP}$  – indicele de porozitate a coronamentului,  $I_{CC}$  – indicele de acoperire foliară,  $I_{FC}$  – indicele de acoperire foliară

$$LAI_{CNK}=-I_{CC} \frac{\ln I_{CP}}{k} \quad (14)$$

$LAI_{CNK}$  –  $LAI$  corectat pentru factorul de agregare  $c$ ,  $I_{CC}$  – gradul de închidere,  $k$  – coeficient de corecție corespunzător extincției radiației solare,  $I_{CP}$  – indicele de porozitate a coronamentului

$$LAI_{NCNK}=\frac{\ln(1-I_{FC})}{k} \quad (15)$$

$LAI_{NCNK}$  –  $LAI$  necorectat pentru factorul de agregare  $c$ ,  $I_{FC}$  – indicele de acoperire foliară,  $k$  – coeficient de corecție corespunzător extincției radiației solare

Coeficientul de corecție corespunzător extincției radiației solare a fost apoi calculat în baza orientărilor medii ale frunzelor, conform relației 16 (i.e., algoritmul lui Fuch) [89].

$$k=\cos(\overline{\theta_L}) \quad (16)$$

$k$  – coeficient corespunzător extincției radiației solare,  $\overline{\theta_L}$  – orientarea medie a frunzelor

b) Calculul bazat pe date TLS (Pgap)

Pentru a calcula indicele în baza acestor informații, s-a recurs la analiza raportului non-vegetație / vegetație. Ipoteza raportului presupune o repartizare uniformă și aleatorie a elementelor coronamentului, fără a face diferența între elementele lemnoase ale vegetației și masa foliară. Datorită acestei generalizări, valorile rezultate nu ilustrează cu adevărat  $LAI$ . Termen propus de Black et al. [52], este cel mai potrivit prezentelor cercetări deoarece măsurătorile TLS nu au fost corectate nici pentru agregarea frunzelor și nici pentru aportul elementelor lemnoase înregistrat în scenă (Relația 18). Fiind dependentă de înălțime, relația a fost calculată ca raport între numărul total de retururi valide deasupra înălțimii  $H$  (baza coronamentului - înălțimea TLS) și numărul total de impulsuri laser emise [7,92] (Relația 17).

$$I_{CF}=P_{gap}(\alpha)=\frac{N_{nul}(\alpha)}{N_{total}(\alpha)} \quad (17)$$

$\alpha$  – unghiul deasupra TLS,  $N_{nul}$  – număr de fascicule pierdute,  $N_{total}$  – număr total de fascicule emise

$$I_{LAIc}=-\ln I_{GF} \quad (18)$$

$I_{LAIc}$  – indicele suprafeței foliare necorectat pentru elemente lemnoase,  $I_{GF}$  – raport non-vegetație / vegetație

Pe lângă abordările descrise anterior, au fost identificate alte două metode de calcul și patru moduri de reprezentare a arboretului.

Este important ca dimensiunea golurilor intra-coroane să nu fie afectată prin generalizarea norului de puncte, însă o diferențiere clară este necesară între golurile artificiale cauzate de modul de achiziție și cele specifice arboretului. Astfel, Yumei Li et al. [94] recomandă evaluarea unui grad de degradare al rezoluției spațiale a scannerului, în funcție de unghiul de divergență, diametrul fasciculului laser la momentul emiterii, rezoluția unghiulară a echipamentului și orientarea medie a frunzelor. Valorile minime și maxime ale distanței dintre undele laser (rezultate din valorile enumerate anterior) sunt recomandate de literatură, însă o evaluare bazată pe media acestora a fost de asemenea utilizată datorită razei relativ mari a suprafețelor analizate (Relațiile 19, 20).

$$R = \frac{D_i * BD_v + BD_m}{2} \quad (19)$$

$$CD = (\tan_{\alpha} * D_i) - 2 * R \quad (20)$$

R – raza (m),  $D_i$  – distanța față de scanner (m),  $BD_v$  – unghiul de divergență (rad),  $BD_m$  – diametru fascicul laser la ieșirea din scanner (m), CD – distanță între fascicole,  $\alpha$  – rezoluția unghiulară a scannerului (deg)

Pentru a reduce gradul de teoretizare a metodei, dimensiunea medie a frunzelor recoltate este de asemenea folosită (Figura 6).

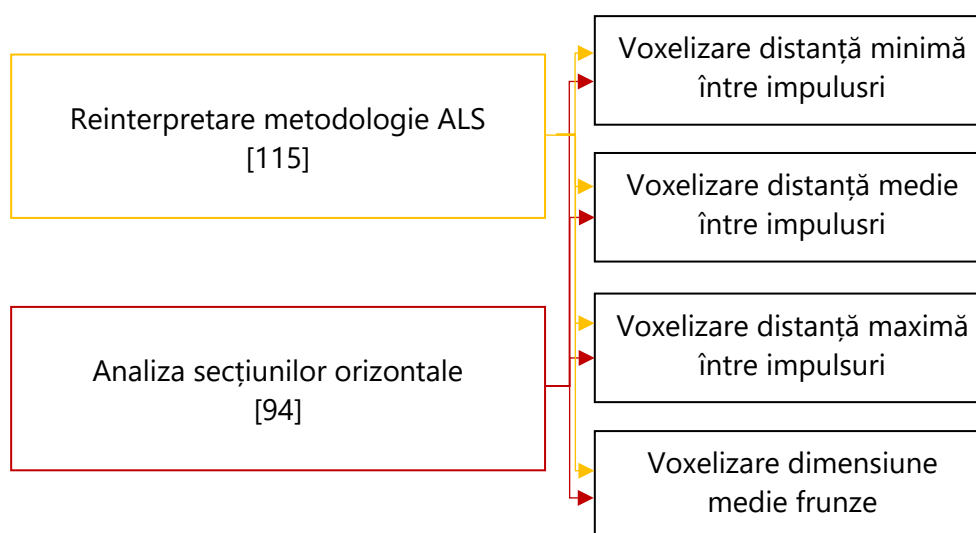


Figura 6. Metode utilizate pentru calculul LAI (dreapta) și tipuri de reprezentare a arboretului (stânga)

#### c) Calculul bazat pe date TLS (secțiuni orizontale)

Analiza în secțiuni orizontale este echivalentă cu calcularea gradului de închidere pentru fiecare strat de grosime egală cu dimensiunea voxelului. Rezultatele sunt însumate și corectate cu factorul de corecție privind unghiul de orientare a frunzelor. În acest sens, norul de puncte a fost segmentat conic pornind de la înălțimea scannerului până la baza coronamentului, completată de aici cu un cilindru de rază egală cu raza suprafeței de studiu, așa cum a fost deja descris.

#### d) Calculul bazat pe date TLS (reinterpretare metodologie ALS)

Pentru reinterpretarea tehnicii specifice scanării laser aeriene, a fost necesară ignorarea imposibilității de penetrare a coronamentului de către fasciculele laser și evaluarea norului de puncte ca și cum acesta ar descrie în întregime scena. Astfel, nu sunt evaluate conurile de umbră de dimensiuni ridicate, care



pot ascunde informație texturală importantă privind structura coronamentului. Pentru a încerca o corectare a acestui neajuns, metoda a fost aplicată numai pentru etajul superior al arboretului, cuprins între înălțimea începutului coronamentului și cota maximă a norului de puncte.

#### 4.3.3 Corecția valorilor indicelui suprafeței foliare ( $I_{LAI}$ )

Pentru fiecare suprafață înregistrată cu ajutorul scannerului laser terestru s-au realizat măsurători multiple cu ajutorul LiCor imediat după achiziția datelor TLS. S-au folosit valori medii ale înregistrărilor multiple LiCor pentru a reduce posibilitatea apariției de erori accidentale în teren. Datele de referință LAI au fost colectate utilizând multiple valori ale câmpului de vedere (Field Of View - FOV).

O etapă inițială a urmărit corelarea valorilor LiCor cu estimările TLS ale indicelui suprafeței foliare. Cea mai semnificativă corelație a fost ulterior stabilită prin analiza comparativă folosind trei metode: Spearman, Kendall și Pearson ( $r$  0,89-0,98 pentru FOV 23°;  $r$  0,32-0,54 pentru FOV 38°;  $r$  0,32-0,56 pentru FOV 53°;  $r$  0,21-0,41 pentru FOV 68°).

S-a recurs la extinderea cercetărilor lui Alivernini privind evaluarea LAI prin tehnica DCP (Digital Canopy Photography). Dezvoltând abordările propuse de publicațiile anterioare, pe baza datelor înregistrate în arboretele studiate, atât cu LiCor cât și TLS, a fost obținută o metodologie unitară care să valideze valorile DCP în raport cu LiCor.

Odată stabilită similaritatea  $LAI_{LiCor}$  cu  $LAI_{TLS}$  și  $LAI_{DCP}$  cu  $LAI_{LiCor}$  au fost analizate abaterile valorilor TLS de la trendul de referință (DCP).

## 5. REZULTATE OBȚINUTE

### 5.1 Determinarea caracteristicilor biometrice

#### 5.1.1 Identificarea arborilor individuali din norul de puncte

Precizia de reconstrucție a arborilor individuali la nivel de arboret a fost evaluată ca și un derivat al diametrului, înălțimii și numărului de arbori identificați (Tabelul 4).

Tabel 4. Diferențe de extragere între cele două metodologii (scanări multiple/singulare)

ID	S.	M.	T.	%S.	%M.	%Cr/Dsc.
SGT 1	26	31	36	72	86	14
SGT 2	25	34	45	56	76	20
SGT 3	21	31	48	44	65	21

M.- numărul de arbori din scanări multiple, S.- numărul de arbori din scanări singulare, T. - numărul de arbori din inventarierea clasică, %M.- procentul de extracție din scanări multiple comparativ cu inventarierea clasică, %S.- procentul de extracție din scanări singulare comparativ cu inventarierea clasică, %Cr/Dsc.- diferența dintre procentele de creștere / descreștere între scanările multiple și cele singulare

Creșterea numărului de arbori identificați este semnificativă atunci când se compară scanările singulare centrale cu scanările multiple coregistrate. De asemenea, poate fi observată o relație între structura arboretului (specie și vârstă) și precizia procesului de segmentare.

Cercetările realizate în suprafețe de probă similare ca dimensiuni (rază între 10 și 20m) și densitate (400-2000 arbori/ha) au evidențiat procente de detecție a arborilor individuali între 60% și 70% [14,41,97-100] în cazul scanărilor singulare, valori apropiate de cele obținute prin metodele descrise în prezenta lucrare. În ceea ce privește determinările bazate pe achiziții multiple, rezultatele sunt îmbunătățite cu până la 30% [101-103], în funcție și de compoziția arboretului, un rezultat de asemenea similar cu cel descris în Tabelul 4.

#### 5.1.2 Calculul suprafeței proiecției coroanelor

Pentru a compensa limitările unei abordări bottom-up, s-a dezvoltat o nouă metodologie caracterizată de inversarea norului de puncte, cu menținerea simultană a cotelor pozitive prin simpla translație pe direcție verticală (Figura 7).

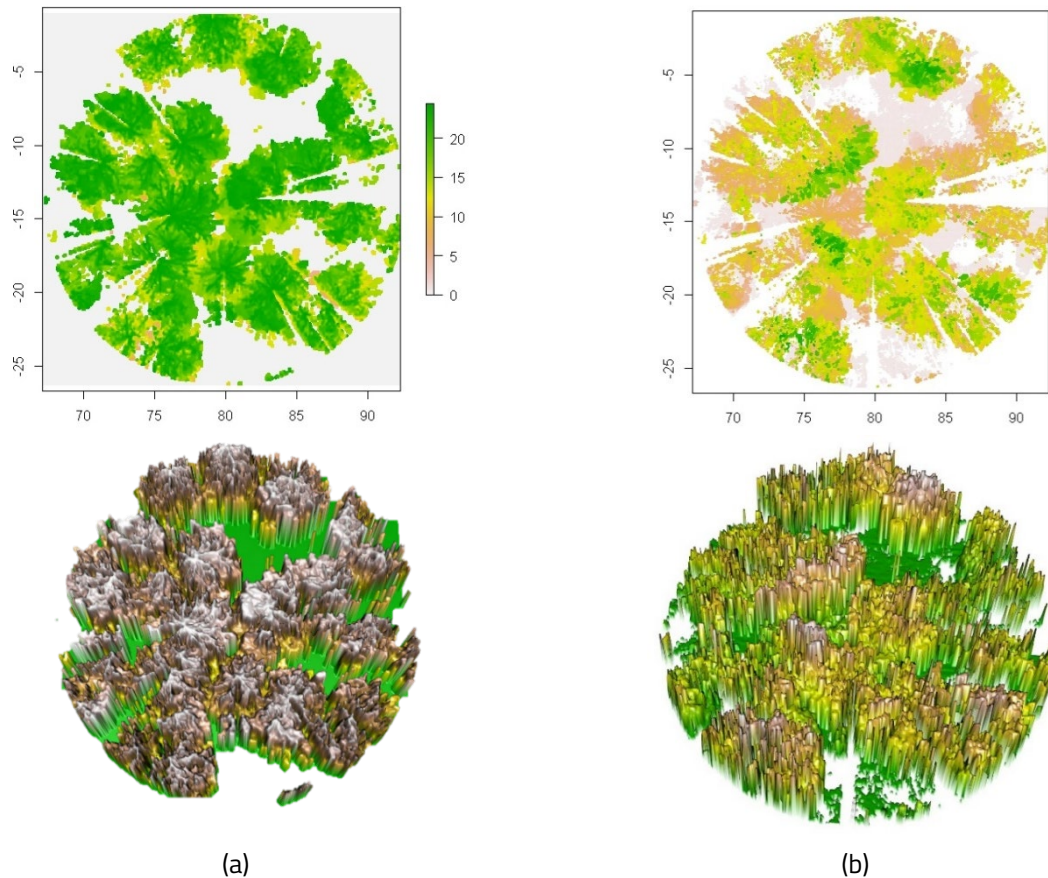


Figura 7. Modelul digital al suprafeței (DSM) bottom-up (a) și top-down (b)

Modelul coronamentului a fost utilizat ca și model al terenului și în urma unei generalizări a rezoluției spațiale a acestuia, au fost calculate limitele suprafețelor de drenaj cu sursa în poziția fiecărui arbore.

### 5.1.3 Extragerea diametrului de bază (DbH)

Pentru trecerea de la analiza cantitativă (% arbori identificați) la calitatea extragerii au fost utilizate ca referințe valorile reale (i.e. măsurători *in situ*) ale diametrelor și înălțimilor.

Tabel 5. Tendințele estimării diametrelor

Tip scanare	Plot	Tendințe	Observatii
Multiple	SGT	Constant	-
	SGM	Constant	-
Singulare	SGT	Subestimare a tuturor DbH	-
	SGM	Subestimare a DbH >30cm / supraestimare a DbH <30	-

DbH - diametru măsurat la 1,30 m

În general, scanarea unică a dus la subestimarea diametrelor mari, indiferent de specia sau vârsta arboretelor. În plus, în arboretele mature, pe lângă această subestimare a DbH, s-a mai putut observa și o supraestimare a diametrelor mici (Tabelul 6). Pe baza rezultatelor obținute exclusiv în arboretele de gorun, se poate afirma că scanările multiple, elimină tendințele de supra sau subevaluare a valorilor DbH (Tabelul 6 și Tabelul 7).

Tabel 6. Eroarea medie pătratică în cazul extragerii diametrelor arborilor

ID	$\overline{DbH_{FM}}$ [cm]	$\overline{DbH_{TLS}}$ [cm]	$\Delta_{DbH}$ [cm]	$RMSE_{DbH}$ [cm]
SGM 1 M	25.56	26.01	0.44	1.28
SGM 2 M	19.42	19.86	0.45	1.77
SGM 3 M	20	20.08	0.08	0.78
SGM 1 S	26.5	26.9	0.4	4.31
SGM 2 S	21.56	19.39	2.16	4.48
SGM 3 S	21.96	22.11	0.14	3.58
SGT 1 M	11.12	11.28	0.16	0.66
SGT 2 M	10.45	10.52	0.07	0.51
SGT 3 M	11.6	11.68	0.08	0.51
SGT 1 S	11.48	10.67	0.81	1.4
SGT 2 S	11.02	10.43	0.59	1.52
SGT 3 S	12.28	11.11	1.17	1.78

Erorile medii pătratice asociate extragerii diametrelor de bază, în cadrul suprafețelor de probă similare ca și mărime (rază de 10-20m) și densitate (400-1000 arbori/ha) evidențiate prin alte cercetări ating valoarea de 1.8-3.3cm [100-102], similar intervalului descris în Tabelul 6.

Chiar și în aceste condiții, valorile diametrelor sunt puternic corelate cu măsurătorile din teren (Figura 11), în majoritatea analizelor coeficientul de corelație Pearson ( $r$ ) atingând valori de 0,90 cu un interval de încredere de 95%. Această relație este susținută și de valorile coeficienților de determinare,  $R^2$  atingând de asemenea pragul de 0,90 (Tabelul 9).

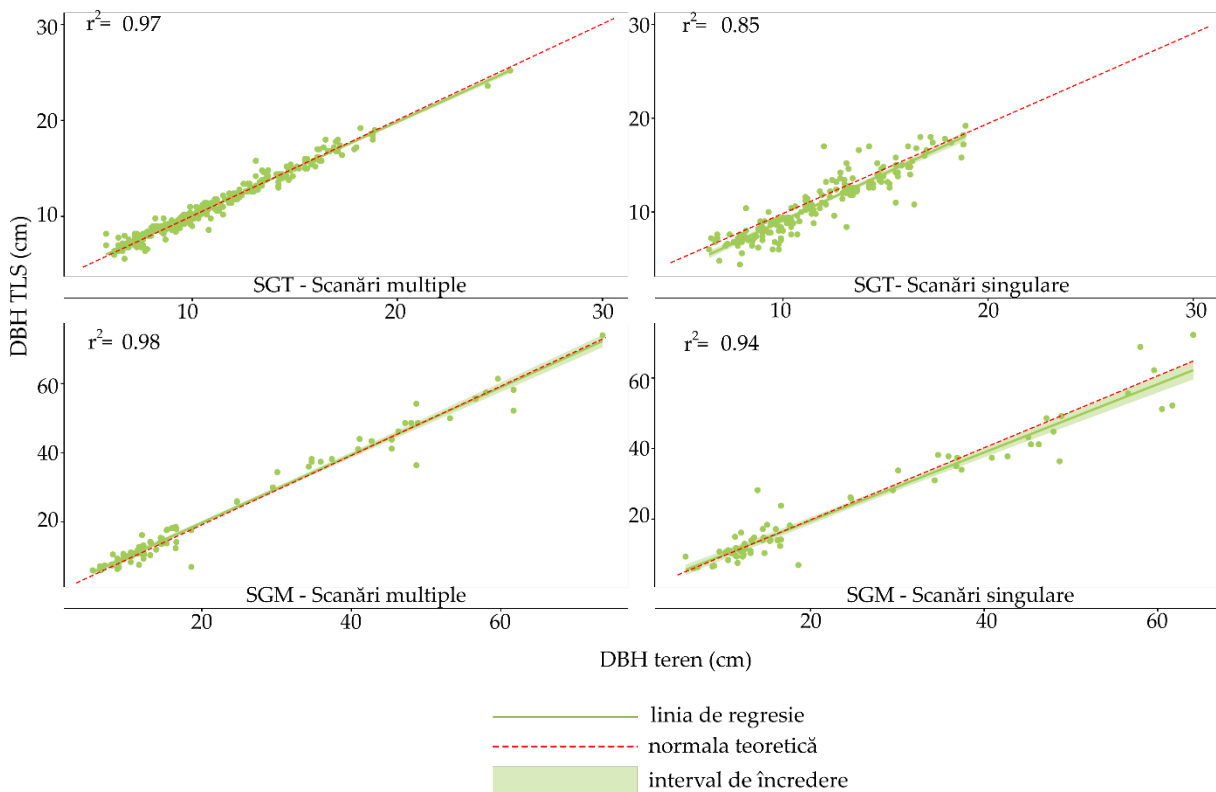


Figura 11. Comparație între valorile DBH experimentale și cele teoretice ( $DBH_{FM} = DBH_{TLS}$ )

Tabel 7. Coeficienții de corelație și determinație în cazul extragerii diametrelor arborilor

ID	$r_{DBH}$	$D_{DBH}$	$R^2_{DBH}$
SGM 1 M	0,99	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,99
SGM 2 M	0,98	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,99
SGM 3 M	0,99	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,99
SGM 1 S	0,96	$1.10 \cdot 10^{-14}$	0,93
SGM 2 S	0,82	$6.90 \cdot 10^{-07}$	0,94
SGM 3 S	0,41	$6.30 \cdot 10^{-02}$	0,12
SGT 1 M	0,97	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,96
SGT 2 M	0,98	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,97
SGT 3 M	0,99	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,98
SGT 1 S	0,91	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,88
SGT 2 S	0,92	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,79
SGT 3 S	0,92	$2.20 \cdot 10^{-16}$	0,86

### 5.1.3 Extragerea înălțimii arborelui (H)

În ciuda rezultatelor, în general apropiate de toleranțele specifice domeniului, o diferență evidentă există între coeficientul de determinație  $R^2$  calculat pe baza datelor provenite din scanări multiple și cele provenite din scanări singulare în raport cu datele de referință (Figura 12).

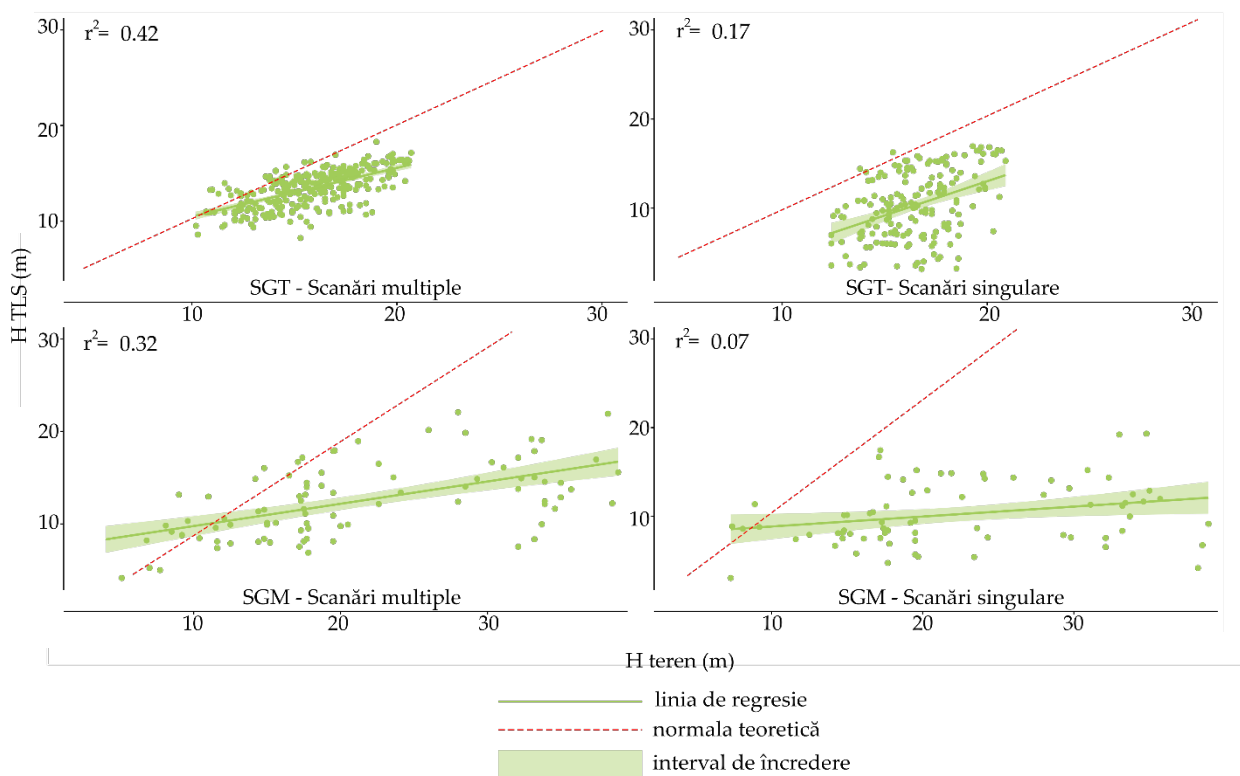


Figura 12. Comparație între valorile H experimentale și cele teoretice ( $H_{FM} = H_{TLS}$ )

Schimbarea metodei de achiziție de la scanări singulare la scanări multiple nu a adus îmbunătățiri majore ( $R^2 = 0,31$  pentru scanări singulare,  $R^2 = 0,41$  pentru scanări multiple) (Tabelul 8 și Tabelul 9).

Tabel 8. Eroarea medie pătratică în cazul extragerii înălţimilor arborilor

ID	$\overline{H_{FM}}$ [m]	$\overline{H_{TLS}}$ [m]	$\Delta_H$ [m]	$RMSE_H$ [m]
SGM 1 M	22.36	14.86	7.5	11.52
SGM 2 M	19.51	12.05	7.45	9.63
SGM 3 M	20.39	13.79	6.6	8.46
SGM 1 S	24.24	9.95	14.29	17.07
SGM 2 S	21.41	9.93	11.48	13.67
SGM 3 S	20.96	10.8	10.07	12.09
SGT 1 M	15.21	13	2.2	2.81
SGT 2 M	15.43	12.97	2.46	3.21
SGT 3 M	16.9	14.43	2.48	3
SGT 1 S	15.63	9.82	5.81	6.76
SGT 2 S	16.11	10.78	5.33	5.97
SGT 3 S	17.62	10.48	7.14	8

Înălţimea evaluată pe baza scanărilor singulare, potrivit unor rezultate în domeniu, a atins valori afectate de erori de până la  $\pm 6.5m$  [101]. Deşi rezultatele sunt superioare celor obţinute în prezenta lucrare (Tabelul 8), este de menţionat faptul că arboretele în cadrul cărora s-au efectuat determinările amintite au fost caracterizate de o desime a arborilor mai scăzută şi o înregistrare exclusiv multi-scan.

S-a examinat şi influenţa distanţei arborilor faţă de scanner asupra estimării H. Ipoteza existenţei unei asemenea influenţe s-a bazat pe ideea că odată cu apropierea distanţei arbore-scaner de valoarea înălţimii fusului, va creşte şi precizia de extragere a valorii înălţimii - H [21].

Tabel 9. Coeficienţii de corelaţie şi determinaţie în cazul extragerii înălţimilor arborilor

ID	$r_H$	$p_H$	$R^2_H$
SGM 1 M	0.57	$8.00 \cdot 10^{-04}$	0.34
SGM 2 M	0.76	$1.50 \cdot 10^{-07}$	0.59
SGM 3 M	0.68	$2.30 \cdot 10^{-05}$	0.47
SGM 1 S	0.17	$4.00 \cdot 10^{-01}$	0.10
SGM 2 S	0.48	$1.60 \cdot 10^{-02}$	0.17
SGM 3 S	0.38	$9.20 \cdot 10^{-02}$	0.18
SGT 1 M	0.49	$4.20 \cdot 10^{-08}$	0.26
SGT 2 M	0.54	$1.40 \cdot 10^{-08}$	0.29
SGT 3 M	0.72	$7.50 \cdot 10^{-16}$	0.55
SGT 1 S	0.28	$2.70 \cdot 10^{-02}$	0.10
SGT 2 S	0.42	$3.00 \cdot 10^{-03}$	0.20
SGT 3 S	0.52	$9.40 \cdot 10^{-06}$	0.27

Pentru a testa această ipoteză, suprafaţa de probă cu raza de 15 m, a fost împărţită în două secţiuni de rază diferită, prin aplicarea de filtre spaţiale. Rezultatele nu au arătat o creştere apreciabilă a intensităţii de corelaţie în cazul înălţimilor odată cu creşterea distanţei faţă de scanner ( $r = 0,52$  pentru întreaga suprafaţă de probă vs.  $r = 0,62$  pentru subeşantionul cu raza  $< 7m$  şi  $r = 0,59$  pentru subeşantionul cu raza  $> 7m$ ).

Prin compararea rezultatelor estimării înălţimii prin cele două metode de achiziţie (i.e., H maxim nor de puncte segmentat şi H nor de puncte nesegmentat), se poate evalua calitatea segmentării şi

reconstrucţiei arborilor. Arboretele mature sunt caracterizate de un nor rezidual mai mare, în timp ce reconstrucţia bazată pe arborete tinere are ca rezultat nori reziduali de o densitate scăzută (reprezentat în Figura 13 sub forma regiunii cuprinse între DSM şi norul de puncte, respectiv cel segmentat).

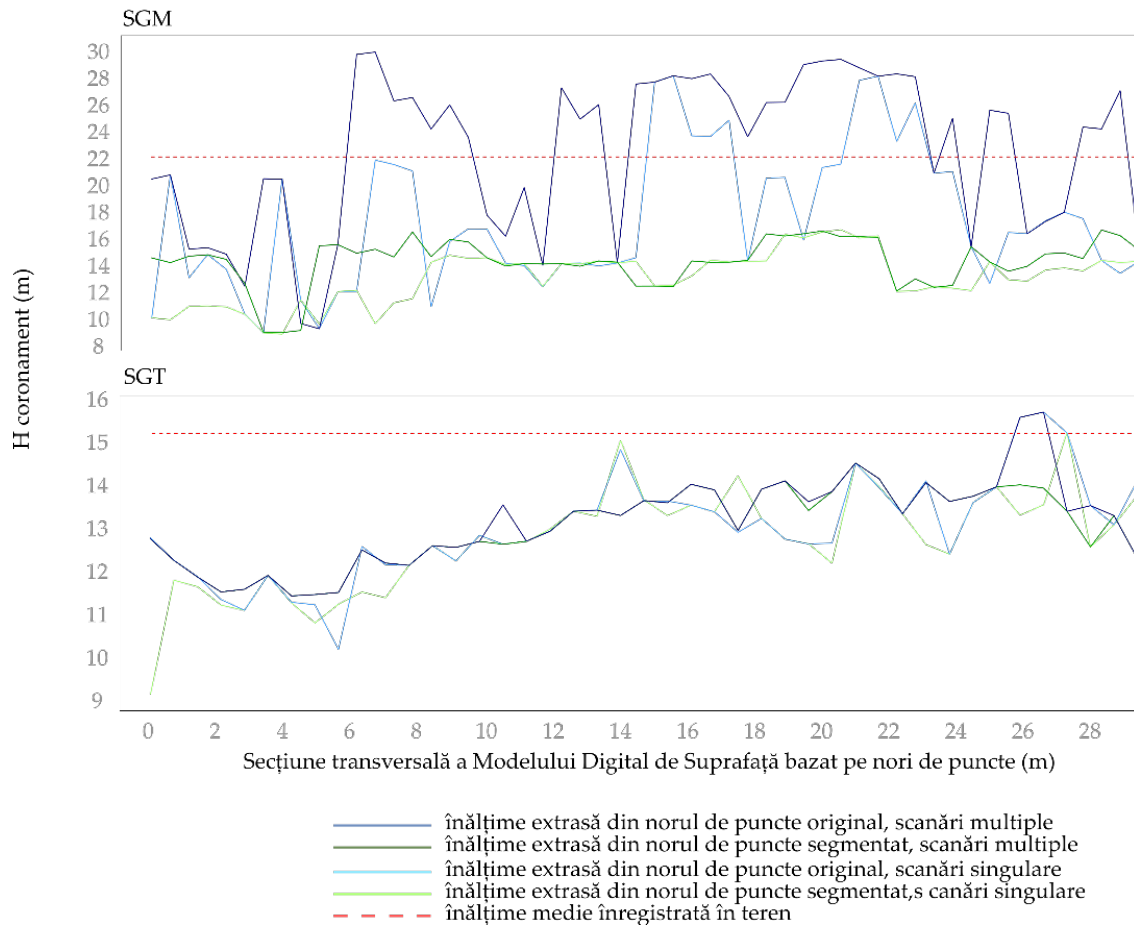


Figura 13. Diferențe între înălțimile extrase din scanări singulare și multiple, înainte și după etapa de segmentare (reprezentate ca și secțiuni prin DSM), în relație cu valoarea medie a H din teren

După cum se poate observa din Tabelul 10, indiferent de structura arboretului, înălțimile sunt subestimate (diferența medie pentru arboretele mature atinge 37% (intervalul de variație față de medie de  $\pm 25\%$ ), iar pentru arboretele tinere 14% (intervalul de variație față de medie de  $\pm 19\%$ ) față de valoarea medie reală a înălțimii arboretului) în arboretele de gorun.

Tabel 10. Statistici descriptive privind valorile H înainte și după etapa de segmentare, în relație cu valorile medii înregistrate în teren

		Val. Maximă [m]	Val. Minimă [m]	Val. Medie [m]	Ab. Std.	$\Delta$ Maxim [m]	$\Delta$ Minim [m]	$\Delta$ Mediu [m]
SGT 1	segmentat	17.6	8.6	13.3	1.3	2.7	1.7	1.9
	original	17.6	10.1	13.6	1.3	2.7	0.2	1.6
	teren	20.3	10.3	15.2	1.8			
SGM 1	segmentat	20.6	8.3	15.3	2.2	18.2	-1.5	7.1
	original	32.3	8.4	23.0	5.9	6.6	-1.6	-0.6
	teren	38.9	6.8	22.4	10.4			

segmentat - nori de puncte segmentați, original - nori de puncte nesegmentați, teren - valori din inventarierea clasică,  $\Delta_{Medie}$ ,  $\Delta_{Min}$ ,  $\Delta_{Max}$  - diferențe comparativ cu datele din inventarierea clasică, ab.stand. - abatere standard

Ambele tehnici aplicate (segmentarea și înălțimea maximă individuală) conduc la rezultate nesatisfăcătoare, dovedind faptul că TLS, în sezonul de vegetație, nu reprezintă senzorul optim pentru extragerea valorilor înălțimilor, datorită incapacității sale de a penetra întregul coronament (Figura 14).

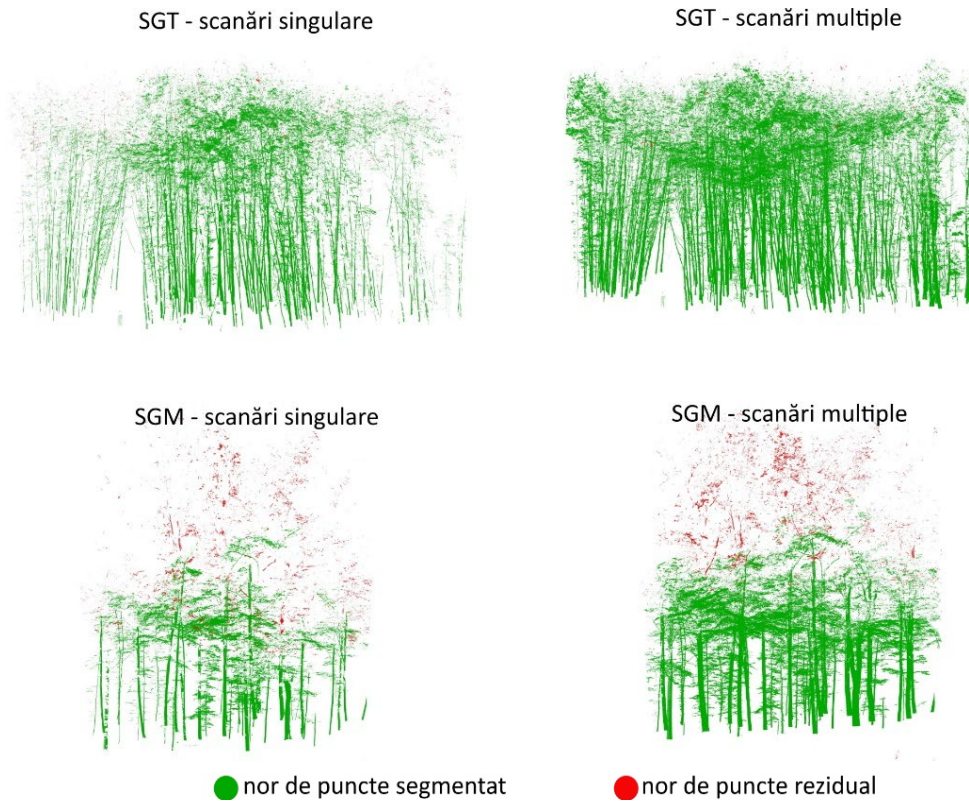


Figura 14. Distribuția norilor de puncte segmentați, utilizați pentru extragerea parametrilor biometrici (DbH, H) și norul de puncte rezidual



## 5.2 Indici structurali

### 5.2.1 Aspecte particulare procesului de calculare a indicilor structurali

#### i. Cuantificarea triangulaţiei tip Delaunay ( $I_{ESP}$ )

Prealabil aplicării Relaţiei (4), în vederea cuantificării triangulaţiei de tip Delaunay sub forma unei singure valori, baza fiecărui tetraedru precum și triunghiurile obtuzunghice periferice, au fost eliminate. Motivul a fost modul artificial de stabilire în etapa de teren a limitelor suprafeţelor de probă, neechivalente cu cele ale arboretului, arborii periferici neaflându-se pe ceea ce putea fi considerată o limită naturală (Figura 15).

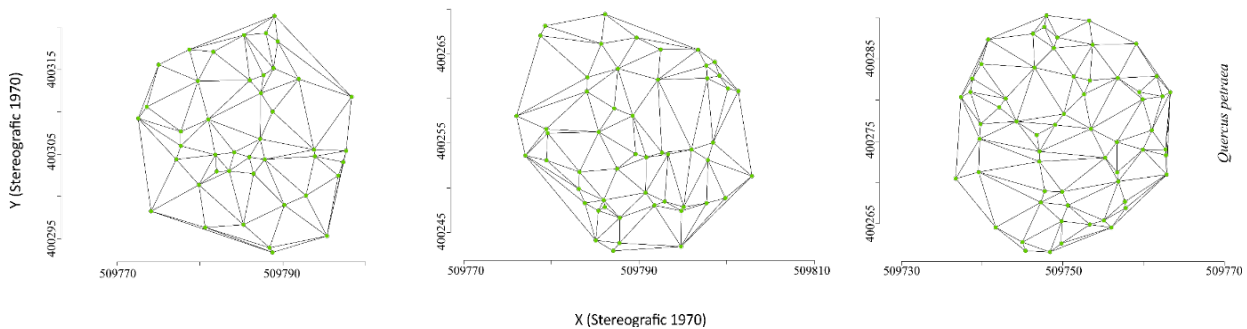


Figura 15. Distanţa dintre arbori caracteristică SP-urilor martor SFM (sus), SGM (mijloc), SMM (jos)

#### ii. Evaluarea dimensiunii optime a voxelilor ( $I_{cc}$ )

S-a putut concluziona faptul că dimensiunea optimă este cea de 15 cm, dincolo de aceasta variațiile gradului de închidere bazat pe dimensiunea voxelului scăzând în intensitate (Figura 16). Depășirea acestei valori nu a echivalat cu creșterea preciziei de reprezentare a coronamentului. Drept urmare, această dimensiune a fost considerată limita supraestimării gradului de închidere datorită pierderii de informație privind porozitatea coronamentului.

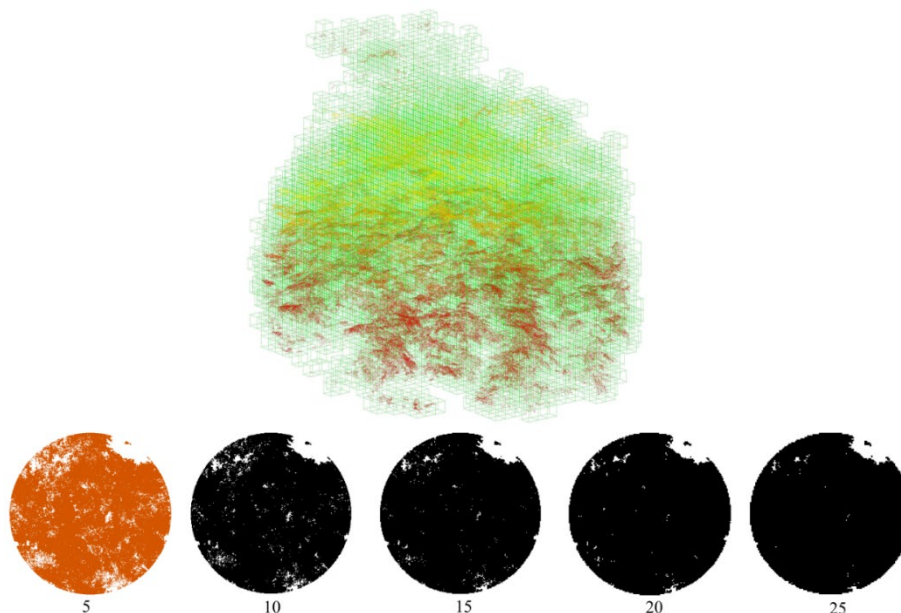


Figura 16. Gradul de închidere calculat prin metoda rasterizării

iii. Simularea fotografiei emisferice folosind intensitatea de reflectanță ( $I_{cc}$ )

Variațiile în pragul de delimitare a golurilor normalizate iterativ prin utilizarea unei ferestre de 3 x 3 pixeli [104,105] au permis diferențierea între golurile inter-coroane (goluri mari) și intra-coroane (goluri mici) (Figura 18).

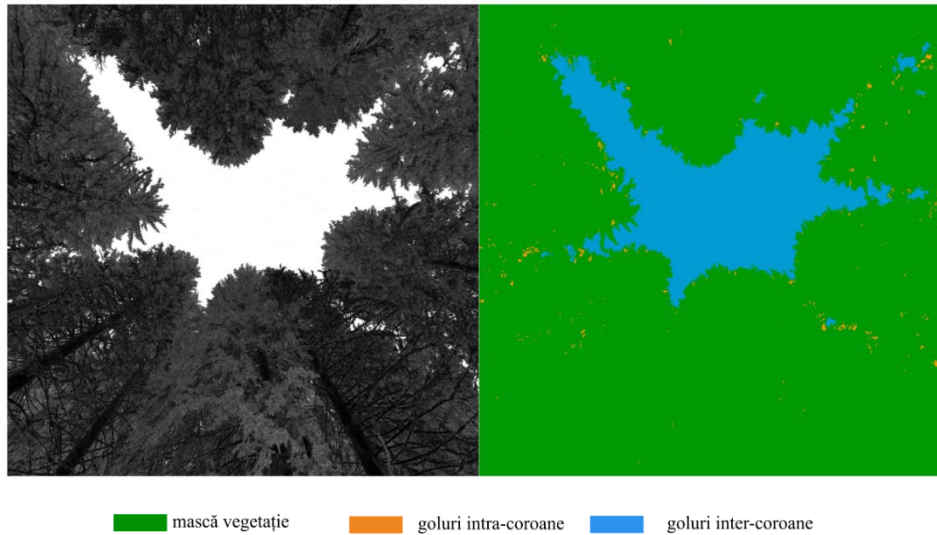


Figura 18. Goluri inter și intra-coroane în calculul gradului de închidere folosind metodologia DCP

iv. Evaluarea intervalului de variație al orientării frunzelor ( $I_{LAI}$ )

Pentru estimarea intervalului de variație al orientării frunzelor, a fost luată în considerare specia dominantă a arboretelor studiate [106]. În cazul gorunului (*Quercus petraea*) tendința este de a afișa grade de înclinare a frunzelor mai accentuate decât la fag (*Fagus sylvatica*) [107] (Figura 19).

Pentru a valida rezultatele, pe lângă date extrase din literatura de specialitate, s-a procedat și la recoltarea de probe foliare la șase date diferite (Tabelul 11).

Tabel 11. Dimensiunile medii ale aparatului foliar

Eșantion	Suprafață Foliară [cm <sup>2</sup> ]	Ab. Std.	Lungime [cm]	Ab. Std.	Lățime [cm]	Ab. Std.
Gorun						
1	21,90	11,87	8,10	2,47	4,60	1,43
2	23,50	14,76	8,30	2,93	4,70	1,74
3	23,10	14,75	8,20	2,67	4,70	1,69
4	20,60	13,49	7,60	2,76	4,50	1,63
5	21,50	12,79	7,90	2,38	4,40	1,43
6	22,60	13,93	7,90	2,62	4,70	1,62
Medie	22,20		8,00		4,60	

Rezultatele separate în clase de 15°, au stat la baza analizei distribuției medii per clasă pentru fiecare specie (Tabelul 12).

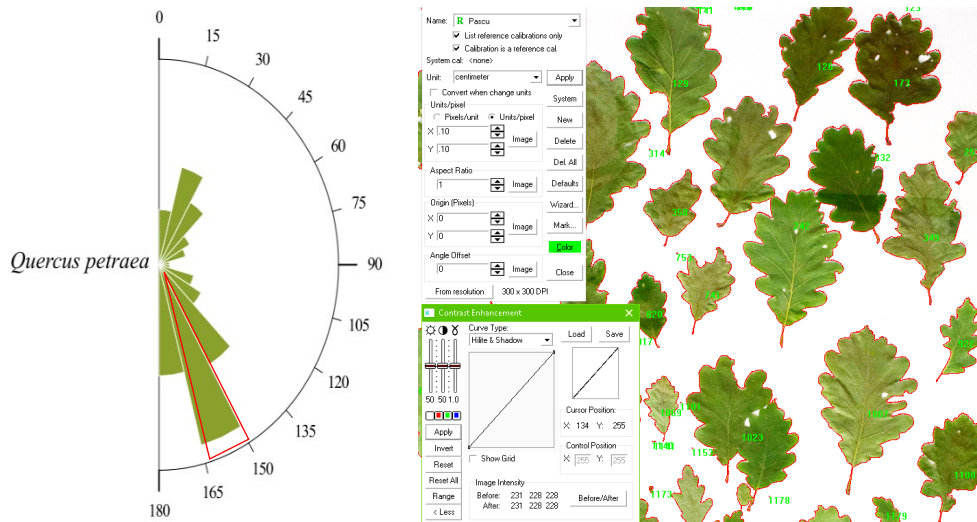


Figura 19. Orientarea frunzelor per specie

Tabel 12. Valorile coeficienţilor de extincţie per specie [6].

Specie studiată	Unghi orientare frunze ( $\theta$ [°])	Coeficient corectie (k)
<i>Quercus petraea</i>	162 ( $\pm 0,5$ )	0,95 ( $\pm 0,3$ )

$k$  - coeficient de corecţie corespunzător extincţiei radiaţiei solare bazat pe Relaţia lui Fuch;  $\theta$  - orientarea medie a frunzelor

#### v. Interpolarea impulsurilor nereturnate ( $I_{LA1}$ )

Pentru impulsurile care au înregistrat în carnetul digital de teren valori nule aferente coordonatelor X, Y și Z simultan (rază nulă, respectiv impulsuri nereturnate), s-au avut în vedere două abordări: fie coordonatele lor puteau fi interpolate pornind de la impulsuri (non-zero) învecinate spațial și temporal, fie puteau fi preluate de la ultimul fascicol înregistrat atât în emițător cât și în receptor. Din cauza traiectoriilor incoerente (arce ample de cerc) (Figura 20) generate prin interpolare (diferite de modul în care se deplasează emițătorul scannerului în mod real), s-a renunțat la prima metodă menționată.

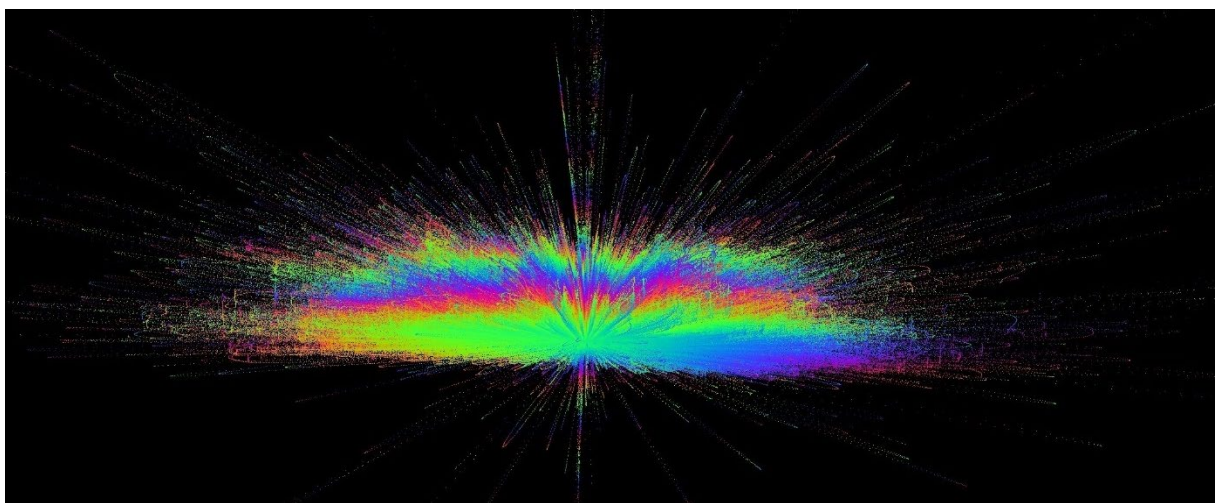


Figura 20. Interpolare impulsuri din calculul ( $I_{LA1}$ )

#### vi. Definirea regiunii optime calculului Indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )

Aşa cum a fost descris anterior, conul cu vârful în acest punct a fost limitat de aria bazei, echivalentă cu cea a suprafeţei de studiu măsurată la baza coronamentului. În continuarea acestuia, un cilindru cu aceeaşi rază a fost folosit pentru a delimita restul coronamentului. Impulsurile laser au fost contorzitate numai în interiorul acestei limite 3D (con şi cilindru -0-). Această limită a fost aleasă pentru a reduce influenţa elementelor lemnoase prin eliminarea trunchiurilor care nu intersectează conul -1-. Cilindrul a fost folosit ca substitut pentru extinderea conului din două motive. Utilizarea unei limbe conice cu baza măsurată la limita superioară a coronamentului, ar fi dus la eliminarea din calcul a unui segment semnificativ din coronament -2-. În situaţia opusă, definirea bazei conului la limita inferioară a coronamentului şi simpla sa extindere, ar fi condus la includerea elementelor foliare din exteriorul zonei de studiu -3- (Figura 21), influenţând de asemenea rezultatele în mod negativ.

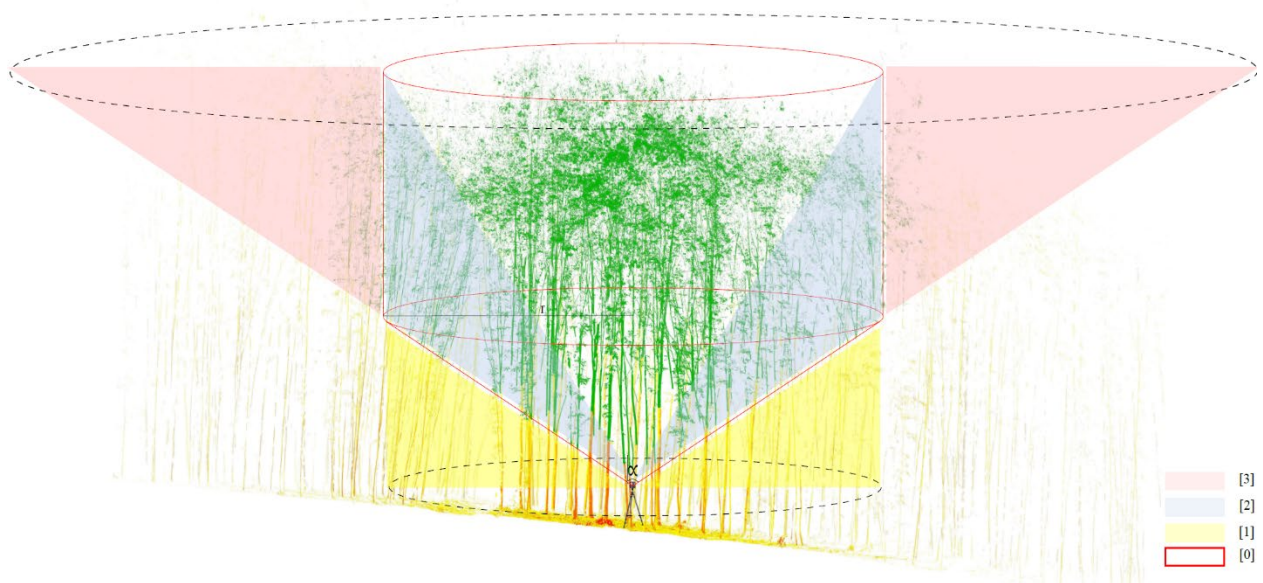


Figura 21. Stabilirea spaţiului de calcul al Indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )

#### vii. Corecţia valorilor indicelui suprafeţei foliare ( $I_{LAI}$ )

Pentru fiecare set de corelaţii LiCor - DCP a fost calculat coeficientul de corelaţie CCC (Concordance Correlation Coefficient) [108]. Valorile erorii medii pătratice au atins un maxim de 0,18 iar coeficientului CCC 0,96.

Odată stabilită similaritatea  $LAI_{LiCor}$  cu  $LAI_{TLS}$  și  $LAI_{DCP}$  cu  $LAI_{LiCor}$  au fost analizate abaterile valorilor TLS de la trendul de referinţă (DCP), utilizând o regresie tip Deming [109] (Figura 22).

În cazul datelor eterogene, precum cele de utilizate, este o practică obișnuită să se pondereze Relația de regresie, pentru a evidenția eventualele inconsistențe în precizia celor două metode. Astfel, o pondere de  $1/x^2$  a fost aplicată asupra valorilor  $LAI_{TLS}$  [110].

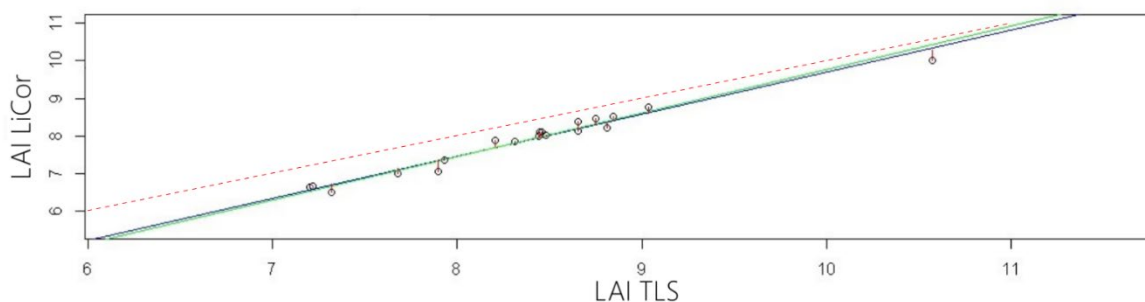


Figura 22. Analiză comparativă regresii Deming (—) Deming ponderat (—), (---) Normala

O ultimă etapă utilă în identificarea cât mai precisă a relației dintre cele două seturi de date LAI în vederea extragerii unei Relații de corecție pentru TLS, este aplicarea unei regresii nonliniare. În acest sens s-au utilizat două modele (Figura 24). Primul bazat pe o ecuație exponențială simplă cu impunerea valorilor de start și al doilea sub forma unui model logistic (Ecuația 22). Aceasta de pe urmă este însă puternic sensibilă la valorile inițiale. Pentru a evita posibile erori cauzate de acest aspect, a fost folosit un model logistic cu funcție de auto-start (Self-Starting Logistic Model), capabil să estimeze valorile inițiale pentru parametrii de intrare [111].

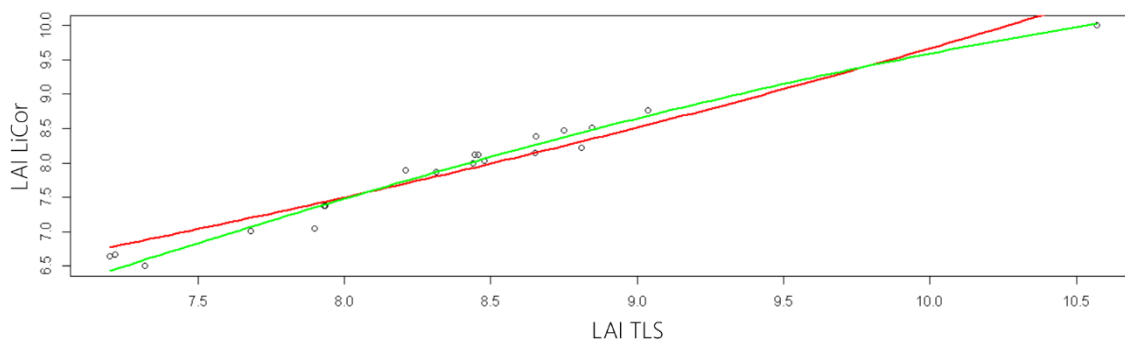


Figura 24. Regresii nonliniare. model 1 (—), model 2 (—)

În urma evaluării celor două Relații testate (Tabelul 13), testul ANOVA a fost folosit pentru eliminarea unuia dintre modelele de regresii folosite.

Tabel 13. Modelul 2 de regresie nonliniară

$$Y \sim \frac{a}{\exp\left(\frac{b-x}{c}\right) + 1} \quad (22)$$

	Valori estimate	Eroarea standard
a	11,79057	0,300
b	6,80330	0,089
c	2,1291	0,131

a –asimptota ecuației, b – punctul de inflexțiune al ecuației, c – factor de scară

Rezultatele testului ANOVA au ilustrat un un grad ridicat de semnificție statistică în cazul modelului mai complex ( $p < 2,2e^{-16}$ ), validând cea de a doua ecuație (Ecuația 22) și îmbunătățirile pe care aceasta le aduce.

## 5.2.2 Analiza corelativă a indicilor structurali

Analiza corelațiilor între indicii structurali a condus la obținerea unui set de descriptori ce permit caracterizarea arboretului într-o manieră optimă. Analiza s-a axat pe intervalidarea rezultatelor obținute prin metode diferite, evidențiindu-se astfel erorile fiecărei surse de date și implicit dezavantajele diferitelor metodologii. Semnificativă în acest sens este matricea corespunzătoare corelațiilor și distribuției valorilor obținute (Figura 25).

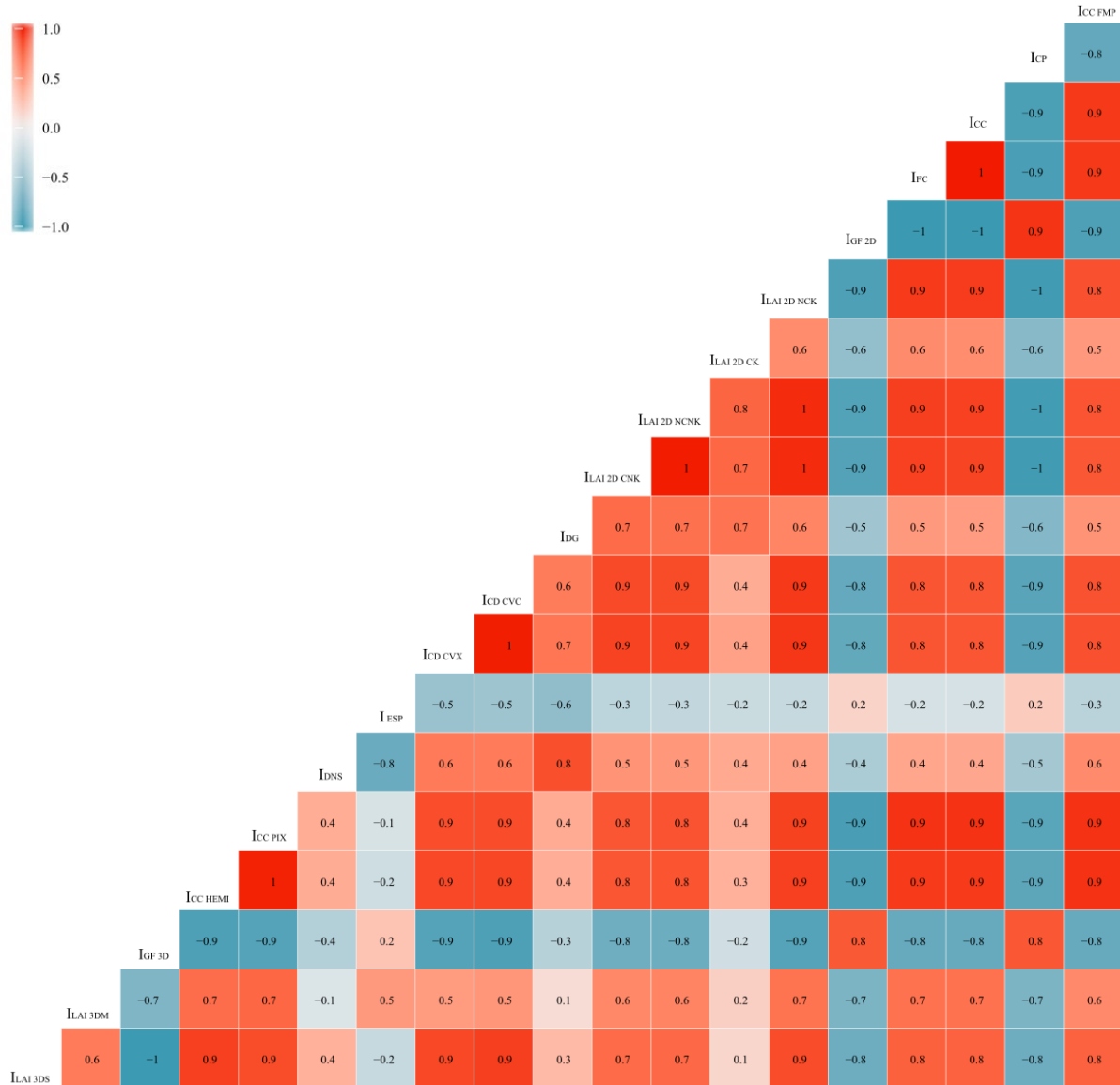


Figura 25. Diagrama corelațiilor

Pentru a facilita interpretarea rezultatelor, indicii au fost clasificați, în funcție de sursa datelor, în trei categorii. Prima face referire la acele valori obținute din procesarea datelor TLS, care nu au necesitat segmentarea sau clasificarea în scopul identificării individuale a arborilor. Cea de a doua categorie include indicii ce au necesitat cunoașterea numărului de arbori din suprafața de probă permanentă și caracteristicile individuale ale acestora. Ultima categorie a fost dedicată înregistrărilor optice și a cuprins valorile obținute prin intermediul fotografiilor digitale ale coronamentului.

Corelații puternice ( $r > 0.8$ ) de sens pozitiv s-au înregistrat între gradul de închidere al coronamentului, stabilit prin amenajamentul silvic și indicii de acoperire calculați atât în limitele proiecției concave cât și celei convexe, dar și cu valorile obținute din imaginile emisferice.

Tot puternică ( $r = 0.8$ ) este și legătura dintre LAI din scanări singulare și gradul de închidere estimat în amenajamentul silvic  $I_{CC\_FMP}$  (valoare de referință) cu toate că valorile  $I_{LAI}$  sunt subevaluate în scanările TLS singulare.  $I_{LAI}$  calculat prin intermediul scanărilor multiple se corelează cu cel din scanări singulare ( $r = 0.6$ ), deși era de așteptat o corelație foarte puternică, cei doi indici descriind teoretic același aspect.

$I_{LAI\ 3DS}$  înregistrează valori ale coeficientului de corelație mult mai bune comparativ cu  $I_{LAI\ 3DM}$  în relațiile cu alți indici. Astfel, deși metodologia de calcul este aceeași, relația cu celelalte variabile prezintă diferențe notabile. Ca atare se poate afirma că scanările multiple nu aduc o îmbunătățire a rezultatelor, cel puțin în calculul acestui indicator. Chiar mai mult, prin supraeșantionarea scenei, nu mai poate reprezenta corect arboretul din punct de vedere al acestui indice.

Gradul de închidere al coronamentului obținut din înregistrări optice se corelează puternic cu toți indicii 2D, indiferent dacă au la bază fotografiile digitale sau nori de puncte reduși în plan orizontal. Apariția unor diferențe în această relație, ar fi indicat faptul că cel puțin una dintre metodele utilizate nu indică în mod corect structura arboretului. Un alt exemplu similar este cel al indicilor bazați pe raportul non-vegetație/vegetație obținuți din surse de date 2D și 3D ( $I_{GF3D}$ ,  $I_{GF2D}$ ). Astfel se demonstrează faptul că sursa datelor nu ar trebui să afecteze corelațiile și că indiferent de metoda utilizată în calculul unui indice, este de așteptat ca acesta să înregistreze scena într-o manieră similară.

De menționat este faptul că  $I_{LAI\ 3D}$  bazat pe scanări singulare, înregistrează în majoritatea cazurilor o legătură puternică cu indicii din celălalte două clase ( $r_{mediu} = 0.8$  atingând adeseori pragul de 0,9), în timp ce  $I_{LAI\ 3D}$  bazat pe scanări multiple atinge o valoare maximă a coeficientului de corelație de 0,7 și o medie în jurul valorii de 0,6.

În cadrul legăturii dintre  $I_{LAI3DS}$  și  $I_{LAI2D}$  nu sunt observate variații neobișnuite atunci când sunt aplicați factori de corecție pentru agregarea frunzelor, respectiv LAI  $_{2DCNK}$ . În cazul aplicării factorului de corecție corespunzător extincției radiației solare  $k$ , corelația devine mai puternică numai dacă această corecție nu este cumulată cu cea pentru agregarea frunzelor. Astfel, este de preferat să se analizeze în locul efectului cumulativ al celor două tipuri de corecții, efectele lor individuale. Aplicarea coeficientului  $k$  conduce la creșterea intensității corelației ( $r = 0.9$  pentru valori necorectate cu coeficientul  $c$  și  $r = 0.1$  pentru valori asupra cărora a fost aplicat coeficientul  $c$ ) (Tabel 5).

De remarcat este relația dintre gradul de închidere a coronamentului stabilit prin amenajamentul silvic cu cel stabilit prin metoda LAI ( $I_{LAI\ 2DCK}$ ) care este cu mult sub valorile corelației înregistrate de ceilalți indici obținuți prin DCP ( $r = 0.5$ ). Aceeași intensitate slabă ( $r_{mediu} = 0.3$ ) înregistrează  $I_{LAI\ 2DCK}$  în relația cu restul indicilor studiați. O explicație pentru aceasta tendință poate fi stabilită analizând intervalul de încredere al dreptei de regresie "LOESS". Erori mai mari ale intervalului de încredere se manifestă în cazul datelor cu o asimetrie semnificativă (în raport cu speciile studiate). Urmărind analiza  $I_{LAI3D}$ , se poate evidenția un rezultat contrar așteptărilor. Relația dintre  $I_{LAI3D}$  provenit din scanări multiple și indicele de acoperire, este slabă ( $r = 0.5$ ), cu o valoare a probabilității ( $\rho$ ) depășind pragul de 0,1, validând diferențele semnificative dintre valori.

Având în vedere rezultatele specifice raportului non-vegetație/vegetație obținut pe baza datelor bi-sau tridimensionale, se poate afirma faptul ca utilizarea raportului în procesarea norilor de puncte înregistrează anumite limitări, în timp ce indicii corespunzători raportului non-vegetație/vegetație se corelează puternic indiferent de sursa de date în baza cărora sunt calculați, legătura corelativă a  $I_{LAI}$  calculat pornind de la raportul lor, prin diferite metode, este nesemnificativă. Pornind de la această afirmație și bazat pe valorile reduse ale  $I_{LAI\ 3D}$  (subunitare) se poate afirma că această metodă nu este potrivită aplicării în procesarea de scanări laser terestre în ecosistemele forestiere caracterizate de o structură complexă. Motivul principal este incapacitatea fasciculelor laser cu o singură lungime de undă de a penetra un coronament dens caracterizat de coroane ale arborilor situați în mai multe clase Kraft sau în mai multe etaje ale coronamentului.

Se poate concluziona astfel că analiza prin segmentare poate fi implementată doar în cazul în care se dorește obținerea de informații referitoare la distribuția arborilor ( $I_{DNS}$ ,  $I_{ESP}$ ,  $I_{DG}$ ).

Analizând în continuare variabilele determinate prin intermediul segmentării, corelațiile puternice pozitive dintre  $I_{DNS}$  și  $I_{DG}$  și puternic negative între  $I_{DNS}$  și  $I_{ESP}$ , împreună cu variațiile în numărul de arbori identificați (Tabelul 9) și precizia de estimare a DbH (Tabelele 11, 12) susțin corectitudinea analizelor efectuate.

### 5.2.3 Analiza multitemporală a indicilor structurali robuști

Folosind al doilea model (Relația 22), valorile  $LAI_{TLS}$  au fost corectate pentru a putea realiza analiza multitemporală prezentată în continuare.

Sunt multiple motive pentru care o analiză multitemporală a fost considerată necesară. Printre acestea, cele mai importante sunt *prognoza și estimarea, analiza exploratorie, clasificarea și segmentarea trendului temporal*.

Astfel, s-a realizat o decompoziție a seriei temporale corectate în trei clase principale privind *sezonalitatea, tendința și componentele neregulate* (Figura 26). Ulterior, influența sezonieră a fost eliminată și valorile rămase au fost uniformizate a doua oară pentru a identifica trendul inter-anual.

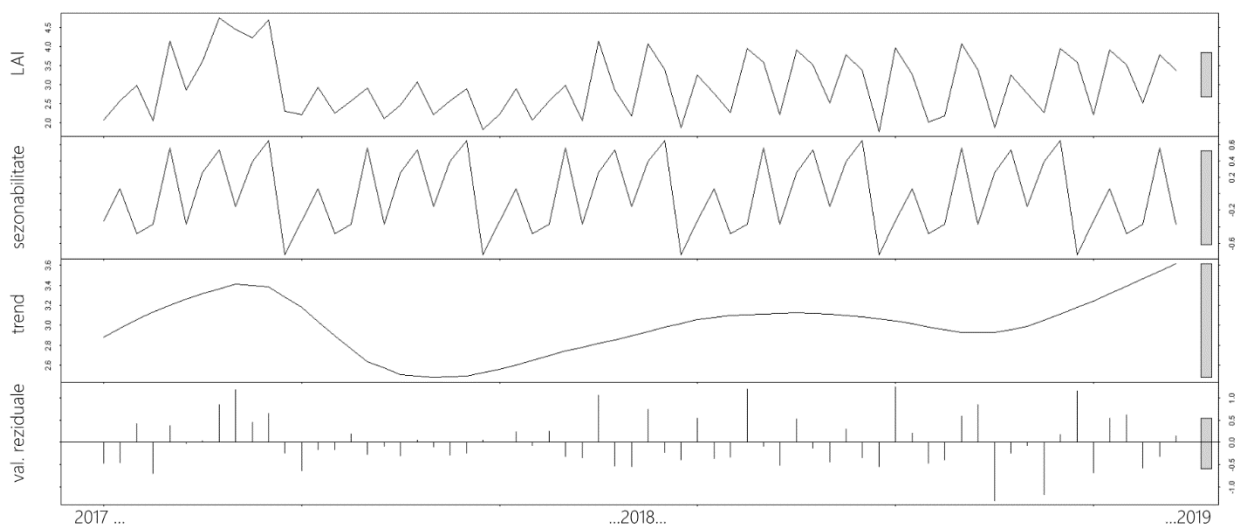


Figura 26. Decompoziția seriei temporale LAI pentru arborete de fag tinere



Autocorelația seriei temporale (ACF) (Figura 27) a ajutat la identificarea de structuri repetitive sau a semnalelor caracterizate de periodicitate. Factorul de abatere folosit a fost  $10 \cdot \log_{10}(N/m)$ , unde N este numărul de observații și m numărul de devieri aplicate (maxim N-1).

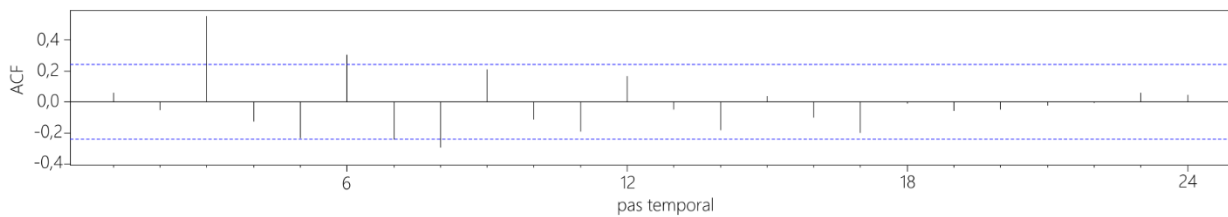


Figura 27. Autocorelația seriei temporale (ACF)

Cu excepția unui număr redus de valori, autocorelația nu evidențiază devieri dincolo de limitele intervalului de semnificație. În figura 28 se poate observa că factorul de deviere a avut un efect redus asupra seriei de date. Exceptând valorile extreme, înregistrările sunt dependente în mod constant de înregistrarea precedentă fiecăreia. Astfel, analizele ulterioare s-au concentrat pe intervalul temporal cu deviații semnificative. Pentru a asigura intervalul de încredere, o analiză PACF (Partial Autocorrelation Factor) a fost utilizată. Urmând metodologia descrisă de Chen și Liu [113], nu au fost identificați outlieri (valori ale AIC, AICc, BIC atingând 160,17 / 160,36 / 164,55). Acest control validează pentru a doua oară faptul că valoarea extremă nu este o eroare cauzată de outlieri, ci ilustrează un eveniment real în seria de date. S-a recurs în ultimă instanță la consultarea informațiilor referitoare la perioada și tipul intervențiilor silviculturale. Astfel a fost identificată o relație între valoare extremă evidențiată anterior și răriturile aplicate în aceeași perioadă, validând particularitățile metodologiei și a tehnologiei TLS de a ilustra chiar și modificări de intensitate relativ redusă.

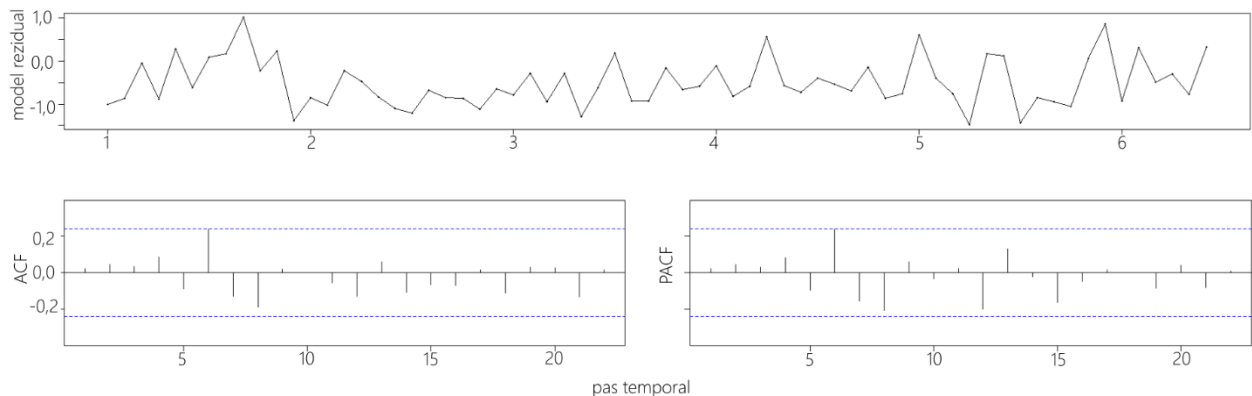


Figura 28. Modelul ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)

Reiterând setul de indicatori identificați ca fiind robuști și aplicând asupra lor o metodologie simplificată derivată din etapele descrise anterior, au fost analizate toate tipurile de arboret incluse care au făcut obiectul cercetărilor efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat.

În cazul suprafețelor parcurse cu rărituri, diferențele între suprafețele martor (lipsite de intervenții) și cele asupra cărora s-a intervenit este sesizabil, în special în analiza indicelui suprafeței foliare. Astfel, a fost analizat comparativ LAI extras prin metoda voxelizării cu referință în trei valori distincte: dimensiunea frunzelor (calculată prin planimetrare din eşantioanele culese din teren), dimensiunea minimă a distanței dintre impulsurile laser emise cât și dimensiunea medie a acesteia.

De asemenea, analiza a urmărit detalierea și la nivelul modului de calcul a înălțimii coroanelor (metoda automată descrisă în capitolul anterior și o valoare fixă măsurată în teren cu ajutorul vertexului) (figura 30). Dintre acestea, s-a identificat ca fiind optimă voxelizarea folosind dimensiunea medie a frunzelor. Diferența între metodele de identificare a înălțimii coroanelor, este resimțită și în valorile multianuale, abordarea automată având o influență negativă asupra valorilor indicatorului. Diferitele etape fenologice și implicit variația masei foliare acționează ca și o sursă de eroare în evaluarea corectă a înălțimii coroanei, modificând în mod artificial volumul coronamentului. Acest lucru reduce intervalul în care fluctuează LAI, influențând implicit și estimarea intensității intervenției.

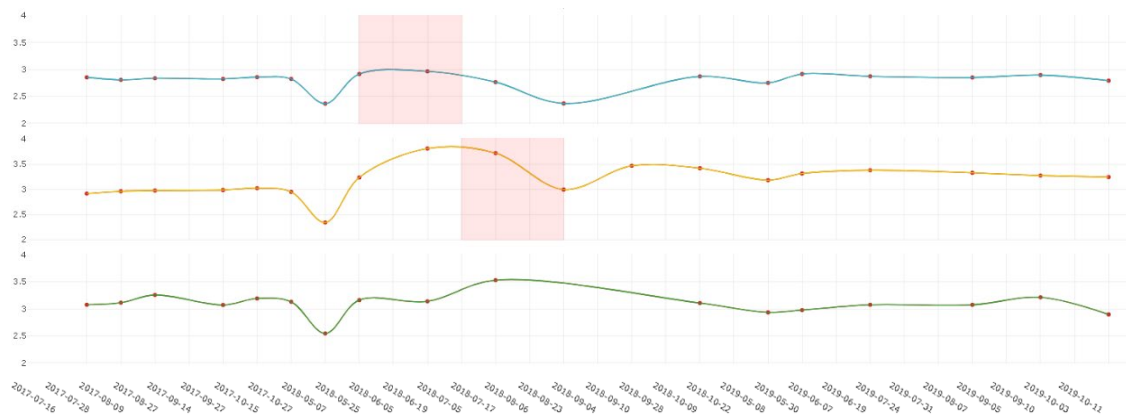


Figura 30. Analiză multitemporală Indice suprafață foliară

voxel = dimensiune frunză,  $h_{\text{coroană}}$  coroană fix

(—) Arboret tânăr 1, (—) Arboret tânăr 2, (—) Suprafața martor, ■ perioadă intervenții

Diferențele identificate în trendul LAI, sunt notabile pentru perioadele imediat ulterioare intervențiilor silviculturale. Suprafețele au suportat extrageri a aproximativ 14% din volumul de lemn pe picior, cu un efect pronunțat, vizibil încă din timpul intervenției. Efectele sunt cel mai puternic evidențiate în perioada de maxim fenologic (de maturare a frunzelor), indiferent de perioada sau durata activităților de exploatare. Aceste efecte sunt resimțite în cazul răriturilor numai în anul intervenției (2018), anul următor, efectele fiind compensate și LAI revenind la valori mai apropiate de cele existente anterior aplicării intervențiilor.

Ipoteza inițială conform căreia distanța dintre arbori și numărul de arbori la hectar ar putea fi utilizate ca și referințe în cuantificarea prin tehnici specifice teledetecției a intensității intervenției, nu este confirmată în cazul acesta. Diferențele pentru ambii indicatori (descreștere a numărului de arbori la hectar și creștere a distanței dintre aceștia) prezintă o intensitate scăzută în raport cu suprafața martor (Figura 31, a și b). Valorile rezultate fiind mai mici decât marja de eroare, nu a putu fi stabilit dacă aceste fluctuații sunt rezultatul intervenției sau un derivat al limitărilor tehnologiei TLS.

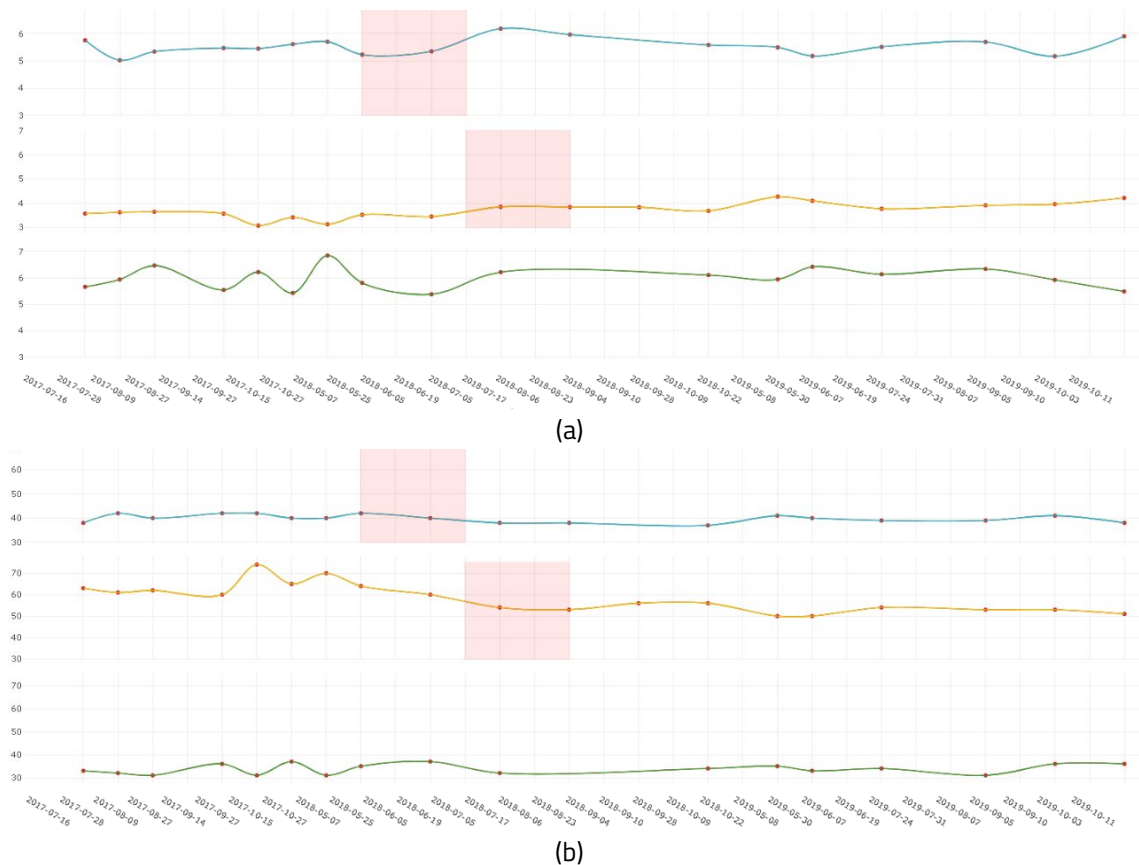


Figura 31. Analiză multitemporală distanță dintre arbori (a) și număr de arbori la hectar (b)  
 (—) Arboret tânăr 1, (—) Arboret tânăr 2, (—) Suprafața mator, ■ perioadă intervenții

În cazul suprafețelor asupra cărora s-a intervenit cu tăieri de regenerare, trendul pentru anul 2017, în arboretele de fag, este conform tendințelor naturale. Pot fi identificate perioadele fenologice și amplitudinea schimbărilor.

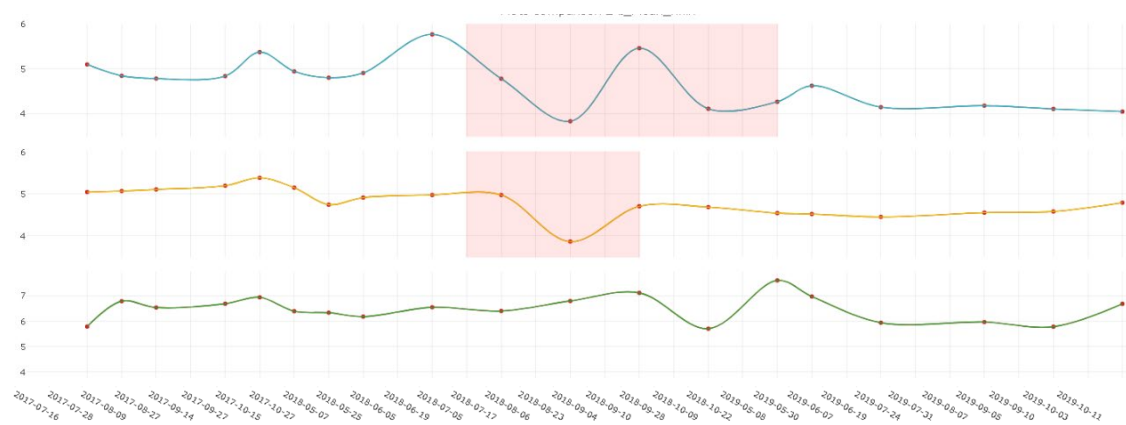


Figura 32. Analiză multitemporală Indice suprafață foliară voxel = dimensiune frunze  
 (—) Arboret matur 1, (—) Arboret matur 2, (—) Suprafața mator, ■ perioadă intervenții

Datorită intensității mai crescute a intervențiilor comparativ cu răriturile, zonele cu tăieri de regenerare ilustrează variații mai ample în valorile LAI. Acest aspect permite identificarea chiar și a tendinței de regenerare (Figura 32). Deși creșterea este observată în intervalul de timp în care s-au aplicat tăierile de regenerare, creșterea din perioada imediat următoare maximului fenologic

corespunde unei creşteri a masei foliare a arborilor rămaşi pe picior, urmată de efectele finalului sezonului de vegetaţie.

Diferenţa semnificativă evidenţiată între volumul masei foliare la finalul sezonului de vegetaţie 2017 şi începutul sezonului 2018, duce la obţinerea unei marje de eroare ridicată ( $\pm 15\%$ ) pentru indicele bazat pe număr de arbori. Acest efect se datorează utilizării unui scanner cu o singură lungime de undă, puternic sensibil la vegetaţia subarborescentă. Cuplat cu tipul intervenţiilor (rărituri), face dificilă evaluarea exclusiv prin tehnici de teledetecţiei a intensităţii lucrărilor silviiculturale.

Suprafeţele de probă instalate în arborete de amestec, prezintă o structură orizontală mai complexă decât în cazul arboretelor pure, în principal datorată coroanelor răşinoaselor neafectate semnificativ de etape fenologice. Astfel, fluctuaţiile în valorile indicilor structurali ai coronamentului, prezintă amplitudini mult mai reduse, permiţând evaluarea intensităţii intervenţiilor (Figura 35).

Fluctuaţia numărului de arbori de 11% raportat la media perioadei studiate, valoare ce depăşeşte marja de eroare de 5%, permite clasificarea intervenţiei ca fiind una moderată specifică răriturilor.

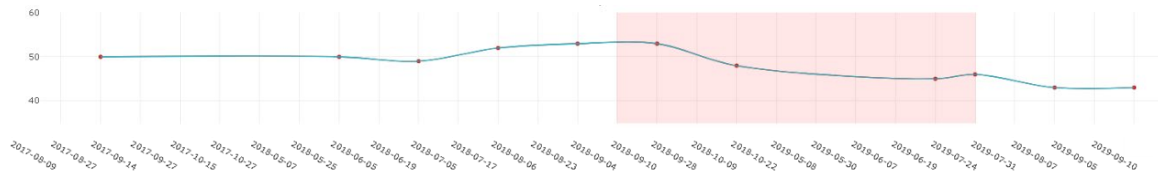


Figura 35. Analiză multitemporală număr de arbori la hectar

(—) SAT 1, ■ perioadă intervenţiei

Comparativ, suprafeţele de probă în cadrul cărora s-a intervenit cu tăieri de regenerare, prezintă fluctuaţii de intensitate mai ridicată (Figura 36).



Figura 36. Analiză multitemporală număr de arbori la hectar

(—) SAM 1, ■ perioadă intervenţiei

Cu un procent de abatere față de media perioadei analizate de 23% și o marjă de eroare de 8%, intensitatea intervenţiei este ridicată, specifică intervenţiilor tăierilor de regenerare aplicate.

Atât în cazul răriturilor cât și al tăierilor de regenerare, în perioada imediat următoare intervenţiilor, pot fi identificate creşteri în valoarea indicatorului utilizat. Aceste observaţii sunt conforme cu rezultatele privind valoarea numărului de arbori identificaţi relaţionată cu sensibilitatea tehnologiei TLS față de densitatea arborilor și stadiul de dezvoltare intra-anual.

## 6. CONCLUZII

- **Cu privire la identificarea și implementarea metodelor de extragere a parametrilor biofizici ai arboretelor prin tehnici specifice teledetecției terestre, cu precădere a scanării laser terestră se pot evidenția următoarele aspecte:**
  - Procesul de segmentare a norilor de puncte este una dintre fazele cel mai mult afectate de limitările specifice scanărilor laser terestre. Mai precis, conurile de umbră rezultate ca urmare a structurii verticale a arboretelor au dus la evidențierea unor diferențe semnificative în ceea ce privește numărul de arbori identificați prin cele două metode de achiziție (scanări singulare și multiple).
  - În comparație cu valorile de referință determinate în teren, stabilirea pozițiilor arborilor prin segmentarea norului de puncte, atât planimetric cât și altimetric conferă un grad ridicat de acuratețe. Aceasta se datorează modului de determinare a modelului digital al terenului, îmbunătățit prin aplicarea Cloth Simulation Filter, dar și a procesului de segmentare iterativă prin decompoziție Eigen raportată la o suprafață plană.
  - În ceea ce privește determinarea diametrului de bază al arborilor, chiar dacă scanările singulare au prezentat un bias în relație cu vârsta arborilor, prin utilizarea de scanări multiple, aceste tendințe de supra- respectiv sub-evaluare au fost compensate, permițându-se astfel obținerea de valori puternic corelate cu valorile de referință.
  - Spre deosebire de diametrul de bază, erorile asociate înălțimii arborilor nu au putut fi eliminate prin metoda de achiziție (scanări singulare sau multiple), sau prin aplicarea diferitelor tehnici de post-procesare. Astfel, nu s-a putut compensa limitarea cauzată de modul de achiziție specific scannerelor laser bazate pe modularea unei singure lungimi de undă.
  - Îmbunătățirile aduse metodei uzuale de extragere a proiecțiilor coroanelor, prin inversarea orientării norului de puncte pe axa Z, a permis atingerea unor valori comparabile cu cele măsurate în teren. Acestea au putut fi utilizate în continuare în calculul unora dintre indicii structurali utilizați pentru caracterizarea arboretelor.
  - Metodologia propusă și testată în cadrul tezei de doctorat, este aplicabilă arboretelor echiene, pentru dezvoltarea ei fiind necesare studii suplimentare privind sensibilitatea tehnologiei TLS și a aplicabilității metodelor de achiziție și procesare în arborete pluriene, multi-etajate.
- **Cu privire la identificarea și implementarea metodelor de analiză a descriptorilor structurali, în vederea evaluării și selectării unui set coerent și unitar de indici de caracterizare a structurii arboretelor și adaptarea calculului acestora la datele specifice teledetecției terestre, cu precădere scanarea laser terestră, de importanță crescută s-au desprins următoarele aspecte:**
  - Procesul de transfer al metodologiei de calcul și evaluare a indicilor structurali clasici către utilizarea de metode bazate pe date specifice teledetecției terestre, s-a dovedit fezabil. Cu toate acestea, se poate observa o lipsă de flexibilitate indicilor clasici în raport cu variațiile

specifice norilor de puncte, variații care sunt compensate însă în cadrul descriptorilor cu baza în teledetecție.

- Completarea setului de indici clasici de caracterizare a structurii arboretelor cu cei specifici determinării prin tehnici ale teledetecției și analiza holistă a acestora, a permis o descriere mult mai complexă a structurii orizontale și verticale a arboretelor cercetate. Astfel a fost posibilă stabilirea unui set minimal de indici care să permită cuantificarea informațiilor privind distribuția arborilor, coroanelor, a relației spațiale dintre aceștia și a relației arboret-suprafața ocupată, cu o precizie cât mai ridicată în schimbul unei investiții minime privind timpul și resursele alocate. Acest aspect a permis de asemenea evidențierea erorilor fiecărei surse de date și implicit, avantajele și dezavantajele diferitelor metodologii.
- Metodologia propusă și testată în cadrul tezei, este aplicabilă arboretelor echiene, pentru dezvoltarea ei fiind necesare în continuare, studii suplimentare privind sensibilitatea tehnologiei TLS, și a aplicabilității metodelor de achiziție și procesare în arborete pluriene, multi-etajate.
- **Cu privire la fuzionarea datelor oferite de senzorii pasivi și activi, în vederea optimizării rezultatelor obținute, s-au evidențiat următoarele:**
  - Datele înregistrate cu ajutorul camerei digitale încorporată scannerului laser, au permis extinderea analizei realizate către domeniul senzorilor pasivi prin compararea cu metodologii deja validate în literatura de specialitate.
  - Fuzionarea propriu-zisă s-a realizat prin preluarea de informații înregistrate folosind senzorul pasiv și transferul acestora către norul de puncte. Utilitatea procesului de fuzionare, a fost dovedită inițial, în evaluarea înălțimii de inserție a primei ramuri verzi, cota echivalentă înălțimii bazei coronamentului fiind extrasă apoi ca poziție echivalentă în histograma distribuției culorii verzi, a celei mai apropiate valori a densității de modul clasei (cea mai frecventă valoare).
  - Dezvoltarea studiilor precedente privind relațiile dintre indicele suprafeței foliare înregistrat cu ajutorul LiCor și Fotografia Digitală a Coronamentului (Digital Canopy Photography - DCP), a permis evidențierea similarității dintre DCP și reconstrucția de imagini emisferice folosind intensitatea TLS. Astfel, a fost posibilă obținerea unei metodologii unitare care permite validarea procesării emisferice bazată pe TLS în raport cu DCP. Acest demers a eliminat necesitatea folosirii LiCor în extragerea Relațiilor de corecție aplicate norilor de puncte și utilizarea DCP ca referință.
- **Cu privire la analiza multitemporală a informațiilor rezultate din fuzionarea datelor ca și mijloc de identificare a tendinței de evoluție a arboretelor și în special a deviațiilor de la un trend normal au fost soluționate următoarele aspecte:**
  - Decompoziția seriei temporale în trei clase principale privind sezonabilitatea, tendința și componentele neregulate a permis corectarea rezoluției seriei temporale. Astfel au fost identificate și validate prin datele de referință, perioadele aplicării răriturilor și tăierilor de regenerare dar și a efectelor acestora asupra trendului seriei temporale.

- Prin urmărirea indicatorilor de structură verticală, cât și a descriptorilor coronamentului și cunoscând specificul și intensitatea fiecărui tip de lucrare silviculturală (răritură sau tăiere de regenerare) aplicată, a fost posibilă nu doar identificarea duratei intervenției, ci și diferențierea între tăieri de regenerare și rărituri. Mai mult, în funcție de momentul intervenției, rezoluția temporală a seriei de date și metodologia utilizată, a permis inclusiv evidențierea tendinței de regenerare a arboretelor în raport cu ciclul fenologic.
- Deși s-a urmărit și cuantificarea intensității intervenției folosind indicii de desime, rezultatele obținute nu au putut fi validate din cauza faptului că valorile acestui indice sunt mai mici decât marja de eroare. Astfel nu s-a putut stabili dacă fluctuațiile înregistrate sunt rezultatul intervenției sau un derivat al limitărilor tehnologiei TLS. Acest neajuns a fost în special vizibil în cazul arboretelor asupra cărora s-a intervenit cu rărituri.
- **Cu privire la identificarea punctelor de abatere de la trendul normal și intensitatea asociată lor, au fost puse în evidență următoarele:**
  - Diferențierea structurilor repetitive de semnalul necaracterizat de periodicitate a fost realizată prin analiza autocorelativă a seriei temporale. Cu excepția unui număr redus de valori pentru care autocorelația nu a evidențiat devieri dincolo de limitele intervalului de semnificație, factorul de deviere a prezentat un efect redus asupra seriei de date. Abaterile identificate prin procesul de autocorelație (folosind toate cele trei elemente ale seriei temporale), au fost evidențiate și prin implementarea unei autocorelații parțiale (folosind numai valorile reziduale, după eliminarea efectelor ciclicității inter și intra-anoale). Această etapă de control a validat faptul că depășirile intervalului de încredere nu sunt rezultatul prezenței de outlieri în seria de date, ci semnalizează prezența unor evenimente reale.
  - Utilizarea tehnologiei TLS în evidențierea chiar și a modificării de intensitate relativ redusă în structura arboretelor, confirmă faptul că metodologia utilizată este validă.

\* \* \*

**Rezultatele cercetărilor desfășurate în cadrul studiilor doctorale și prezentate în teza de doctorat, validează posibilitatea fuzionării datelor provenite din senzori activi cu cele bazate pe înregistrări pasive în evaluarea cu succes a caracteristicilor biometrice ale arboretelor și extinderea acestora către cercetări privind evoluția temporală a indicilor structurali.**

**Analizând rezultatele privind indicatorii structurali ai arboretelor, cât și capacitatea de evaluare a variațiilor acestora, contextualizat cu intervalul relativ scurt (2017-2019) alocat cercetărilor de teren, se poate afirma cu încredere faptul că extinderea studiului va permite optimizarea metodologiei acolo unde se dovedește necesar, proces ce va echivala cu creșterea preciziei rezultatelor.**

**Astfel, extinderea perioadei destinate cercetărilor și abordarea, astfel, a aspectelor legate de procedurile de compensare a limitărilor tehnologiei de scanare laser terestru (incapacitatea de penetrare a coronamentului în punctul de maxim fenologic, sensibilitatea la conținutul de apă al vegetației, etc.) va permite dezvoltarea unui sistem de monitorizare forestieră bazat pe serii multi-temporale de date achiziționate de senzori activi și pasivi.**

## 7. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor efectuate pe parcursul studiilor doctorale pentru elaborarea prezentei teze de doctorat și a concluziilor desprinse în urma analizei și interpretării acestora, pot fi evidențiate numeroase contribuții personale cu caracter de originalitate, după cum urmează:

- Extinderea metodologiei de cuantificare a indicatorilor structurali într-o manieră care să permită armonizarea acestora și determinarea dinamicii lor.
- Abordarea și fundamentarea științifică a unor aspecte metodologice specifice utilizării tehnologiei laser terestră pentru monitorizarea și analiza structurii arboretelor provenite din regenerare.
- Actualizarea metodologiei de segmentare a norilor de puncte în vederea identificării arborilor individuali și extragerii parametrilor biometrici prin analiză comparativă a scanărilor singulare și multiple.
- Perfecționarea procesului de extragere a modelului digital al terenului prin implementarea filtrului spațial Cloth Simulation dar și a procesului de segmentare iterativă prin decompoziție Eigen în modul de procesare holist al norilor de puncte. Se aduce astfel un plus de acuratețe în clasificarea vegetației subarborescente și eliminarea acesteia, permițând o mai bună identificare a arborilor la utilizarea scanărilor laser terestru în arborete naturale.
- Evidențierea pentru prima dată, în cazul unor arborete din țara noastră, prin utilizarea scanărilor laser terestre multiple, a tendințelor de supra- și sub-evaluare a diametrelor de bază în funcție de compoziție, dar mai ales compensarea, prin metoda de achiziție a biasului generat de scanările singulare.
- Conceptualizarea și implementarea unei tehnici inovative de delimitare a proiecțiilor coroanelor arborilor pe baza norului de puncte, prin analiza acestuia dintr-o perspectivă nadirală descendentă. Cuplat cu o mai bună identificare a arborilor (aspect amintit anterior), a fost posibilă analiza detaliată a interacțiunii dintre coroanele arborilor.
- Automatizarea procesului de integrare într-o bază de date comună și unitară a informațiilor rezultate pe baza scanărilor laser terestru cu cele obținute prin măsurători biometrice, cât și cu cele privind localizarea geografică.
- Realizarea în premieră în țara noastră a transferării din punct de vedere metodologic a modalităților de calcul privind indicii structurali către teledetecția terestră cât și evidențierea limitărilor asociate abordărilor clasice în comparație cu tehnicile specifice scanării laser terestre.
- Monitorizarea dinamicii structurii arboretelor prin utilizarea unui sistem integrat constituit atât din indici clasici cât și din indici preluați din teledetecția terestră. A fost posibilă astfel, o analiză holistică și implicit o descriere complexă și detaliată a structurii a arboretelor cercetate.



- Realizarea fuzionării datelor provenite din utilizarea de senzori terestri pasivi și activi și validarea rezultatelor printr-o analiză comparativă cu valorile obținute folosind metodologii demonstrate în literatura de specialitate.
- Perfecționarea modului de procesare a valorilor intensităților de reflectanță, prin simularea fotografiei emisferice și integrarea intrinsecă a tehnicilor specifice DCP (Digital Canopy Photography) în procesarea scanărilor laser terestre.
- Evidențierea legăturii directe între valorile indicelui suprafeței foliare obținute din utilizarea echipamentelor dedicate, specifice (LiCor) și cele obținute din utilizarea de tehnici alternative (TLS), sub forma unor ecuații de corecție, contribuindu-se astfel la dezvoltarea, completarea și validarea cunoștințelor existente.
- Evidențierea pentru prima dată pe plan național a posibilității de utilizare a datelor provenite din scanări laser terestre în analize multi-temporale și a fezabilității implementării procedurilor preexistente de decompoziție a seriilor de date TLS.
- Punerea în evidență, pentru prima dată, a sensibilității tehnologiei laser terestru în evaluarea modificărilor survenite asupra ecosistemelor forestiere, prin analiza structurii atât a arboretelor parcurse cu rărituri cât și cu tăieri de regenerare.
- Dezvoltarea nivelului de cunoaștere științifică privind metodologia de procesare a datelor TLS și de aplicare a acesteia în silvicultură, și în special trecerea către automatizarea tuturor rutinelor asociate.

## BIBLIOGRAFIE

1. Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agric. For. Meteorol.* 2004.
2. Baldocchi, D.D.; Wilson, K.B.; Gu, L. How the environment, canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broad-leaved deciduous forest - An assessment with the biophysical model CANOAK. In Proceedings of the Tree Physiology; 2002.
3. Bournez, E.; Landes, T.; Saudreau, M.; Kastendeuch, P.; Najjar, G. From TLS point clouds to 3D models of trees: A comparison of existing algorithms for 3D tree reconstruction. In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives; 2017.
4. Raumonon, P.; Casella, E.; Calders, K.; Murphy, S.; Åkerblom, M.; Kaasalainen, M. Massive-scale tree modelling from TLS data. In Proceedings of the ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences; 2015.
5. Huang, H.; Tang, L.; Chen, C. A 3D individual tree modeling technique based on terrestrial LiDAR point cloud data. In Proceedings of the ICSDM 2015 - Proceedings 2015 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services; 2015.
6. Pascu, I.-S.; Dobre, A.-C.; Badea, O.; Tănase, M.A. Estimating forest stand structure attributes from terrestrial laser scans. *Sci. Total Environ.* **2019**, *691*, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.536.
7. Danson, F.M.; Hetherington, D.; Morsdorf, F.; Koetz, B.; Allgöwer, B. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **2007**, doi:10.1109/LGRS.2006.887064.
8. Newnham, G.; Armston, J.; Muir, J. Evaluation of Terrestrial Laser Scanners for Measuring Vegetation Structure 2012.
9. Hackenberg, J.; Spiecker, H.; Calders, K.; Disney, M.; Raumonon, P. SimpleTree - An efficient open source tool to build tree models from TLS clouds. *Forests* **2015**, *6*, 4245–4294, doi:10.3390/f6114245.
10. Hosoi, F.; Omasa, K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning lidar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2006**, doi:10.1109/TGRS.2006.881743.
11. Othmani, A.; Lew Yan Voon, L.F.C.; Stolz, C.; Piboule, A. Single tree species classification from Terrestrial Laser Scanning data for forest inventory. *Pattern Recognit. Lett.* **2013**, doi:10.1016/j.patrec.2013.08.004.
12. Pascu, I.-S.; Dobre, A.-C.; Badea, O.; Tanase, M.A. Retrieval of Forest Structural Parameters From Terrestrial Laser Scanning: A Romanian Case Study. *Forests* **2020**, doi:10.3390/f11040392.
13. Trochta, J.; Kruček, M.; Vrška, T.; Kraňal, K. 3D Forest: An application for descriptions of three-dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. *PLoS One* **2017**, doi:10.1371/journal.pone.0176871.
14. Yu, X.; Liang, X.; Hyypä, J.; Kankare, V.; Vastaranta, M.; Holopainen, M. Stem biomass estimation based on stem reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds. *Remote Sens. Lett.* **2013**, doi:10.1080/2150704X.2012.734931.
15. Astrup, R.; Ducey, M.J.; Granhus, A.; Ritter, T.; von Lüpke, N. Approaches for estimating stand-level volume using terrestrial laser scanning in a single-scan mode. *Can. J. For. Res.* **2014**, doi:10.1139/cjfr-2013-0535.
16. Hess, C.; Bienert, A.; Härdtle, W.; Von Oheimb, G. Does tree architectural complexity influence the accuracy of wood volume estimates of single young trees by terrestrial laser scanning? *Forests* **2015**, doi:10.3390/f6113847.
17. Raumonon, P.; Kaasalainen, M.; Åkerblom, M.; Kaasalainen, S.; Kaartinen, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Disney, M.; Lewis, P. Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sens.* **2013**, doi:10.3390/rs5020491.

18. Béland, M.; Baldocchi, D.D.; Widlowski, J.L.; Fournier, R.A.; Verstraete, M.M. On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR. *Agric. For. Meteorol.* **2014**, doi:10.1016/j.agrformet.2013.09.005.
19. Saarinen, N.; Kankare, V.; Vastaranta, M.; Luoma, V.; Pyörälä, J.; Tanhuanpää, T.; Liang, X.; Kaartinen, H.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; et al. Feasibility of Terrestrial laser scanning for collecting stem volume information from single trees. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2017**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.11.012.
20. Delgrange, S.; Rochon, P. Reconstruction and analysis of a deciduous sapling using digital photographs or terrestrial-LiDAR technology. *Ann. Bot.* **2011**, doi:10.1093/aob/mcr064.
21. Martins Neto, R.P.; Buck, A.L.B.; Silva, M.N.; Lingnau, C.; Machado, Á.M.L.; Pesck, V.A. Avaliação da varredura laser terrestre em diferentes distâncias da árvore para mensurar variáveis dendrométricas. *Bol. Ciências Geod.* **2013**, doi:10.1590/S1982-21702013000300005.
22. Henning, J.G.; Radtke, P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *For. Sci.* **2006**.
23. Liu, G.; Wang, J.; Dong, P.; Chen, Y.; Liu, Z. Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level. *Forests* **2018**, *9*, 398, doi:10.3390/f9070398.
24. Xi, Z.; Hopkinson, C.; Chasmer, L. Automating plot-level stem analysis from terrestrial laser scanning. *Forests* **2016**, doi:10.3390/f7110252.
25. Heinzl, J.; Huber, M.O. Constrained spectral clustering of individual trees in dense forest using terrestrial laser scanning data. *Remote Sens.* **2018**, doi:10.3390/rs10071056.
26. Reddy, R.S.; Rakesh; Jha, C.S.; Rajan, K.S. Automatic estimation of tree stem attributes using terrestrial laser scanning in central Indian dry deciduous forests. *Curr. Sci.* **2018**, doi:10.18520/cs/v114/i01/201-206.
27. Reddy, R.S.; Jha, C.S.; Rajan, K.S. Automatic Tree Identification and Diameter Estimation Using Single Scan Terrestrial Laser Scanner Data in Central Indian Forests. *J. Indian Soc. Remote Sens.* **2018**, doi:10.1007/s12524-018-0753-7.
28. Pitkänen, T.P.; Raunonen, P.; Kangas, A. Measuring stem diameters with TLS in boreal forests by complementary fitting procedure. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2019**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.11.027.
29. Ravaglia, J.; Fournier, R.A.; Bac, A.; Véga, C.; Côté, J.F.; Piboule, A.; Rémillard, U. Comparison of three algorithms to estimate tree stem diameter from terrestrial laser scanner data. *Forests* **2019**, doi:10.3390/f10070599.
30. Cabo, C.; Ordóñez, C.; López-Sánchez, C.A.; Armesto, J. Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2018**, doi:10.1016/j.jag.2018.01.011.
31. Wang, Y.; Lehtomäki, M.; Liang, X.; Pyörälä, J.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; Liu, J.; Feng, Z.; Chen, R.; Hyyppä, J. Is field-measured tree height as reliable as believed – A comparison study of tree height estimates from field measurement, airborne laser scanning and terrestrial laser scanning in a boreal forest. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2019**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.11.008.
32. Yrttimaa, T.; Saarinen, N.; Kankare, V.; Liang, X.; Hyyppä, J.; Holopainen, M.; Vastaranta, M. Investigating the Feasibility of Multi-Scan Terrestrial Laser Scanning to Characterize Tree Communities in Southern Boreal Forests. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 1423, doi:10.3390/rs11121423.
33. Gollob, C.; Ritter, T.; Wassermann, C.; Nothdurft, A. Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 1602, doi:10.3390/rs11131602.

34. Liang, X.; Kankare, V.; Hyyppä, J.; Wang, Y.; Kukko, A.; Haggrén, H.; Yu, X.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Guan, F.; et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2016**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.
35. Liang, X.; Hyyppä, J.; Kaartinen, H.; Lehtomäki, M.; Pyörälä, J.; Pfeifer, N.; Holopainen, M.; Brolly, G.; Francesco, P.; Hackenberg, J.; et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2018**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021.
36. Decuyper, M.; Mulatu, K.A.; Brede, B.; Calders, K.; Armston, J.; Rozendaal, D.M.A.; Mora, B.; Clevers, J.G.P.W.; Kooistra, L.; Herold, M.; et al. Assessing the structural differences between tropical forest types using Terrestrial Laser Scanning. *For. Ecol. Manage.* **2018**, doi:10.1016/j.foreco.2018.07.032.
37. Wilkes, P.; Lau, A.; Disney, M.; Calders, K.; Burt, A.; Gonzalez de Tanago, J.; Bartholomeus, H.; Brede, B.; Herold, M. Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots. *Remote Sens. Environ.* **2017**, doi:10.1016/j.rse.2017.04.030.
38. Disney, M. Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. *New Phytol.* **2019**.
39. Ducey, M.J.; Astrup, R. Adjusting for nondetection in forest inventories derived from terrestrial laser scanning. *Can. J. Remote Sens.* **2013**, doi:10.5589/m13-048.
40. Lindberg, E.; Holmgren, J.; Olofsson, K.; Olsson, H. Estimation of stem attributes using a combination of terrestrial and airborne laser scanning. *Eur. J. For. Res.* **2012**, doi:10.1007/s10342-012-0642-5.
41. Lovell, J.L.; Jupp, D.L.B.; Newnham, G.J.; Culvenor, D.S. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2011**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.08.006.
42. Trochta, J.; Král, K.; Janík, D.; Adam, D. Arrangement of terrestrial laser scanner positions for area-wide stem mapping of natural forests. *Can. J. For. Res.* **2013**, doi:10.1139/cjfr-2012-0347.
43. Ducey, M.J.; Astrup, R.; Seifert, S.; Pretzsch, H.; Larson, B.C.; David Coates, K. Comparison of forest attributes derived from two terrestrial lidar systems. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* **2013**, doi:10.14358/PERS.79.3.245.
44. Mengesha, T.; Hawkins, M.; Nieuwenhuis, M. Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods. *Eur. J. For. Res.* **2015**, doi:10.1007/s10342-014-0844-0.
45. Srinivasan, S.; Popescu, S.C.; Eriksson, M.; Sheridan, R.D.; Ku, N.W. Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. *For. Ecol. Manage.* **2014**, doi:10.1016/j.foreco.2014.01.038.
46. Liang, X.; Hyyppä, J.; Kaartinen, H.; Holopainen, M.; Melkas, T. Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning data. *ISPRS Int. J. Geo-Information* **2012**, doi:10.3390/ijgi1030242.
47. Pastorella, F.; Paletto, A. Stand structure indices as tools to support forest management: An application in Trentino forests (Italy). *J. For. Sci.* **2013**, doi:10.17221/75/2012-jfs.
48. Carcea, F.; Dissescu, R. *Terminologia amenajării pădurilor*, IUFRO SilvaPlan & SilvaVoc: Vienna, 2014;
49. Giurgiu, V. *Dendrometrie și Auxologie Forestieră*, Ceres: Bucharest, 1979;
50. Asner, G.P.; Scurlock, J.M.O.; Hicke, J.A. Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2003**, doi:10.1016/j.clineuro.2003.11.004.
51. Neumann, H.H.; Den Hartog, G.; Shaw, R.H. Leaf area measurements based on hemispheric photographs and leaf-litter collection in a deciduous forest during autumn leaf-fall. *Agric. For. Meteorol.* **1989**, doi:10.1016/0168-1923(89)90052-X.
52. Black, T.A.; Chen, J.-M.; Lee, X.; Sagar, R.M. Characteristics of shortwave and longwave irradiances under a Douglas-fir forest stand. *Can. J. For. Res.* **1991**, doi:10.1139/x91-140.
53. Poeschel, P.; Newnham, G.; Hill, J. Retrieval of gap fraction and effective plant area index from phase-shift terrestrial laser scans. *Remote Sens.* **2014**, doi:10.3390/rs6032601.
54. Ilangakoon, N.T.; Gorsevski, P. V.; Simic Milas, A. Estimating Leaf Area Index by Bayesian Linear

- Regression Using Terrestrial LiDAR, LAI-2200 Plant Canopy Analyzer, and Landsat TM Spectral Indices. *Can. J. Remote Sens.* **2015**, doi:10.1080/07038992.2015.1102629.
55. Zheng, G.; Moskal, L.M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors* **2009**, doi:10.3390/s90402719.
56. Lecigne, B.; Delagrangé, S.; Messier, C. Exploring trees in three dimensions: VoxR, a novel voxel-based R package dedicated to analysing the complex arrangement of tree crowns. *Ann. Bot.* **2018**, doi:10.1093/aob/mcx095.
57. Kaasalainen, S.; Jaakkola, A.; Kaasalainen, M.; Krooks, A.; Kukko, A. Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sens.* **2011**, doi:10.3390/rs3102207.
58. Zheng, G.; Moskal, L.M.; Kim, S.H. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2013**, doi:10.1109/TGRS.2012.2205003.
59. Kaishover, J.E.; Dabney, P.W. An Airborne Laser Polarimeter System (ALPS) For Terrestrial Physics Research. In Proceedings of the Recent Advances in Sensors, Radiometry, and Data Processing for Remote Sensing; 1988.
60. Tan, S.; Stoker, J.; Greenlee, S. Detection of foliage-obscured vehicle using a multiwavelength polarimetric lidar. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); 2007.
61. Google Google Maps Available online: maps.google.com.
62. IFER - Monitoring and Mapping Solutions.
63. Brusey, J.; Gaura, E.I.; Goldsmith, D.; Shuttleworth, J. FieldMAP: A Spatiotemporal Field Monitoring Application Prototyping Framework. *IEEE Sens. J.* **2009**, doi:10.1109/JSEN.2009.2021799.
64. Haglöf Sweden AB.
65. FARO Technologies Inc.
66. Valbuena, R.; Mauro, F.; Rodriguez-Solano, R.; Manzanera, J.A. Accuracy and precision of GPS receivers under forest canopies in a mountainous environment. *Spanish J. Agric. Res.* **2010**, doi:10.5424/sjar/2010084-1242.
67. Wang, Y.; Shi, H.; Zhang, Y.; Zhang, D. Automatic registration of laser point cloud using precisely located sphere targets. *J. Appl. Remote Sens.* **2014**, doi:10.1117/1.JRS.8.083588.
68. FARO Technologies Inc.
69. LiCorBiosciences LiCor 2200 User Guide Available online: <https://www.licor.com/env/support/LAI-2200C/manuals.html>.
70. Othmani, A.; Piboule, A.; Krebs, M.; Stolz, C. Towards automated and operational forest inventories with T-Lidar. *SilviLaser* **2011**.
71. Zhang, W.; Qi, J.; Wan, P.; Wang, H.; Xie, D.; Wang, X.; Yan, G. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 501, doi:10.3390/rs8060501.
72. Bitterlich, W. Klassische und Praktische Relaskopstichprobe. *Allg. Forstzeitung* **1978**.
73. Rusu, R.B.; Marton, Z.C.; Blodow, N.; Dolha, M.; Beetz, M. Towards 3D Point cloud based object maps for household environments. *Rob. Auton. Syst.* **2008**, doi:10.1016/j.robot.2008.08.005.
74. de Conto, T.; Olofsson, K.; Görgens, E.B.; Rodriguez, L.C.E.; Almeida, G. Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning. *Comput. Electron. Agric.* **2017**, doi:10.1016/j.compag.2017.10.019.
75. LiCorBiosciences LiCor 2200 User Guide.
76. R: A language and environment for statistical computing 2013.
77. *Ecological Indicators for the Nation*; National Academies Press: Washington, D.C., 2000; ISBN 978-0-309-06845-1.
78. Giurgiu, V.; Decei, I.; Draghiciu, D. *Metode si tabele dendrometrice*; Ceres: Bucharest, 2004;

79. Leahu, I. *Dendrometrie; Didactică și Pedagogică*: Bucharest, 1994;
80. Barber, C.B.; Dobkin, D.P.; Huhdanpaa, H. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Trans. Math. Softw.* **1996**, doi:10.1145/235815.235821.
81. Antonarakis, A.S.; Richards, K.S.; Brasington, J.; Muller, E. Determining leaf area index and leafy tree roughness using terrestrial laser scanning. *Water Resour. Res.* **2010**, *46*, doi:10.1029/2009WR008318.
82. Raabe, K.; Pisek, J.; Lang, M.; Korhonen, L. Estimating the beyond-shoot foliage clumping at two contrasting points in the growing season using a variety of field-based methods. *Trees - Struct. Funct.* **2017**, doi:10.1007/s00468-017-1541-7.
83. Salas-Aguilar, V.; Sánchez-Sánchez, C.; Rojas-García, F.; Paz-Pellat, F.; Valdez-Lazalde, J.R.; Pinedo-Alvarez, C. Estimation of vegetation cover using digital photography in a regional survey of central Mexico. *Forests* **2017**, doi:10.3390/f8100392.
84. Alivernini, A.; Fares, S.; Ferrara, C.; Chianucci, F. An objective image analysis method for estimation of canopy attributes from digital cover photography. *Trees* **2018**, *32*, 713–723, doi:10.1007/s00468-018-1666-3.
85. Macfarlane, C.; Hoffman, M.; Eamus, D.; Kerp, N.; Higginson, S.; McMurtrie, R.; Adams, M. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. *Agric. For. Meteorol.* **2007**, doi:10.1016/j.agrformet.2006.10.013.
86. Chianucci, F. A note on estimating canopy cover from digital cover and hemispherical photography. *Silva Fenn.* **2016**, *50*, doi:10.14214/sf.1518.
87. Watson, D.J. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops: I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Ann. Bot.* **1947**, doi:10.1093/oxfordjournals.aob.a083148.
88. Chen, J.M.; Black, T.A. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agric. For. Meteorol.* **1991**, doi:10.1016/0168-1923(91)90074-Z.
89. Wang, W.M.; Li, Z.L.; Su, H.B. Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. *Agric. For. Meteorol.* **2007**, doi:10.1016/j.agrformet.2006.12.003.
90. Soma, M.; Pimont, F.; Durrieu, S.; Dupuy, J.-L. Enhanced Measurements of Leaf Area Density with T-LiDAR: Evaluating and Calibrating the Effects of Vegetation Heterogeneity and Scanner Properties. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 1580, doi:10.3390/rs10101580.
91. Li, S.; Dai, L.; Wang, H.; Wang, Y.; He, Z.; Lin, S. Estimating Leaf Area Density of Individual Trees Using the Point Cloud Segmentation of Terrestrial LiDAR Data and a Voxel-Based Model. *Remote Sens.* **2017**, *9*, 1202, doi:10.3390/rs9111202.
92. Griebel, A.; Bennett, L.T.; Culvenor, D.S.; Newnham, G.J.; Arndt, S.K. Reliability and limitations of a novel terrestrial laser scanner for daily monitoring of forest canopy dynamics. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *166*, 205–213, doi:10.1016/j.rse.2015.06.014.
93. Li, Y.; Guo, Q.; Tao, S.; Zheng, G.; Zhao, K.; Xue, B.; Su, Y. Derivation, Validation, and Sensitivity Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Leaf Area Index. *Can. J. Remote Sens.* **2016**, *42*, 719–729, doi:10.1080/07038992.2016.1220829.
94. Li, Y.; Guo, Q.; Tao, S.; Zheng, G.; Zhao, K.; Xue, B.; Su, Y. Derivation, Validation, and Sensitivity Analysis of Terrestrial Laser Scanning-Based Leaf Area Index. *Can. J. Remote Sens.* **2016**, *42*, 719–729, doi:10.1080/07038992.2016.1220829.
95. Grotti, M.; Calders, K.; Origo, N.; Puletti, N.; Alivernini, A.; Ferrara, C.; Chianucci, F. An intensity, image-based method to estimate gap fraction, canopy openness and effective leaf area index from phase-shift terrestrial laser scanning. *Agric. For. Meteorol.* **2020**, doi:10.1016/j.agrformet.2019.107766.
96. Crawley, M.J. *The R Book*; John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK, 2007; ISBN 9780470515075.

97. Brolly, G.; Király, G. Algorithms for stem mapping by means of terrestrial laser scanning. *Acta Silv. Lignaria Hungarica* **2009**.
98. Murphy, G.E.; Acuna, M.A.; Dumbrell, I. Tree value and log product yield determination in radiata pine (*Pinus radiata*) plantations in Australia: Comparisons of terrestrial laser scanning with a forest inventory system and manual measurements. *Can. J. For. Res.* **2010**, doi:10.1139/X10-171.
99. Liang, X.; Litkey, P.; Hyyppä, J.; Kaartinen, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2012**, doi:10.1109/TGRS.2011.2161613.
100. Olofsson, K.; Holmgren, J.; Olsson, H. Tree stem and height measurements using terrestrial laser scanning and the RANSAC algorithm. *Remote Sens.* **2014**, doi:10.3390/rs6054323.
101. Liang, X.; Hyyppä, J. Automatic stem mapping by merging several terrestrial laser scans at the feature and decision levels. *Sensors (Switzerland)* **2013**, doi:10.3390/s130201614.
102. Maas, H.G.; Bienert, A.; Scheller, S.; Keane, E. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. In Proceedings of the International Journal of Remote Sensing; 2008.
103. Kankare, V.; Liang, X.; Vastaranta, M.; Yu, X.; Holopainen, M.; Hyyppä, J. Diameter distribution estimation with laser scanning based multisource single tree inventory. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2015**, doi:10.1016/j.isprsjprs.2015.07.007.
104. Prewitt, J.M.S.; Mendelsohn, M.L. The analysis of cell images. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **1966**, *128*, 1035–1053.
105. Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* **1979**, *9*, 62–66, doi:10.1109/TSMC.1979.4310076.
106. Béland, M.; Widlowski, J.L.; Fournier, R.A.; Côté, J.F.; Verstraete, M.M. Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. *Agric. For. Meteorol.* **2011**, doi:10.1016/j.agrformet.2011.05.004.
107. Bahamonde, H.A.; Gil, L.; Fernández, V. Surface Properties and Permeability to Calcium Chloride of *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* Leaves of Different Canopy Heights. *Front. Plant Sci.* **2018**, doi:10.3389/fpls.2018.00494.
108. Stevenson, M. epiR: an RPackage for the analysis of epidemiological data 2014.
109. Allen, R.G.D.; Koopmans, T. Linear Regression Analysis of Economic Time Series. *Economica* **1938**, doi:10.2307/2548844.
110. Manuilova, E. mcr 2014.
111. Crawley, M.J. *The R Book*; John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, UK, 2007; ISBN 9780470515075.
112. Cleveland, W.S.; Grosse, E.; Shyu, W.M. Local regression models. In *Statistical Models in S*; 2017 ISBN 9781351414234.
113. Chen, C.; Liu, L.-M. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. *J. Am. Stat. Assoc.* **1993**, doi:10.2307/2290724.
114. Hyndman, R.J.; Koehler, A.B.; Snyder, R.D.; Grose, S. A state space framework for automatic forecasting using exponential smoothing methods. *Int. J. Forecast.* **2002**, doi:10.1016/S0169-2070(01)00110-8.
115. Sabol, J.; Patočka, Z.; Mikita, T. Usage of Lidar Data for Leaf Area Index Estimation. *Geosci. Eng.* **2015**, doi:10.2478/gse-2014-0013.

## SCURT REZUMAT

După un deceniu de cercetări active, tehnologia TLS nu a fost încă acceptată ca instrument operațional în monitorizarea forestieră. Acest aspect este împiedicat în principal de dificultăți în automatizarea procesării norilor de puncte, care deși oferă rezultate convingătoare privind determinarea automată și exactă a unor atribute importante ale arborilor, precum specia și înălțimea, necesită încă studii suplimentare.

Obiectivul principal al cercetărilor desfășurate a fost acela de a extinde gradul de cunoaștere și mai ales utilizarea tehnicilor teledetecției terestre în vederea perfecționării metodologiei de evaluare a stării ecosistemelor forestiere. În vederea atingerii acestui scop, s-a urmărit îndeplinirea unui cumul de obiective științifice. Cele mai importante au făcut referire la identificarea și implementarea metodelor de extragere a parametrilor biofizici ai arboretelor, prin tehnici specifice scanărilor laser terestre. De asemenea s-a urmărit evaluarea și selectarea unui set coerent și unitar de indicatori de caracterizare a structurii arboretelor și adaptarea calculului acestora la datele specifice teledetecției terestre. Fuzionarea datelor provenite de la senzorii pasivi cu cele din surse active a dus la optimizarea rezultatelor. Analiza multitemporală a datelor fuzionate, a permis identificarea tendinței de evoluție a arboretelor și în special a deviațiilor de la un trend normal.

Rezultatele cercetărilor desfășurate în cadrul studiilor doctorale, au validat posibilitatea fuzionării datelor provenite din senzori activi cu cele bazate pe înregistrări pasive în evaluarea caracteristicilor biometrice ale arboretelor și extinderea acestora către cercetări privind evoluția temporală a indicilor structurali.

## SHORT SUMMARY

After a decade of active research, TLS technology has not yet been accepted as an operational tool in forest monitoring. This is mainly caused by difficulties in automating point cloud processing, which, despite providing convincing results on the automatic and accurate determination of important biophysical attributes, such as species and height, still requires further study.

The main objective of the research was to expand the knowledge and especially the use of terrestrial remote sensing techniques in order to improve the methodology for assessing the state of forest ecosystems. A set of scientific objectives were set in order to reach this goal. The most important one referred to the identification and implementation of methods for extracting biophysical parameters, through specific techniques for terrestrial laser scanning. The aim was to also evaluate and select a coherent and unitary set of structural indices and their adaptation to terrestrial remote sensing specific data. The merger of passive sensors data with information from active sources, has led to the improvement of the overall results. Multitemporal analysis of the merged data allowed the identification of the forest stands' trend and especially of any deviation from it.

The conducted research validated the possibility of merging data from active sensors with those based on passive recordings in assessing the biometric characteristics of trees as well as their extension towards research of structural indices in a multitemporal manner.