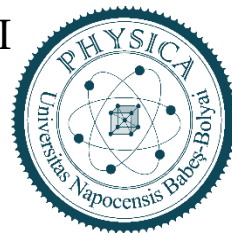




UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI

Facultatea de Fizică

Școala Doctorală de Fizică



TEZĂ DE DOCTORAT

- rezumat -

**Investigații fizico-chimice și
optimizarea proprietăților
biologice ale speciei *Larix decidua***

Petru TRUȚA

Conducător științific

Prof. dr. Leontin DAVID

Cluj-Napoca

2026

ABSTRACT

Studiul de față investighează, într-o abordare interdisciplinară, interacțiunea dintre structura chimică a biomaterialului forestier și acțiunea unor factori fizici externi asupra germinării semințelor de *Larix decidua*. Obiectivul principal îl constituie evaluarea modificărilor fizico-chimice induse de tratamente termice, câmpuri electrice și electromagnetice, precum și de radiații gamma, și corelarea acestora cu răspunsul biologic al semințelor.

Analiza spectroscopică FT-IR a evidențiat faptul că structura chimică a scoarței este influențată atât de proveniență, cât și de regimul termic aplicat. Spectrele obținute confirmă prezența principalelor componente lignocelulozice (lignină, celuloză, hemiceluloze), iar variațiile observate indică modificări ale grupărilor funcționale, în special diminuarea benzilor hidroxil și transformări ale grupărilor carbonil. Aceste rezultate demonstrează că tratamentele termice implică procese de reorganizare moleculară și nu se limitează la simpla eliminare a apei.

Rezultatele obținute prin cromatografie gazoasă cuplată cu spectrometrie de masă (GC-MS) confirmă că temperatura și proveniența determină variații semnificative în compoziția chimică. Creșterea temperaturii conduce la volatilizarea compușilor cu masă moleculară redusă și la predominanța compușilor mai stabili, precum cei terpenici și fenolici, fiind evidențiate și procese de formare a unor compuși secundari. Aceste transformări reflectă modificări ale echilibrului chimic al sistemului, controlate de transferul de energie și de stabilitatea moleculară.

Studiul efectelor câmpurilor electrice și electromagnetice asupra germinării semințelor relevă faptul că aceste tratamente acționează prin mecanisme fizice de polarizare, redistribuire a sarcinilor electrice și modificare a transportului ionic la nivel celular. Rezultatele experimentale indică existența

unui interval optim al parametrilor câmpului, în care germinarea este stimulată, ceea ce sugerează un comportament neliniar al sistemului biologic și o utilizare eficientă a energiei absorbite. Depășirea acestui interval conduce la efecte inhibitorii, determinate de perturbări structurale.

Expunerea la radiații gamma a evidențiat un răspuns dependent de doză, caracterizat prin efecte stimulative la doze reduse și inhibitorii la doze ridicate. Din punct de vedere fizic, aceste efecte sunt explicate prin procese de ionizare și generare de radicali liberi, care influențează integritatea moleculară și funcționalitatea celulară. Identificarea unei doze optime evidențiază posibilitatea utilizării controlate a radiațiilor ionizante în stimularea germinării.

Corelarea rezultatelor obținute prin FT-IR, GC-MS și experimentele biologice demonstrează că răspunsul semințelor este determinat de interacțiunea dintre structura chimică și factorii fizici externi. Stabilitatea moleculară a compușilor influențează capacitatea de adaptare la excitații energetice, iar variabilitatea între proveniențe reflectă diferențe în proprietățile dielectrice și în mecanismele de absorbție și disipare a energiei. Studiul confirmă relevanța integrării metodelor fizico-chimice în analiza proceselor biologice și deschide perspective pentru optimizarea tehnologiilor de producere a materialului forestier de reproducere prin utilizarea controlată a tratamentelor fizice.

1 CAPITOLUL 1 - Metode fizico-chimice în studiul sistemelor biologice

Utilizarea metodelor fizice permite investigarea compoziției chimice, a structurii moleculare și a mecanismelor de reacție din sistemele biologice cu o precizie ridicată, contribuind astfel la dezvoltarea unor abordări interdisciplinare la interfața dintre fizică, chimie și biologie (Skoog and David, 2017).

Printre tehnicile analitice consacrate pentru separarea și identificarea unui număr mare de compuși se numără spectrometria de masă, din care fac parte spectrometria de masă cuplată cu gaz-cromatografia (GC-MS), spectrometria de masă cuplată cu cromatografia de lichide (LC-MS), și cromatografie de lichide de înaltă performanță (HPLC), dar și altele. Aceste metode permit determinarea masei moleculare, elucidarea structurii compușilor și analiza amestecurilor complexe, fiind larg utilizată în diverse domenii (Figura 1.1).

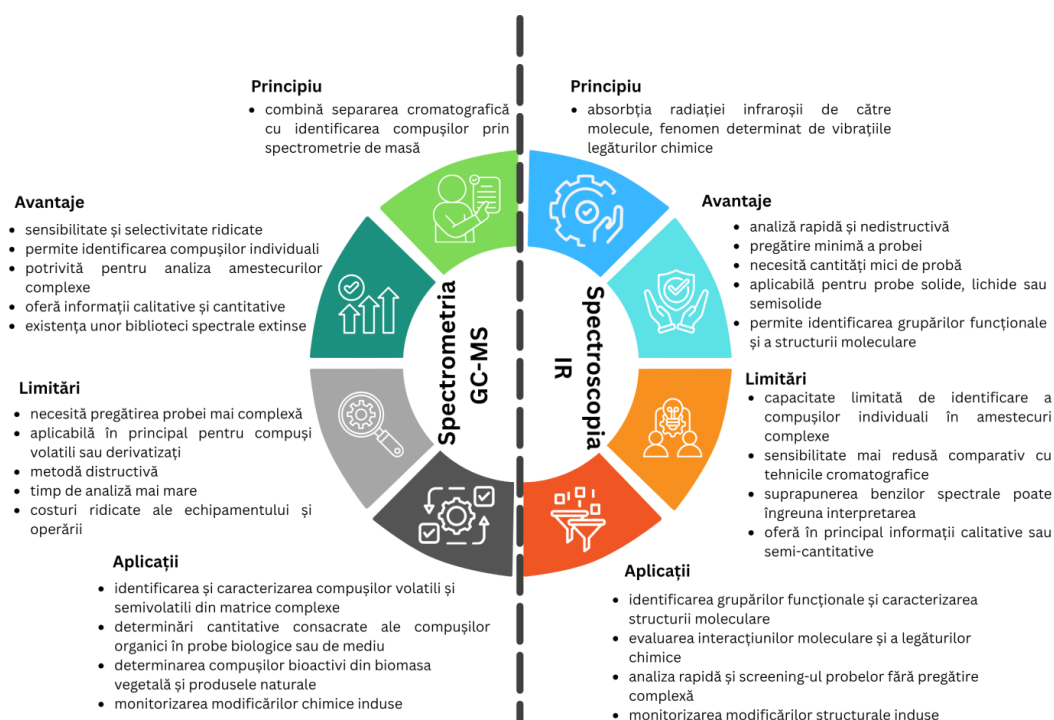


Figura 1.1. Aspecte generale cu privire la principiul, avantajele și dezavantajele spectrometriei de masă GC-MS și a spectroscopiei vibraționale (IR), precum și aplicațiile pe care aceste metode le au în studiul sistemelor biologice.

Atât spectrometria de masă, cât și spectroscopia vibrațională fac obiectul prezentei teze de doctorat, fiind utilizate pentru caracterizarea materialelor biologice.

De asemenea, radiația gamma, o formă de radiație electromagnetică cu energie înaltă, interacționează cu materia prin procese fizice fundamentale, aceste interacțiuni putând genera radicali liberi și modificări la nivel molecular, care, în funcție de doză, pot avea efecte inhibitorii sau stimulative asupra proceselor biologice. În agricultură și silvicultură, iradierea la doze mici este studiată ca metodă de stimulare a germinării și de creștere a vigorii semințelor.

Prin urmare, integrarea metodelor fizice în studiul sistemelor vegetale oferă posibilitatea investigării atât a compoziției chimice a materialelor biologice, cât și a modului în care factorii fizici pot influența procesele fiziologice. Această abordare interdisciplinară este esențială pentru înțelegerea mecanismelor care stau la baza interacțiunilor dintre fenomenele fizice și sistemele biologice, contribuind la dezvoltarea unor aplicații în domenii precum agricultura, silvicultura sau valorificarea biomasei vegetale.

1.1 Spectroscopia IR în caracterizarea sistemelor biologice

Absorbția radiației infraroșii de către molecule are loc numai dacă vibrația moleculară este însoțită de o variație a momentului dipolar. Această condiție de selecție conferă spectroscopiei IR selectivitate față de tipul legăturilor chimice și mediul structural. Vibrațiile moleculare sunt de tip întindere (simetrică/asimetrică) și deformare (forfecare, balansare, rotație internă).

Spectrul IR este reprezentat ca absorbție sau transmitanță în funcție de numărul de undă și conține benzi caracteristice grupărilor funcționale. Poziția și forma acestora permit identificarea compoziției chimice și evidențierea efectelor intermoleculare (legături de hidrogen, cristalinitate, orientare moleculară).

Spectroscopia modernă utilizează tehnica FT-IR, bazată pe interferometrul Michelson și transformata Fourier. Absorbția este corelată cu concentrația prin legea Lambert–Beer: $A = c \cdot \varepsilon \cdot l$ (1)

Tehnica oferă raport semnal/zgomot ridicat, precizie spectrală și timp redus de analiză. Modurile de lucru (ATR, transmisie, reflexie difuză) permit investigarea solidelor, lichidelor și pulberilor, inclusiv prin sisteme portabile pentru analize rapide in situ.

Pregătirea probelor depinde de starea acestora: solidele se analizează direct prin ATR sau sub formă de pastile KBr, iar lichidele în cuve dedicate. Spectrul obținut evidențiază benzi de absorbție a căror poziție indică grupările funcționale prezente.



Figura 1.2. Fluxul de analiză pentru obținerea spectrelor IR ale probelor. În funcție de starea de agregare a probei aceasta se poate plasa pe cristal ATR, se poate prepara o pastilă cu KBr sau se poate utiliza o cuvă pentru lichide. După plasarea probei are loc interacțiunea acesteia cu radiația IR și obținerea spectrului IR.

Datorită caracterului nedistructiv și a cerințelor minime de pregătire a probei, spectroscopia IR este utilizată pe scară largă pentru caracterizarea fizico-chimică și monitorizare analitică (Simionescu, 2012). Domeniile clasice includ știința materialelor și sinteza chimică, unde tehnica este aplicată pentru analiza materialelor funcționale, polimerilor și biomaterialelor (Hsu, 1997; Parker, 2012).

Extinderea aplicațiilor vizează studii de mediu (detecția și cuantificarea poluanților, evaluarea calității aerului), industria alimentară (controlul calității,

autentificare, identificarea adulteranților) și fizica aplicată (analiza dinamicii vibraționale și a interacțiunilor intermoleculare) (Rodriguez-Saona și Allendorf, 2011; Valand și colab., 2020; Candoğan și colab., 2021). În agricultură, spectroscopia IR este utilizată pentru evaluarea compoziției biomasei, determinarea conținutului de apă și identificarea stresului abiotic și biotic (Liu și colab., 2015; Tsuchikawa și colab., 2022).

În studiul arborilor, tehnica permite identificarea markerilor chimici specifici speciilor și monitorizarea degradării lemnului. De asemenea, este utilizată pentru caracterizarea scoarței, evidențiind grupări funcționale asociate celulozei, hemicelulozei, ligninei și compușilor fenolici. Studii recente au demonstrat utilitatea FT-IR în analiza taninurilor din specii de pin (Chupin și colab., 2013), precum și în investigarea modificărilor structurale ale lemnului în timp (Bouramdane și colab., 2022).

Tehnica FT-NIR completează aceste analize prin evaluarea rapidă a compoziției chimice în funcție de procesare, fiind aplicată în produse vegetale pentru determinarea influenței tratamentelor termice și a condițiilor de uscare asupra compoziției biochimice (Xu și colab., 2023).

1.2 Aspecte teoretice și utilizarea spectroscopiei de masa cuplată cu gaz-cromatografia (GC-MS)

O metodă consacrată pentru detecția și cuantificarea diferiților compuși chimici din orice matrice o reprezintă spectrometria de masă cuplată cu cromatografia de gaze (GC-MS). Această metodă permite determinarea masei moleculare, elucidarea structurii compușilor și analiza amestecurilor complexe, fiind larg utilizată în diverse domenii. Spectrometria de masă reprezintă o tehnică analitică care îmbină separarea fizico-chimică a compușilor volatili și semivolatili cu identificarea acestora pe baza raportului masă-sarcină (m/z) (Beale și colab., 2018). Tehnica GC-MS are numeroase aplicații și prezintă o selectivitate,

senzitivitate și acuratețe ridicată. Deși în cazul acestor metode, prepararea, prelucrarea probei și analiza propriu-zisă sunt mult mai laborioase (Figura 1.3) decât etapele de analiză ale spectroscopiei vibraționale, această tehnică rămâne consacrată pentru precizia cu care pot fi identificați compușii în matrici. Astfel, o sinteză a comparației între cele două metode poate fi observată în Figura 4.

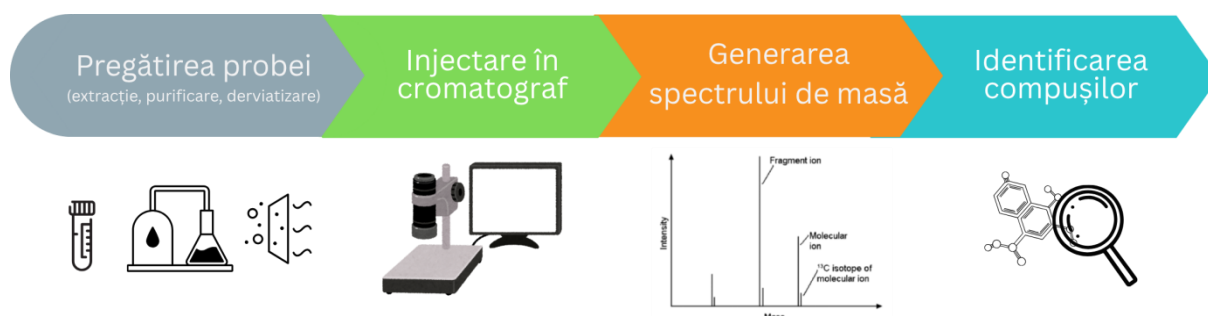


Figura 1.2. Fluxul de analiză utilizând spectrometria de masă GC-MS. Proba necesită o preparare atentă pentru extragerea compușilor de interes din matrice și obținerea unei probe omogene, gata de injectare în spectrometrul de masă. După injectarea probei, are loc separarea compușilor în coloană, ionizare în spectrometrul de masă, detecția și generarea spectrului de masă.

Din punct de vedere teoretic, GC-MS combină două procese: separarea cromatografică în fază gazoasă și analiza de masă, bazată pe mișcarea ionilor în câmpuri electrice. Această integrare oferă selectivitate și sensibilitate ridicate, fiind utilizată frecvent în analiza compușilor moleculari (Beale și colab., 2018).

Cromatografia de gaze separă compușii pe baza distribuției între faza mobilă gazoasă (heliu sau azot) și faza staționară din coloana capilară. Separarea depinde de volatilitate și de interacțiile intermoleculare, fiecare component fiind caracterizat printr-un timp de retenție specific.

După separare, compușii sunt introduși în spectrometrul de masă, unde sunt ionizați, accelerați și separați în funcție de raportul masă/sarcină. Ionizarea, de regulă prin impact electronic (≈ 70 eV), generează ioni moleculari detectabili, permițând identificarea structurală a compușilor. $M + e^- \rightarrow M^{+\bullet} + 2e^-$ (2)

Ionul molecular format este de obicei instabil și suferă procese de fragmentare, generând ioni secundari caracteristici. Aceste fragmente reflectă structura moleculei și constituie baza identificării compușilor. Procesul de

ionizare implică transferul de energie cinetică de la electroni la molecule, depășind energia de ionizare a acestora. Fragmentarea ulterioară este determinată de distribuția energiei interne și de stabilitatea fragmentelor rezultate.

Ionii formați sunt ulterior accelerați și separați în funcție de raportul masă-sarcină (m/z) utilizând un analizor de masă (de exemplu cuadrupol, sau capcană de ioni). Separarea ionilor se bazează pe mișcarea acestora într-un câmp electric oscilant sau static, traiectoriile fiind determinate de ecuațiile de mișcare ale particulelor încărcate. Mișcarea ionilor este guvernată de legile electromagnetismului, în special de forța Lorentz: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ (3)

unde q este sarcina ionului, $\vec{E}$ câmpul electric și $\vec{B}$ câmpul magnetic.

În spectrometrele de tip cuadrupol, frecvent utilizate în GC-MS, separarea ionilor se realizează prin aplicarea unor câmpuri electrice oscilante, care permit trecerea doar a ionilor cu un anumit raport m/z stabil. Aceștia ajung la detector, în timp ce ceilalți sunt deviați sau eliminați. Această selecție se bazează pe stabilitatea traiectoriei ionilor într-un câmp electric variabil. Ionii rezultați sunt detectați prin intermediul unui detector (de exemplu, multiplicator de electroni), care transformă impactul ionilor într-un semnal electric proporțional cu numărul acestora. Rezultatul este un spectru de masă, care reprezintă intensitatea ionilor în funcție de raportul m/z .

Un spectru de masă GC-MS furnizează informații despre structura moleculară a compușilor analizați. Ionul molecular (M^+) indică masa moleculară, iar ionii fragmentari reflectă căile de fragmentare, determinate de stabilitatea electronică și energia de legătură. Acest tipar de fragmentare permite identificarea compușilor prin compararea cu biblioteci spectrale (Beale și colab., 2018).

Pregătirea probei este necesară pentru compatibilitatea cu analiza GC–MS, care vizează compuși volatili și termostabili. Aceasta include extracția analiților, eliminarea interferențelor și, dacă este necesar, derivatizarea compușilor polari pentru creșterea volatilității. Extracția se realizează cu solvenți adecvați polarității (hexan, diclorometan, metanol) sau prin metode moderne precum SPE și SPME. Derivatizarea (silylare, metilare) transformă grupările polare în derivați mai stabili și mai ușor analizabili.

Proba finală trebuie să fie limpede și omogenă, filtrată și, dacă este necesar, concentrată. Analiza cantitativă se bazează pe curbe de calibrare care corelează aria vârfurilor cromatografice cu concentrația. După injectare, compușii sunt identificați pe baza timpului de retenție, a raportului m/z și a bazelor de date, iar cuantificarea se realizează prin compararea ariilor cu standardele.

GC–MS oferă sensibilitate și selectivitate ridicate, fiind adecvată pentru analiza amestecurilor complexe. Limitările includ restricția la compuși volatili și necesitatea derivatizării pentru anumiți analiți. De asemenea, ionizarea prin impact electronic poate produce fragmentare extinsă.

Tehnica este utilizată în agricultură (analiza metaboliților și pesticidelor), industria alimentară (profil aromatic, autentificare) și domeniul mediului (monitorizarea poluanților). În studiul materialelor vegetale, GC–MS este aplicată pentru caracterizarea compușilor volatili din scoarță și oleorezine, inclusiv pentru specii precum *Larix decidua*, evidențiind diferențe chimice și funcționale între proveniențe.

1.3 Utilizarea metodelor fizice în studiul germinării și a viabilității celulare

Îmbunătățirea calității semintelor este un subiect abordat intens în literatura, datorită nevoii constante de creștere a rezilienței semintelor împotriva stresului și de creștere a eficacității germinării. În acest context, tot mai multe

studii arată că metodele fizice precum radiațiile ionizante și neionizante, câmpuri magnetice și electrice, microunde, lumină în infraroșu și ultraviolet, pot îmbunătăți germinația, vigoarea răsadurilor și toleranța la stres, (Araújo și colab., 2016; Bera și colab., 2022), Figura 1.4.

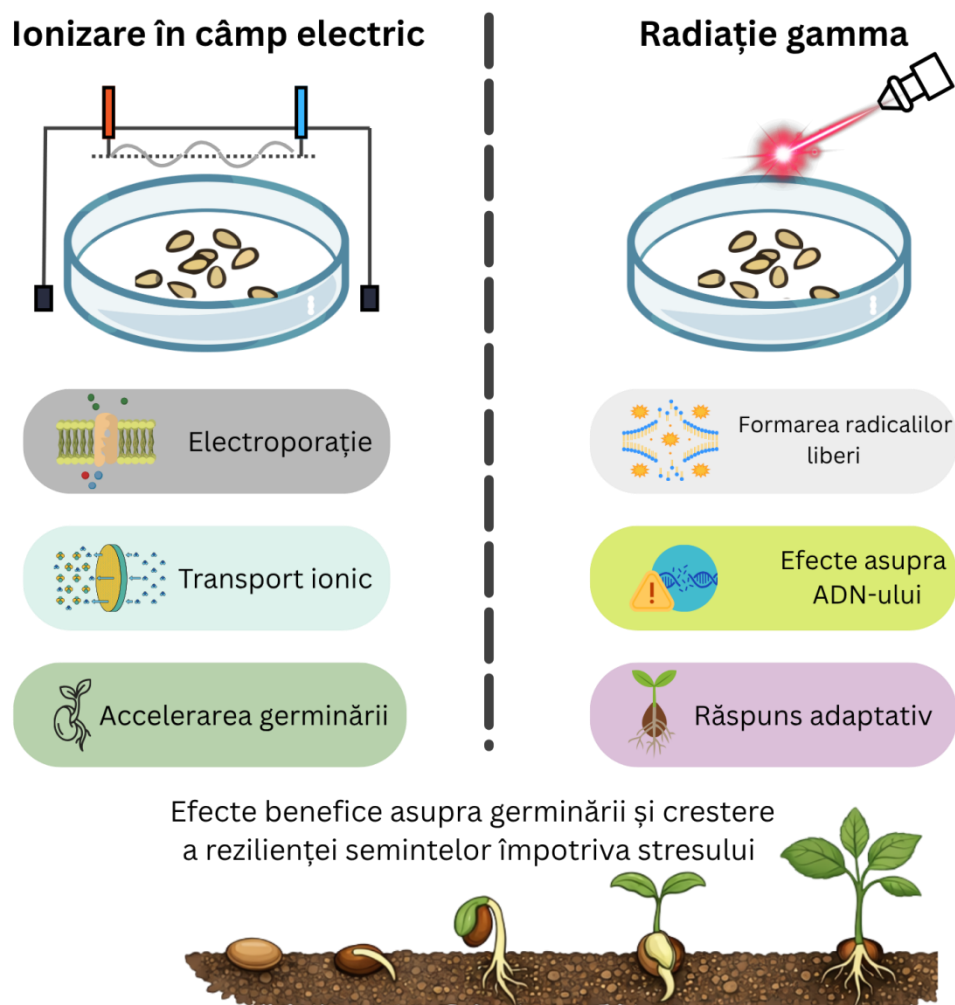


Figura 1.3. Efectele pe care ionizarea în câmpuri electrice și radiațiile gamma le induc asupra germinării semințelor cu scopul de a îmbunătăți calitățile plantelor.

Efectele tratamentelor fizice asupra calității semințelor pot fi analizate de la nivel morfo-structural până la modificări moleculare. Aceste tratamente se încadrează în conceptul de priming, unde doze reduse acționează ca un stres controlat, activând metabolismul pregerminativ, mecanisme antioxidante și procese de reparare a ADN-ului (Araújo și colab., 2016; Bera și colab., 2022).

Primingul convențional implică hidratarea controlată (hidroprimare, osmoprimare) pentru îmbunătățirea germinării și a toleranței la stres abiotic. Totuși, limitările legate de costuri, depozitare și impact asupra mediului au condus la dezvoltarea metodelor fizice, precum câmpurile electrice, radiațiile γ și X, UV și microundele.

Câmpurile electrice acționează asupra sarcinilor și dipolilor, inducând polarizare și modificări ale potențialului transmembranar, fără ionizare. În schimb, radiațiile gamma sunt ionizante, cu energie ridicată, capabile să producă modificări structurale la nivel molecular. Astfel, cele două tipuri de tratamente operează în regimuri energetice diferite.

Câmpurile electrice permit control precis al parametrilor și efecte reversibile, fiind utilizate pentru stimularea germinării și menținerea viabilității. Iradierea gamma implică efecte cumulative, fiind utilizată mai ales pentru mutageneză sau sterilizare; la doze mici poate induce efecte stimulative, dar cu risc crescut de alterare genomică.

1.3.1 Mecanisme fizice implicate în stimularea germinării utilizând câmpuri electrice

Din punct de vedere fizic, procesele biologice fundamentale, precum viabilitatea celulară și germinarea semințelor, sunt guvernate de multiple fenomene fizice, iar aplicarea câmpurilor electrice asupra sistemelor biologice (semințe) reprezintă o abordare interdisciplinară situată la interfața dintre fizică și biologie, oferind un instrument non-chimic pentru modularea acestor procese. Câmpurile electrice pot influența distribuția sarcinilor electrice, potențialele de membrană și transportul ionic, procese esențiale pentru menținerea viabilității celulare și inițierea germinării.

Un câmp electric este un câmp de forță care înconjoară o particulă încărcată (Griffiths și Nilson, 1999), fiind descris ca forța exercitată asupra unei sarcini electrice unitare, definit prin ecuația (4): $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ (4)

unde $\vec{F}$ este forța electrică, iar q sarcina electrică. În mediile biologice, câmpurile electrice interacționează cu sarcinile libere, dipolii și structurile polare, determinând redistribuirea acestora.

Din punct de vedere biofizic, celulele vegetale și semințele pot fi considerate sisteme dielectric–conductive eterogene, în care membranele celulare acționează ca straturi dielectrice subțiri, separate de medii conductoare reprezentate de citoplasmă și mediul extracelular. Aplicarea unui câmp electric extern conduce la polarizarea acestor structuri, determinând apariția unui potențial electric transmembranar suplimentar, ecuația (5): $\Delta V = f \cdot E \cdot r$ (5)

unde E este intensitatea câmpului electric, r raza celulei, iar f un factor dependent de geometrie.

Depășirea unui prag de potențial transmembranar (~0,5–1 V) determină creșterea permeabilității membranei prin formarea de pori tranzitorii (electroporație). În regim controlat, fenomenul este reversibil și facilitează schimburile ionice fără afectarea integrității celulare, fiind relevant pentru stimularea germinării.

La nivelul semințelor, câmpurile electrice influențează hidratarea, activarea enzimatică și diviziunea celulară prin modificarea distribuției ionilor (Ca^{2+} , K^+ , H^+) și a fluxurilor transmembranare. De asemenea, pot induce electroosmoză și electroforeză, favorizând transportul apei și nutrienților către embrion.

Modificarea potențialului de repaus și a activității proteinelor membranare (canale ionice, pompe) conduce la accelerarea activării metabolice și reducerea

latenței germinării. Astfel, câmpul electric acționează ca un stimul fizic controlat, fără aport de substanțe chimice.

Avantajele includ controlul precis al parametrilor (intensitate, durată, frecvență), caracterul non-invaziv și lipsa reziduurilor, fiind compatibile cu aplicații în agricultură durabilă. Experimental, s-au observat creșteri ale ratei de germinare, uniformității emergenței și viabilității.

Limitările apar la depășirea pragurilor critice, când electroporația devine ireversibilă, afectând integritatea celulară. Răspunsul depinde de specie și condițiile experimentale, iar interpretarea rezultatelor poate fi influențată de efecte secundare, precum încălzirea Joule.

1.3.2 Utilizarea radiației gamma în studiul germinării semințelor

Radiațiile gamma (γ) sunt radiații electromagnetice de înaltă energie, cu lungimi de undă foarte mici ($<10^{-11}$ m) și energii în domeniul keV–MeV, provenite din procese nucleare. Nu au masă sau sarcină electrică și prezintă o putere mare de penetrare.

Interacțiunea cu materia are loc prin trei mecanisme principale: efectul fotoelectric, efectul Compton și producerea de perechi electron–pozitron. Aceste procese conduc la ionizare și la generarea de electroni secundari. În sistemele biologice, radiația produce radioliza apei, generând specii reactive de oxigen (ROS), responsabile pentru oxidarea biomoleculelor și afectarea structurilor celulare.

Efectele biologice depind de doza absorbită (Gy). La doze scăzute poate apărea un răspuns adaptativ (hormezis), în timp ce dozele ridicate produc efecte citotoxice. În cazul semințelor, dozele reduse pot stimula germinarea și toleranța la stres, dacă parametrii de iradiere sunt controlați.

Un parametru important în caracterizarea interacțiunii radiației cu materia este coeficientul de atenuare liniară, care descrie probabilitatea de absorbție sau

împrăștiere a fotonilor pe unitatea de lungime. Atenuarea radiației gamma într-un material urmează o lege exponențială, ecuația (6): $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ (6)

unde I_0 este intensitatea inițială, I intensitatea transmisă, μ este coeficientul de atenuare liniară, iar x este grosimea materialului. Această relație evidențiază capacitatea ridicată de penetrare a radiațiilor gamma și necesitatea utilizării materialelor dense (precum plumbul) pentru ecranare eficientă.

În contextul sistemelor biologice, iradierea cu raze gamma reprezintă o metodă de stimulare fizică bazată pe utilizarea radiației electromagnetice ionizante de energie înaltă, capabilă să interacționeze profund cu structurile biologice. Radiațiile gamma sunt utilizate atât pentru sterilizare și inducerea mutațiilor, cât și pentru studierea răspunsurilor celulare la stresul oxidativ. În cazul semințelor, iradierea cu doze mici poate stimula procesele de germinare prin activarea mecanismelor de reparare și creșterea activității metabolice, în timp ce dozele mari conduc la deteriorarea ADN-ului și inhibarea dezvoltării. Astfel, înțelegerea mecanismelor fizice ale interacțiunii radiației gamma cu materia este esențială pentru utilizarea controlată a acesteia în aplicații biologice și agricole.

2 Material biologic și sistemul experimental

Alegerea sistemului experimental în studiile asupra biomaterialelor vegetale este determinată de interacțiunea dintre structura moleculară și factorii fizici externi. Materialele vegetale sunt sisteme heterogene, alcătuite din polimeri naturali (celuloză, hemiceluloze, lignină) și compuși secundari, caracterizate prin proprietăți dielectrice și structurale care influențează modul de absorbție, distribuție și transformare a energiei la nivel molecular.

În contextul schimbărilor climatice și al presiunii asupra ecosistemelor forestiere, optimizarea germinării semințelor devine o direcție relevantă. Metodele fizice de tratament oferă avantaje față de cele convenționale prin controlul precis al parametrilor și impactul redus asupra mediului (Danek și colab., 2022). Specia *Larix decidua* constituie un model experimental adecvat datorită importanței ecologice și variabilității răspunsului germinativ în funcție de proveniență. Semințele acestei specii pot fi considerate sisteme fizice complexe, în care procesele de germinare sunt influențate de transferul de energie și de dinamica interacțiunilor moleculare.

Câmpurile electrice și electromagnetice interacționează cu biomaterialul prin polarizare și redistribuția sarcinilor, determinând modificări ale proprietăților membranare și ale transportului ionic. Aceste efecte depind de intensitatea, frecvența și durata expunerii. Radiațiile gamma, prin caracterul lor ionizant, produc procese de excitație și ionizare la nivel molecular, generând modificări structurale și funcționale dependente de doza absorbită.

Caracterizarea fizico-chimică a materialului vegetal este realizată prin metode complementare. Spectroscopia FT-IR permite evidențierea modificărilor structurale la nivelul grupărilor funcționale, iar tehnica GC-MS oferă informații detaliate privind compoziția chimică și stabilitatea compușilor. Integrarea acestor

metode permite corelarea dintre structura moleculară, transferul de energie și răspunsul biologic.

Scopul lucrării este investigarea influenței câmpurilor fizice asupra germinării semințelor de *Larix decidua*, prin evaluarea efectului parametrilor de tratament și identificarea condițiilor optime de stimulare. Abordarea propusă urmărește corelarea parametrilor fizici măsurabili cu răspunsurile biologice, contribuind la dezvoltarea unor strategii eficiente și sustenabile pentru regenerarea forestieră

2.1 Sistematica și caracteristicile morfologice ale speciei *Larix decidua*

Specia *Larix decidua* Mill. aparține subîncregăturii gimnospermelor, grup de plante lemnoase caracterizate prin prezența semințelor neacoperite și prin dezvoltarea conurilor ca organe de reproducere. Din punct de vedere taxonomic, această specie este încadrată în familia Pinaceae, una dintre cele mai importante familii de plante lemnoase din emisfera nordică, care include numeroase specii cu valoare economică ridicată.

Clasificarea sistematică a speciei:

Subîncregătura: Gymnospermae

Clasa: Coniferopsida

Ordinul: Coniferales

Familia: Pinaceae

Genul: *Larix*

Specia: *Larix decidua* Mill.

Familia Pinaceae include arbori rășinoși cu tulpină monopodială și frunze aciculare, iar lemnul este alcătuit predominant din traheide. Un element distinctiv al genului *Larix* este caracterul caduc al acelor, adaptare care reduce pierderile de apă în sezonul rece.

Genul *Larix* cuprinde aproximativ 10–15 specii răspândite în emisfera nordică, precum *Larix sibirica*, *Larix occidentalis* sau *Larix kaempferi*. Specia *Larix decidua* este specifică regiunilor montane din Europa centrală (Alpi, Carpați) și este utilizată frecvent în plantații forestiere datorită calității lemnului (Holonec și Truta, 2015).

Din punct de vedere ecologic, este adaptată climatului montan, cu temperaturi scăzute și variații sezoniere accentuate. Arborii pot atinge 40–50 m înălțime, având tulpină dreaptă și coroană piramidală relativ rară, care permite pătrunderea luminii.

Sistemul radicular este pivotant în stadiile timpurii, devenind ulterior ramificat, adaptat condițiilor de sol. Scoarța evoluează de la netedă la ritidom gros, conținând taninuri și compuși fenolici ($\approx 7\text{--}16\%$), responsabili pentru proprietăți antioxidante.

Lemnul este dens, rezistent la umiditate și bogat în canale rezinifere, conținând compuși terpenici ce pot fi analizați prin FT-IR și GC-MS. Lujerii sunt de două tipuri: lungi, subțiri, și scurți, mai groși, cu muguri bine dezvoltați.



Figura 2.1. *Larix decidua* a) tulpină cu scoarță; b) secțiune de lemn.

Mugurii au o formă aproape sferică și sunt acoperiți de solzi protejați de un strat subțire de rășină, care contribuie la protecția împotriva factorilor de mediu (Holonec și Truta, 2015).

Frunzele sunt aciculare, moi și caduce, cu lungimi de 1–3 cm, dispuse spiralat pe lujerii lungi și în fascicule (30–40 ace) pe lujerii scurți (Figura 2.2.). Toamna, acestea devin galben-aurii înainte de cădere, contribuind la formarea materiei organice în sol (Danek și colab., 2022).

Larix decidua este o specie monoică, cu flori unisexuate: cele masculine sub formă de amenți galbeni, iar cele feminine ovoid-sferice, de culoare roșiatică sau violacee (Figura 2.2.). Înflorirea are loc primăvara (aprilie–mai), concomitent cu apariția frunzelor.

Conurile sunt mici (3–4 cm), cu solzi imbricați, și pot rămâne pe arbore 2–4 ani după maturare. Semințele sunt mici, prevăzute cu aripioară pentru dispersie anemofilă (Figura 2.2.), iar un kilogram poate conține aproximativ 160 000 semințe (Teodosiu și colab., 2023).

Maturarea semințelor are loc în toamna primului an, iar germinația este relativ redusă (20–45%), ceea ce justifică utilizarea tratamentelor de stimulare.



Figura 2.2. *Larix decidua*, lujer cu frunze, conuri cu semințe și flori.

Longevitatea arborilor de larice este remarcabilă, exemplarele mature putând atinge vârste de 600–700 de ani în condiții favorabile de creștere. Stabilitatea structurală și rezistența biologică ridicată a acestei specii, împreună cu particularitățile morfologice și chimice ale țesuturilor vegetale, fac ca *Larix*

decidua să constituie un material biologic adecvat pentru studiul interacțiunilor dintre radiațiile electromagnetice, câmpurile fizice și biomaterialele vegetale, inclusiv în cercetări de tip fizico-chimic.

2.2 Proprietățile fizico-chimice ale scoarței de *Larix decidua*

Scoarța speciei *Larix decidua* poate fi considerată un material compozit natural, cu structură ierarhică și comportament dependent de compoziția chimică și de factorii externi (temperatură, radiație, câmpuri electrice) (Aleksandrova și Redzhinaldovich, 2021). Din punct de vedere fizic, aceasta este un sistem heterogen și anizotrop, ale cărui proprietăți (densitate, porozitate, polarizabilitate) variază în funcție de organizarea internă (Bianchini și colab., 2025).

Matricea este alcătuită din biopolimeri structurali: celuloză, hemiceluloză și lignină. Celuloza prezintă domenii semicristaline stabilizate prin legături de hidrogen, responsabile pentru rigiditate și moduri vibraționale bine definite (Frejaville și colab., 2013; Agarwal și colab., 2021). Hemiceluloza are structură amorfă și contribuie la flexibilitate și la răspunsul la variații energetice (Cáceres și colab., 2018). Lignina, polimer aromatic tridimensional, are polarizabilitate ridicată și un rol important în interacțiunea cu radiația electromagnetică și disiparea energiei (Wagner și colab., 2015; Vangeel și colab., 2023).

Scoarța conține și compuși extractivi (taninuri, fenoli, terpene), care influențează proprietățile fizico-chimice prin mobilitate ridicată și prezența grupărilor polare ($-OH$, $C=O$), afectând răspunsul dielectric și spectroscopic (Baldan și colab., 2017).

Comportamentul termic depinde de stabilitatea componentelor: la temperaturi moderate apar procese reversibile (reorganizări structurale, redistribuirea compușilor), iar la temperaturi ridicate apar procese ireversibile (degradare, oxidare) (Sillero și colab., 2018; Bianchi și colab., 2015). Frațiunea

extractivă este cea mai sensibilă termic, ceea ce se reflectă în modificări detectabile prin FT-IR și GC-MS.

În câmpuri electrice, materialul prezintă polarizare dielectrică și redistribuție de sarcini, dependente de frecvență și temperatură (Kain și colab., 2018). În cazul radiațiilor electromagnetice, absorbția are loc prin excitații vibraționale, în special în domeniul infraroșu, permițând caracterizarea structurii moleculare (Tumenjargal și colab., 2020).

Astfel, scoarța de *Larix decidua* reprezintă un sistem fizico-chimic complex, în care proprietățile macroscopice rezultă din interacțiunea dintre structură și factorii energetici externi.

2.3 Compoziția chimică a scoarței și relevanța pentru analiza spectroscopică

Analiza spectroscopică a biomaterialelor se bazează pe interacțiunea dintre radiația electromagnetică și structura moleculară, generând tranziții energetice specifice. În cazul scoarței de *Larix decidua*, compoziția complexă determină un răspuns spectral caracteristic, fiecare bandă IR fiind asociată unor vibrații moleculare definite (Baldan și colab., 2017).

În domeniul infraroșu, absorbția este corelată cu vibrațiile legăturilor chimice, dependente de masa atomică și constanta de forță. Spectrul FT-IR al materialelor lignocelulozice reflectă contribuțiile celulozei, hemicelulozei, ligninei și compușilor extractivi (Kain și colab., 2018). Astfel, banda largă din jurul valorii de 3400 cm^{-1} este asociată vibrațiilor grupărilor hidroxil și rețelelor de legături de hidrogen, fiind sensibilă la modificări structurale și la gradul de hidratare. În jurul valorii de 2900 cm^{-1} apar vibrațiile C–H ale lanțurilor alifatice, în timp ce regiunea $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ este caracteristică grupărilor carbonil, influențate de procese de oxidare sau transformări chimice. De asemenea, intervalul $1500\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ reflectă vibrațiile nucleelor aromatice din lignină, iar

zona 1000–1200 cm^{-1} este asociată structurii polizaharidice, oferind informații despre organizarea celulozei și hemicelulozei.

Interpretarea spectrelor FT-IR este completată de analiza GC-MS, care permite identificarea compușilor individuali. Corelarea acestor metode facilitează interpretarea modificărilor structurale și energetice, precum reorganizarea legăturilor de hidrogen sau transformările chimice induse.

Astfel, spectroscopia IR oferă atât informații despre compoziția chimică, cât și despre starea energetică și comportamentul fizic al biomaterialului la nivel molecular.

3 Metodologia experimentală

Metodologia experimentală a fost concepută pentru investigarea relației dintre proprietățile fizico-chimice ale biomaterialului vegetal și răspunsul biologic la acțiunea unor factori fizici externi, în condiții controlate de laborator. Abordarea se bazează pe interacțiunea radiației cu materia, analizând modul în care diferite forme de energie influențează structura moleculară și procesele de germinare. Conceptual, studiul urmărește transferul de energie către sistemul biologic și efectele acestuia la nivel molecular, subcelular și fiziologic, permițând corelarea parametrilor fizici (intensitate, durată, doză, frecvență) cu răspunsul biomaterialului.

Designul experimental a fost structurat pe două direcții (Figura 3.1). Prima a vizat caracterizarea fizico-chimică a scoarței de *Larix decidua* prin FT-IR, pentru analiza grupărilor funcționale, și GC-MS, pentru identificarea compușilor volatili. A doua direcție a evaluat efectele câmpurilor fizice asupra germinării semințelor, utilizând tratamente cu câmp electric, câmp magnetic și radiații gamma.

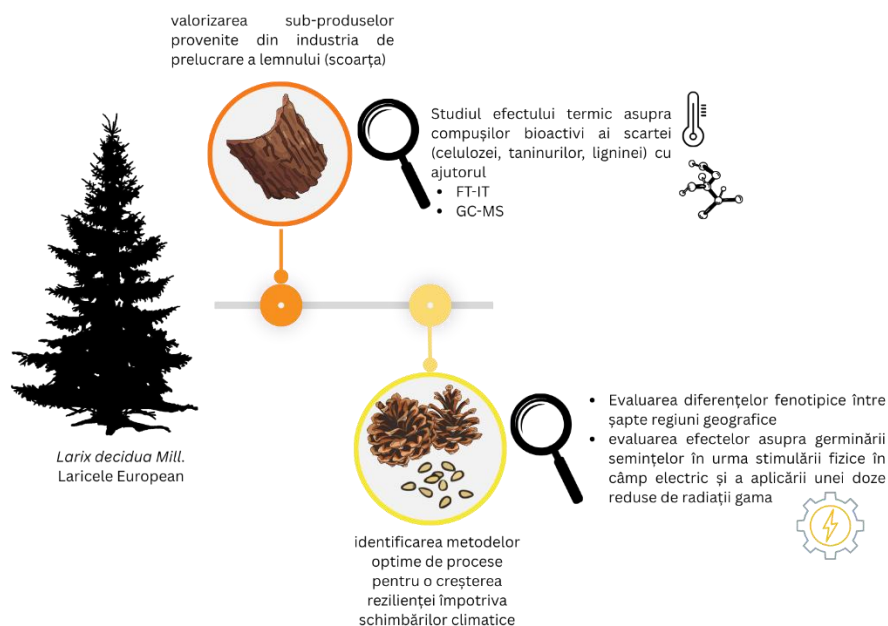


Figura 3.1. Direcțiile experimentale ale tezei de doctorat.

Prin integrarea acestor două direcții experimentale, metodologia permite stabilirea unor corelații între modificările structurale și compoziționale ale biomaterialului, evidențiate prin metode fizico-chimice, și răspunsul biologic al semințelor, exprimat prin parametrii germinativi. Această abordare multidisciplinară oferă un cadru coerent pentru analiza relației dintre factorii fizici aplicați și dinamica proceselor biologice, contribuind la înțelegerea mecanismelor prin care energia fizică modulează funcționarea sistemelor vegetale.

3.1 Originea materialului biologic

Materialul biologic a fost reprezentat de șapte clone ale speciei *Larix decidua* Mill., provenite din diferite zone din România: Gura Humorului, Brașov (Valea Cetății), Săcele, Brașov (Valea Popii), Sinaia, Anina și Latorița (Figura 3.2.). Clonele provin din arbori plus selectați pentru caracteristici fenotipice superioare, fiind obținute prin altoire și cultivate în plantajul semincer Baci (Cluj-Napoca) începând cu anul 1975.

Pentru analizele fizico-chimice s-a utilizat scoarță de larice, iar pentru studiile de germinare s-au folosit semințe supuse tratamentelor cu câmp electric și radiații gamma. Proveniențele acoperă un gradient ecologic de la zone mai joase și mai calde la regiuni montane reci, permițând interpretarea variabilității biologice.

Pentru fiecare proveniență au fost selectați 10 arbori sănătoși. Scoarța a fost recoltată la 1,3 m (Figura 3.3. a, b), apoi depozitată în condiții controlate și transportată la laborator. Probele au fost colectate în perioada de vegetație activă, pentru a asigura stabilitatea compoziției chimice.

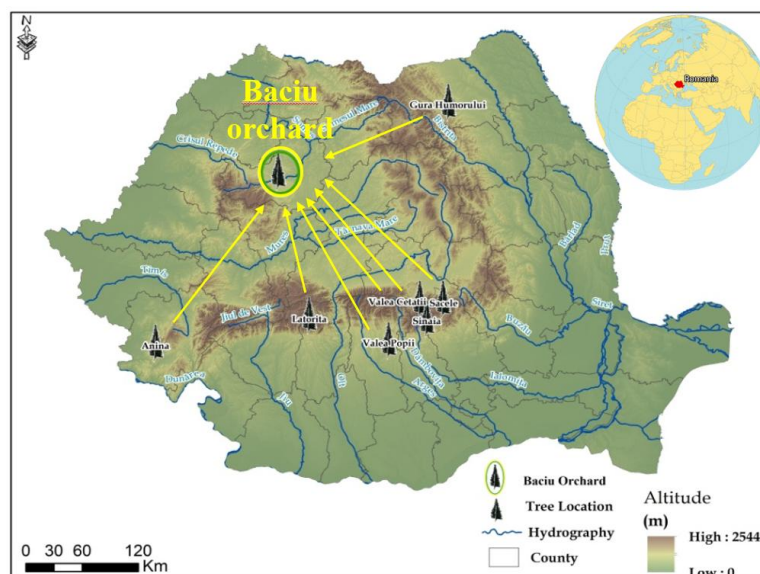


Figura 3.2. Localizarea proveniențelor de origine ale laricelui și a plantajului semincer Bacia.

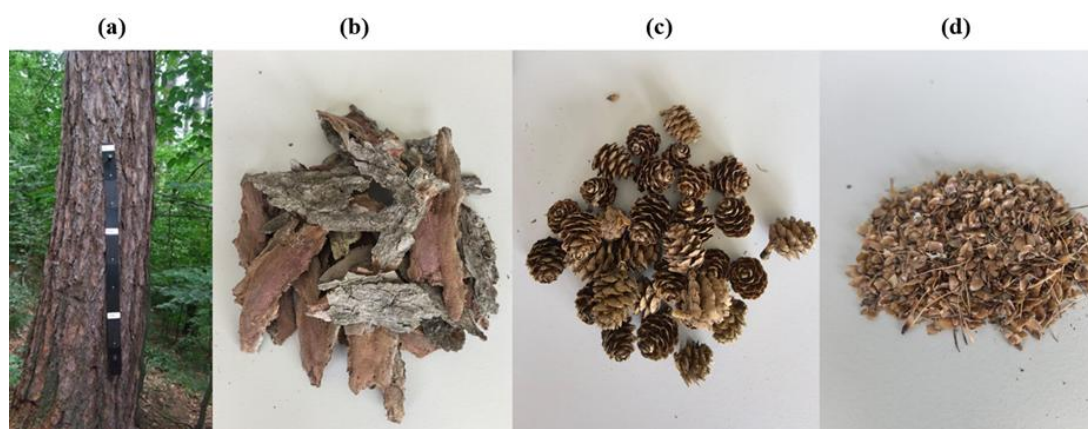


Figura 3.3. Prelevarea și pregătirea materialului biologic de *Larix decidua*: (a) recoltarea scoarței la nivelul trunchiului (1,3 m); (b) fragmente de scoarță; (c) conuri mature; (d) semințe extrase din conuri.

Pentru reducerea variabilității intra-proveniență, probele de scoarță din același grup clonal au fost omogenizate, obținându-se câte un eșantion compozit pentru fiecare proveniență. Această abordare a asigurat atât cantitatea necesară de material, cât și reprezentativitatea biochimică a fiecărei origini.

Materialul semincer utilizat pentru germinare a fost obținut din conuri recoltate de la arbori maturi (~50 ani) din aceleași proveniențe. Conurile au fost uscate la 20–25°C, iar semințele au fost extrase manual și utilizate în experimente (Figura 3.3. c, d).

3.2 Prepararea scoarței de larice pentru tehnica FT-IR și GC-MS

Probele de scoarță au fost prelucrate pentru a asigura omogenitatea și reproductibilitatea analizelor. Uscarea s-a realizat la patru regimuri: martor, 60°C, 80°C și 100°C, timp de 2 ore. Aceste temperaturi permit eliminarea apei, reorganizarea legăturilor de hidrogen și mobilizarea compușilor volatili, fără degradarea majoră a componentelor structurale (Ruiz-Aquino și colab., 2023; Morar și colab., 2024).

Ulterior, probele au fost măcinate (Retsch Grindomix GM 200) și sitate sub 300 μm . Reducerea dimensiunii particulelor crește suprafața specifică, îmbunătățește extracția (GC-MS) și asigură o interacțiune uniformă cu radiația infraroșie (FT-IR), reducând efectele de dispersie.

3.2.1 Tehnica FT-IR folosită pentru investigarea scoarței de larice

Spectroscopia FT-IR este o metodă utilizată pentru investigarea structurii moleculare, bazată pe interacțiunea radiației infraroșii cu materia și pe transformata Fourier a semnalului măsurat. Absorbția radiației are loc atunci când energia acesteia corespunde tranzițiilor vibraționale ale legăturilor chimice, generând benzi caracteristice în spectru (Gierlinger și colab., 2004). Tehnica este frecvent utilizată pentru analiza biomaterialelor lignocelulozice datorită capacității de identificare a grupărilor funcționale.

În acest studiu, FT-IR a fost utilizată pentru caracterizarea chimică a scoarței de larice. Probele au fost preparate prin amestecarea a aproximativ 3 mg pulbere de scoarță cu 200 mg KBr calcinat, urmată de omogenizare și presare sub formă de pastile transparente cu ajutorul unei prese hidraulice (Specac Ltd., Marea Britanie).

Din punct de vedere fizic, legăturile chimice pot fi modelate ca sisteme oscilatorii, în care atomii vibrează în jurul pozițiilor de echilibru. Frecvența vibrațiilor depinde de masa atomilor și de rigiditatea legăturii, ceea ce permite

corelarea benzilor FT-IR cu tipul legăturilor chimice. În biomateriale precum scoarța de *Larix decidua*, vibrațiile grupărilor O-H, C=O și C-H generează un spectru complex, sensibil la interacțiuni intermoleculare, în special legături de hidrogen (Piqueras și colab., 2020).

Spectrele FT-IR au fost înregistrate cu un spectrometru Jasco FT/IR 4100 (JASCO, Japonia), în domeniul $4000\text{--}350\text{ cm}^{-1}$, cu rezoluție de 4 cm^{-1} și 256 scanări. Regiunile spectrale permit evidențierea polizaharidelor, ligninei și compușilor extractivi, iar zona „amprentă” conține informații specifice structurii globale.

Tehnica FT-IR utilizează un interferometru Michelson, care înregistrează simultan toate frecvențele sub formă de interferogramă, ulterior transformată prin transformata Fourier în spectru de absorbție. Această metodă asigură precizie ridicată și raport semnal/zgomot superior.

Probele solide au fost analizate sub formă de pastile KBr, obținute din pulbere fină dispersată într-o matrice transparentă în IR. Controlul dimensiunii particulelor și omogenitatea sunt necesare pentru obținerea unor spectre reproductibile.

Datele au fost prelucrate cu Spectra Manager (Jasco) și analizate în OriginLab, prin corecția liniei de bază și ajustarea vârfurilor. Interpretarea s-a realizat prin corelare cu literatura de specialitate (Vârban și colab., 2021; Morar și colab., 2024).

FT-IR oferă o imagine globală asupra structurii chimice, însă, datorită suprapunerii benzilor, este utilizată complementar cu GC-MS. În acest studiu, metoda permite evidențierea modificărilor structurale ale scoarței în funcție de proveniență și tratamentele aplicate.

3.2.2 Spectrometria GC-MS utilizată pentru caracterizarea scoarței de larice

Pentru analiza compușilor volatili și semivolatili din scoarța de larice a fost utilizată tehnica GC-MS, care combină separarea cromatografică cu identificarea

structurală, fiind adecvată pentru investigarea fracțiilor lipofile, neaccesibile prin FT-IR.

Probele au fost uscate, măcinate și sitate sub 400 μm , pentru creșterea suprafeței specifice și eficientizarea extracției. Aproximativ 3 g de pulbere au fost supuse extracției ultrasonice (UAE) cu 5 mL diclorometan, utilizând o baie ultrasonică (40 kHz; 135 W). Procesul se bazează pe cavitație acustică, care favorizează ruperea structurilor celulare și eliberarea compușilor.

Diclorometanul a fost ales pentru capacitatea de a extrage compuși lipofili (terpenoide, acizi grași). Pentru a evita pierderile de compuși volatili, extracția a fost realizată la 0–5°C. Ulterior, probele au fost centrifugate (10.000 rpm, 10 min), iar supernatantul a fost colectat pentru analiză.

Analizele GC-MS au fost efectuate cu un sistem Shimadzu QP 2010 PLUS, echipat cu autosampler. Separarea s-a realizat pe coloană capilară ZB-5MS Plus (30 m $\times$ 250 μm $\times$ 0,25 μm), adecvată pentru compuși organici volatili și semivolatili.

Programul de temperatură al cuptorului a fost optimizat pentru separarea compușilor cu volatilități diferite: 40 °C (2 min), urmat de creștere cu 20 °C/min până la 300 °C, cu menținere finală de 5 min. Acest profil permite eluția compușilor de la cei foarte volatili până la cei cu masă moleculară mare, asigurând cromatograme bine rezolvate.

Injectarea s-a realizat în mod splitless, la 250 °C, utilizând heliu ca gaz purtător (0,8 mL/min). Acest mod permite introducerea integrală a probei, fiind adecvat pentru analiți în concentrații reduse.

După separare, compușii au fost analizați prin spectrometrie de masă, utilizând ionizare prin impact electronic (70 eV), care generează fragmente caracteristice fiecărui compus. Ionii au fost detectați în intervalul m/z 35–800, iar temperatura sursei a fost 220 °C. Identificarea s-a realizat prin compararea

spectrelor cu bibliotecile NIST și Wiley, utilizând și timpii de retenție pentru confirmare.

Tehnica GC-MS permite identificarea și cuantificarea compușilor volatili și semivolatili din scoarța de *Larix decidua*, completând informațiile obținute prin FT-IR.

3.3 Influența câmpurilor electrice, electromagnetice și a radiațiilor gamma asupra proceselor de germinare la semințele de *Larix decidua*

Germinarea semințelor de *Larix decidua* tratate cu câmp electric, câmp electromagnetic și radiații gamma a fost analizată în corelație cu caracteristicile morfometrice ale conurilor și semințelor. Au fost determinate masa și dimensiunile conurilor, numărul de semințe/con, precum și masa și dimensiunile semințelor, parametri asociați cu viabilitatea și potențialul germinativ.

Determinările au fost realizate cu balanță analitică și șubler digital, pe eșantioane reprezentative pentru fiecare proveniență. Datele au fost corelate cu capacitatea de germinare (%) pentru a evidenția relațiile dintre parametrii morfometrici și răspunsul la tratamentele fizice, permițând identificarea unor dependențe între dimensiunea semințelor și sensibilitatea la stimuli.

Analizele au respectat standardele International Seed Testing Association și ghidurile Food and Agriculture Organization, asigurând rigurozitate și comparabilitate. Rezultatele au fost exprimate ca valori medii, însoțite de indicatori statistici, pentru evaluarea variabilității și interpretarea influenței provenienței și a tratamentelor asupra germinării.

3.3.1 Efectul tratamentelor în câmp electric asupra germinării semințelor

Influența câmpurilor electrice asupra germinării semințelor de *Larix decidua* a fost investigată în Laboratorul de Biofizică al Universității de Științe Agricole și Medicină Veterinară din Cluj-Napoca, utilizând un sistem format din doi electrozi cu distanță reglabilă, conectați la o sursă de tensiune variabilă.

Aplicarea câmpurilor electrice asupra semințelor de *Larix decidua* se bazează pe interacțiunea dintre câmpul electric extern și structurile biologice încărcate electric, în special membranele celulare și sistemele enzimatic implicate în inițierea germinării. Din punct de vedere fizic, câmpul electric este caracterizat prin intensitatea sa, definită ca raportul dintre tensiunea aplicată și distanța dintre electrozi ($E=U/d$), ceea ce permite cuantificarea exactă a stimulului aplicat semințelor. În condițiile experimentale utilizate, în care distanța dintre electrozi a fost de 7,3 cm, valorile tensiunilor aplicate (10 V, 30 V și 50 V) au generat câmpuri electrice de intensitate redusă, dar suficiente pentru a induce modificări biofizice la nivel celular fără a produce efecte distructive.

Experimentul s-a desfășurat în condiții controlate, cu electrozi circulari ($\varnothing$ 26 cm) dispuși paralel. Semințele au fost poziționate între electrozi, într-un câmp uniform, fără contact direct, pentru a evita descărcările electrice. Controlul tensiunii și al distanței a asigurat reproducibilitatea și comparabilitatea rezultatelor.

Designul experimental a fost factorial, analizând două variabile: intensitatea câmpului electric și durata de expunere. Au fost testate trei niveluri de tensiune (10, 30 și 50 V) și trei durate (15, 35 și 60 min), rezultând nouă variante, plus martorul. Această abordare permite evaluarea efectelor individuale și a interacțiunii dintre factori.

La nivel biofizic, câmpul electric modifică distribuția sarcinilor la nivelul membranei, crescând permeabilitatea și facilitând transportul ionic. Acest efect

acelerează imbibitia și activarea metabolismului embrionar. În paralel, este stimulată activitatea enzimatică (amilaze, proteaze, lipaze), favorizând mobilizarea rezervelor.

Modificările potențialului electric celular influențează și diviziunea și alungirea celulară, contribuind la o dezvoltare mai rapidă a radiclei. Efectele au fost evaluate prin parametri de germinare (procent, energie germinativă, timp mediu, uniformitate), conform standardelor International Seed Testing Association.

Rezultatele, exprimate ca valori medii, au evidențiat relația dintre parametrii fizici și răspunsul biologic. Tratamentul cu câmp electric se evidențiază ca o metodă eficientă și reproductibilă de stimulare a germinării, fără utilizarea substanțelor chimice.

3.3.2 Efectul câmpului electromagnetic (CEM) asupra germinării semințelor

Efectul câmpului electromagnetic asupra germinării semințelor de *Larix decidua* a fost investigat în condiții controlate la Institutul Ioan Ursu, Facultatea de Fizică, Universitatea Babeș-Bolyai. S-a utilizat o configurație de tip Helmholtz, formată din două bobine circulare identice, dispuse coaxial la o distanță egală cu raza lor, pentru generarea unui câmp magnetic uniform. Această configurație asigură o inducție aproape constantă în zona centrală, permițând expunerea omogenă a semințelor și eliminarea variațiilor spațiale ale câmpului, care ar putea influența răspunsul germinativ.

Câmpul electromagnetic a fost generat prin alimentarea bobinelor cu curent continuu (0,680 A), obținându-se o inducție magnetică de 0,4 mT în zona centrală. Această valoare se încadrează în domeniul câmpurilor slabe, cunoscute pentru efecte stimulative fără impact negativ asupra structurii celulare.

Semințele de *Larix decidua*, selectate pentru uniformitate, au fost plasate în zona de câmp uniform, într-un strat subțire, fără suprapunere, pentru a asigura

expunere egală. Protocolul a inclus un martor și trei variante cu durate diferite de expunere (10, 20 și 30 min), menținând constantă intensitatea câmpului pentru a evalua efectul duratei.

După tratament, semințele au fost germinate în condiții standard, conform International Seed Testing Association, iar parametrii de germinare au fost monitorizați zilnic. Pentru fiecare variantă s-au realizat repetiții, asigurând relevanța statistică.

Din punct de vedere fizic, câmpul electromagnetic influențează permeabilitatea membranelor și transportul ionic, facilitând imbibitia și activarea enzimatică. Diferențele observate între variante pot fi atribuite direct efectului câmpului aplicat.

3.3.3 Efectul tratamentelor cu radiații gamma asupra germinării semințelor

Iradieră semințelor a fost realizată în condiții controlate la Institutul Ioan Ursu, Facultatea de Fizică, Universitatea Babeș-Bolyai, utilizând un echipament Gamma Chamber 900 cu sursă de ^{60}Co . Configurația circulară a sursei (~900 Ci) asigură o distribuție uniformă a radiației și condiții experimentale reproductibile.

Radiațiile gamma emise de ^{60}Co sunt radiații electromagnetice de energie înaltă, cu putere mare de penetrare. Acestea produc procese de ionizare și excitație la nivel celular, afectând acizii nucleici, proteinele și membranele, cu impact asupra proceselor implicate în germinare.

În experiment au fost aplicate patru doze de iradiere (1, 1,5, 2 și 4 Gy), alături de un martor neiradiat. Intervalul a fost ales pentru evidențierea efectelor stimulative sau inhibitoare ale radiațiilor.

Semințele de *Larix decidua*, selectate pentru uniformitate, au fost plasate în camera de iradiere în condiții care au asigurat o expunere omogenă. Durata de expunere a fost ajustată în funcție de rata de doză pentru atingerea valorilor dorite.

După tratament, semințele au fost germinate în condiții standard conform International Seed Testing Association. Germinarea a fost monitorizată zilnic, iar emergența radiculei a fost considerată criteriu de germinare. Pentru fiecare variantă s-au realizat repetiții.

Evaluarea s-a realizat prin parametri specifici (procent de germinare, indice de germinare, energie germinativă, coeficientul vitezei), iar procentul final a fost determinat la 30 de zile. Rezultatele au permis compararea efectelor dozelor, evidențiind răspunsuri stimulative la doze reduse și inhibitoare la doze mai mari. Controlul parametrilor experimentali a permis atribuirea diferențelor observate efectului radiațiilor gamma.

3.4 Prelucrarea datelor și analizele statistice

Datele obținute din analizele FT-IR, GC-MS și experimentele de germinare au fost prelucrate statistic pentru evidențierea influenței factorilor experimentali. Rezultatele au fost exprimate ca medii aritmetice, iar variabilitatea a fost estimată prin eroarea standard (SEM).

Pentru analiza compoziției scoarței (FT-IR, GC-MS) s-a utilizat ANOVA multifactorială, evaluând efectele provenienței, temperaturii de uscare și interacțiunea acestora. Datele au fost testate pentru normalitate și omogenitatea varianțelor, iar diferențele semnificative au fost identificate prin testul Duncan ($\alpha < 0,05$). Pentru caracteristicile morfometrice și parametrii de germinare s-a aplicat ANOVA unifactorială, iar compararea mediilor s-a realizat prin testul Tukey ($\alpha = 0,05$).

Pentru evidențierea relațiilor dintre variabile au fost utilizate metode multivariate: PCA și analiza cluster ierarhică (HCA) pentru compoziția chimică, respectiv CCA pentru corelarea caracteristicilor semințelor cu germinarea. Rezultatele au fost reprezentate grafic prin PCA, dendrograme și heatmap-uri. Analizele au fost realizate în software-ul PAST v.4.17 (Hammer și colab., 2001).

Evaluarea germinării semințelor a fost realizată prin utilizarea unor indici specifici, precum:

GP (Procentul de germinare - %)(Fetouh și Hassan, 2014):

$$GP = \frac{\text{Numărul de semințe germinate pe zi}}{\text{Numărul total de semințe puse la germinat}} \times 100 \quad (7)$$

Indicele de germinare (AOSA, 1983)., metoda globală GI unde,

$$GI = \frac{\text{Numărul de semințe germinate}}{\text{Numărul de zile de la prima evaluare}} + \dots + \frac{\text{Numărul de semințe germinate}}{\text{Numărul de zile de la ultima evaluare}} \quad (8)$$

SE (Viteza de germinare/Energia germinativă) (Islam și colab., 2009) unde,

$$SE = \frac{\text{Numărul de semințe germinate în prima zi de germinare}}{\text{Numărul de semințe germinate în ultima zi de germinare}} \times 100.$$

CRG (Coeficientul vitezei de germinare) unde,

$$CRG = \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_n}{n_1 \times T_1 + n_2 \times T_2 + n_3 \times T_3 + \dots + n_n \times T_n} \times 100 \quad (9)$$

n_1 = numărul de semințe germinate în ziua 1 (T_1), n_2 = numărul de semințe germinate în ziua 2 (T_2), n_n = numărul de semințe germinate în ziua n (T_n) (Bewley și Black, 1985; Chiapusio și colab., 1997).

4 Rezultate experimentale în studiul scoarței de *Larix decidua*

4.1 Spectre FT-IR ale scoarței de *Larix decidua*

Analizele realizate evidențiază faptul că variațiile compoziției chimice ale scoarței de *Larix decidua* pot fi interpretate nu doar ca diferențe biochimice, ci ca modificări ale proprietăților fizice ale sistemului lignocelulozic, determinate de interacțiunea dintre structura moleculară și energia termică aplicată în timpul uscării. Diferențele observate între proveniențe indică existența unor stări inițiale distincte ale rețelei macromoleculare, caracterizate prin variații în densitatea legăturilor, distribuția grupărilor funcționale și stabilitatea energetică a acestora.

Spectrele FT-IR reflectă răspunsul vibrațional al sistemului lignocelulozic la radiația infraroșie, fiecare bandă de absorbție corespunzând unor moduri specifice de vibrație moleculară. Astfel, regiunea largă situată între 3390–3412 cm^{-1} , asociată vibrațiilor de întindere ale grupărilor O–H, evidențiază comportamentul rețelei de legături de hidrogen, care joacă un rol esențial în stabilitatea structurală a celulozei și hemicelulozelor. Benzile de întindere C–H alifatic (2915–2851 cm^{-1}) reflectă contribuția lanțurilor hidrocarbonatice din componentele structurale și extractive, în timp ce banda carbonilică (1732–1741 cm^{-1}) este asociată vibrațiilor grupărilor C=O din esteri, acizi și compuși oxidați. Regiunea 1600–1000 cm^{-1} conține o suprapunere complexă de moduri vibraționale atribuite structurilor aromatice din lignină și scheletului polizaharidic. Atribuirea completă a acestor benzi este prezentată în Tabelul 4.1.

Tabel 4.1. Benzi de absorbție FT-IR caracteristice (4000-350 cm^{-1}) ale scoarței de *Larix decidua* sub diferite tratamente de uscare.

Numărul de undă (cm^{-1})	Vibrațiile caracteristice	Referințe
617	Vibrația de întindere C-S	Tsaousis <i>et al.</i> , 2025
770-784	Vibrații ale C-C ale scheletului alcanilor; deformarea C-H în afara planului în inele fenilice; vibrații caracteristice hemicelulozei	Santos <i>et al.</i> , 2021; Evans <i>et al.</i> , 1992; Yue <i>et al.</i> , 2023
1046-1059	Vibrația de valență C-O, predominant asociată grupării C ₃ -O ₃ H din celuloză; deformarea în plan a legăturii C-H aromatice, specifică ligninei de tip guaiacil și deformarea C-O din alcoolii primari	Schwanninger <i>et al.</i> , 2004 Faix, 1991; Rana <i>et al.</i> , 2008; Cuello <i>et al.</i> , 2020
1104-1123	Deformarea în plan a grupării C-O-H (din celuloză și hemiceluloză); deformarea în plan a C-H aromatice (unități tip siringil); vibrațiile scheletice aromatice și întinderea C-O; vibrații de întindere a legăturii C-O-C în celuloză și hemiceluloză.	Pandey and Pitman, 2003; Popescu <i>et al.</i> , 2010; Popescu <i>et al.</i> , 2007; Piqueras <i>et al.</i> , 2020; McCann <i>et al.</i> , 1997; Zhang <i>et al.</i> , 2010;
1154-1167	Întinderea asimetrică a legăturii C-O-C în celuloză și hemiceluloză	Faix and Bottcher, 1992; Popescu <i>et al.</i> 2007
1262-1276	Vibrația C-O în inelele guaiacilice	Popescu <i>et al.</i> , 2007; Chen <i>et al.</i> , 2010
1336-1366	Deformarea C-H în celuloză și hemiceluloze	Colom and Carrillo 2005; Popescu <i>et al.</i> , 2007; Evans <i>et al.</i> , 1992; Mohebbi, 2008
1439-1448	Deformarea asimetrică C-H în grupările -OCH ₃ din lignină; deformarea asimetrică a grupărilor -CH ₃ și -CH ₂ - din structura piranică a hemicelulozelor; Deformarea C-H asimetrică în -CH ₃ și -CH ₂ -	Popescu <i>et al.</i> , 2007; Chen <i>et al.</i> , 2010; Traore <i>et al.</i> , 2018; He <i>et al.</i> , 2022; Faix, 1991
1510-1520	Întinderea legăturii C=C a inelului aromatic; vibrațiile legăturii C=O în compuși precum aldehide, cetone, acizi grași, esteri și terpenoide oxidate.	Popescu <i>et al.</i> , 2007; Zhou <i>et al.</i> , 2015
1580	Vibrații scheletice aromatice și de întindere a C-O.	Faix, 1991; Faix <i>et al.</i> , 1991; Rana <i>et al.</i> , 2008
1614	Vibrații de întindere a C=O conjugată cu inelul aromatic și în grupările carboxil din lignină, precum și în acizi carboxilici și esteri; Vibrații scheletice aromatice și întinderea C=O în lignină	Zhao <i>et al.</i> 2014; Traore <i>et al.</i> , 2018 Schwanninger <i>et al.</i> , 2004

1732-1741	Vibrații de întindere a C=O în cetone neconjugate, compuși carbonilici și grupări ester (frecvent de origine glucidică)	Bodirlau and Teaca, 2009; Zhou <i>et al.</i> , 2015; Faix, 1991; Pandey and Pitman, 2003; Popescu <i>et al.</i> , 2007; Schwanninger <i>et al.</i> , 2004
2845-2851	Vibrații de întindere simetrică C-H a grupărilor -CH ₂ și -CH ₃ , asociate cu celuloza, hemicelulozele și lignina	Faix, 1991; Schwanninger <i>et al.</i> , 2004; Popescu <i>et al.</i> , 2007; Fackler <i>et al.</i> , 2010
2915-2929	Vibrații de întindere asimetrică a C-H în grupările -CH ₂ și -CH ₃ din lanțurile alifatică prezente în lignină și hemiceluloze	Faix, 1991; Schwanninger <i>et al.</i> , 2004; Pandey and Pitman, 2003; Fackler <i>et al.</i> , 2010; Longo <i>et al.</i> , 2020; Santos <i>et al.</i> , 2021
3392-3412	Vibrații de întindere a O-H și N-H, predominant datorată apei adsorbite și, într-o măsură mai redusă, grupărilor hidroxil din lignină	Zhao <i>et al.</i> , 2014; Longo <i>et al.</i> , 2022; Faix, 1991; Pandey and Pitman, 2003; Schwanninger <i>et al.</i> , 2004; Popescu <i>et al.</i> , 2007

Deși structura spectrală generală este conservată între toate proveniențele, temperatura de uscare induce modificări sistematice ale poziției și intensității benzilor, ceea ce indică variații ale parametrilor fizici ai sistemului, precum constantele de forță ale legăturilor chimice și masele efective reduse ale sistemelor vibrante. Deplasările observate ale benzilor O-H spre frecvențe mai mari sugerează o slăbire a rețelei de legături de hidrogen, ca urmare a reducerii interacțiunilor intermoleculare și a reorganizării structurale induse termic. În mod similar, modificările din regiunea C-H (770–784 cm⁻¹) indică ajustări ale configurației lanțurilor alifatică, iar variațiile din zona carbonilică reflectă procese de oxidare sau rearanjări ale grupărilor funcționale. Aceste transformări nu implică schimbări structurale majore ale biomaterialului, ci mai degrabă o recalibrare a mediului vibrațional intern.

4.1.1 Concluzii privind caracterizarea scoarței cu ajutorul spectroscopiei FT-IR

Spectroscopia FT-IR a evidențiat deplasări dependente de temperatură în regiunile grupărilor funcționale asociate principalelor componente lignocelulozice ale scoarței. Deplasarea progresivă a benzii de întindere O-H, precum și modificările observate în regiunile corespunzătoare deformării C-H și întinderii C=O, indică modificări ale rețelelor de legături de hidrogen și reorganizări parțiale în matricea formată din celuloză, hemiceluloză și lignină.

Mai mulți compuși extractivi din scoarță, în special compușii fenolici, lignanii și alcoolii terpenoidici care conțin grupări hidroxil, contribuie la caracteristicile benzii O-H observate în spectrele FT-IR. Acești compuși sunt cunoscuți pentru rolul lor în activitatea antioxidantă, răspunsul la temperatură și interacțiunile chimice care apar în timpul procesării scoarței.

Un comportament spectral similar a fost raportat în studii asupra scoarței și lemnului de conifere supuse încălzirii moderate, unde eliminarea apei legate și mobilitatea polimerilor determină deplasări subtile ale benzilor spectrale, fără degradarea completă a biopolimerilor (Pandey și Pitman, 2003; Schwanninger și colab., 2004; Traoré și colab, 2018).

Modificările spectrale observate sunt în concordanță cu fenomenele de relaxare a polimerilor și cu mobilizarea compușilor extractivi, care pot modifica intensitatea vibrațiilor prin reorientarea grupărilor aromatice și alifatice. Variabilitatea specifică proveniențelor în deplasarea benzilor sugerează, de asemenea, existența unor diferențe intrinseci între clone în ceea ce privește compoziția ligninei, gradul de cristalinitate al polizaharidelor și abundența extractivilor. Astfel de diferențe au fost asociate, în alte populații de larice, cu răspunsuri adaptative la condițiile locale de mediu (Rana și colab., 2008).

4.2 Spectrele GC-MS pentru identificarea compușilor prezenți în scoarța *Larix decidua*

Analiza GC-MS completează această perspectivă prin identificarea compușilor volatili și semivolatili, oferind informații despre distribuția energetică și stabilitatea termică a metaboliților secundari. Compușii identificați sunt: α -pinen, larixol, tributyl acetylcitrate, 9-octadecenamidă, acetat de cicloartanol, acetat de kauren-18-ol, oxid de caryophyllene și acetat de retinol reprezintă molecule cu mase moleculare diferite și cu structuri variate, a căror volatilitate și stabilitate depind de energia de legătură și de interacțiunile intermoleculare. Prezența constantă a acestor compuși în toate proveniențele indică existența unui nucleu metabolic stabil, în timp ce variațiile cantitative reflectă diferențe în echilibrul energetic și în cinetica proceselor de degradare sau transformare termică. Setul complet de date este prezentat în Tabelele 4.2 și 4.3.

Tabel 4.2. Interacțiunea dintre proveniență și regimul termic de uscare asupra proprietăților fizico-chimice ale scoarței de *Larix decidua*.

No*	Proveniența	Tratament	α -Pinene (%)	Larixol (%)	Tributyl acetylcitrate (%)	9-Octadecenamide (%)	Cycloartanol acetate - (%)
1	Gura Humorului	Control	0.74±0.06 bcd	10.77±0.64 o	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
2		60 °C	1.22±0.07 cd	1.67±0.07 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	2.34±0.33 u
3		80 °C	0.37±0.02 ab	12.65±0.49 t	2.15±0.16 j	4.47±0.63 o	1.48±0.24 g
4		100 °C	0.00±0.01 a	11.09±0.32 q	4.06±0.20 r	8.02±0.83 q	1.54±0.20 j
5	Brașov V.C	Control	0.31±0.01 ab	11.87±0.90 s	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	2.65±1.12 x
6		60 °C	0.34±0.01 d	8.84±0.61 k	3.08±0.44 p	2.14±0.24 g	1.68±0.59 o
7		80 °C	0.47±0.01 ab	8.31±0.42 h	3.02±0.44 o	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
8		100 °C	0.49±0.01 ab	7.14±0.30 e	2.86±0.40 n	2.52±0.25 i	0.99±0.25 c
9	Săcele	Control	0.73±0.00 bcd	13.45±0.60 w	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	2.34±0.62 u
10		60 °C	0.18±0.00 ab	9.66±0.56 l	0.00±0.00 a	1.23±0.18 c	2.63±0.74 w
11		80 °C	0.36±0.02 ab	14.62±0.67 y	2.53±0.31 m	3.96±0.47 m	2.25±1.28 t
12		100 °C	0.32±0.01 ab	8.62±0.24 j	1.43±0.20 f	4.08±0.50 n	1.67±0.92 n
13	Brașov V.P	Control	0.61±0.02 abc	10.62±0.55 n	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	1.49±0.29 h
14		60 °C	0.46±0.02 ab	11.18±0.88 r	0.86±0.08 d	0.00±0.00 a	2.50±0.95 i
15		80 °C	0.33±0.01 ab	11.06±0.91 pq	1.24±0.13 e	2.11±0.33 f	1.83±0.67 q
16		100 °C	0.41±0.01 ab	9.76±0.67 m	1.69±0.05 h	3.81±0.43 l	1.58±0.51 m
17	Sinaia	Control	0.51±0.03 ab	12.84±0.82 u	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	1.07±0.50 d
18		60 °C	1.20±0.04 cd	5.86±0.63 b	1.55±0.17 g	3.19±0.25 j	1.55±0.39 k

19		80 °C	0.66±0.03 bc	7.35±0.71 f	1.74±0.19 i	3.46±0.30 k	1.33±0.38 f
20		100 °C	0.19±0.02 ab	14.1±0.94 x	1.23±0.10 e	0.00±0.00 a	2.39±0.80 v
21	Anina	Control	0.49±0.03 ab	11.02±0.94 p	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	1.09±0.35 e
22		60 °C	0.36±0.03 ab	6.69±0.64 c	3.95±0.48 q	5.58±0.00 p	2.21±0.51 s
23		80 °C	0.00±0.00 a	8.55±0.77 i	2.19±0.21 k	2.22±0.18 h	0.95±0.22 b
24		100 °C	0.00±0.00 a	7.94±0.72 g	2.03±0.20 l	1.97±0.10 e	1.56±1.41 l
25	Latorița	Control	0.67±0.02 bc	13.13±0.98 v	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
26		60 °C	0.32±0.02 ab	9.65±0.68 l	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	2.94±0.61 y
27		80 °C	0.13±0.01 ab	6.84±0.73 d	0.79±0.21 b	1.07±0.07 p	1.71±0.42 p
28		100 °C	0.11±0.01 ab	8.85±0.71 k	0.83±0.22 c	1.84±0.09 d	1.98±1.47 r

Mediile din coloanele tabelului urmate de litere mici diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Tabel 4.3. Interacțiunea dintre proveniență și regimul termic de uscare asupra proprietăților fizico-chimice ale scoarței de *Larix decidua*.

No*	Origine	Trat.	Bicyclo[4.4.0]dec-2-ene-4-ol, 2-methyl-9-(prop-1-en-3-ol-2-yl) - (%)	Kauren-18-ol, acetate, (4beta) (%)	1-Phenanthrene carboxylic acid (%)	Caryophyll ene oxide (%)	Retinol Acetate (%)
1	Gura Humorului	Control	0.00±0.00 a	63.75±4.55 o	0.00±0.00 a	0.14±0.01 b	0.00±0.00 a
2		60 °C	0.00±0.00 a	6.33±0.12 d	0.00±0.00 a	1.32±0.13 e	0.00±0.00 a
3		80 °C	0.37±0.12 d	68.5±4.61 t	0.00±0.00 a	7.70±0.70 h	0.00±0.00 a
4		100 °C	0.00±0.00 a	50.85±3.12 g	0.00±0.00 a	6.85±0.56 g	0.00±0.00 a
5	Brașov V.C	Control	0.71±0.17 h	63.03±4.01 m	0.91±0.15 c	6.63±0.43 f	0.00±0.00 a
6		60 °C	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	11.34±2.04 n	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
7		80 °C	0.00±0.00 a	55.67±3.11 i	2.99±0.33 k	21.13±3.92 n	0.00±0.00 a
8		100 °C	0.00±0.0 a	0.00±0.00 a	2.80±0.26 j	19.89±2.84 m	0.00±0.00 a
9	Săcele	Control	0.00±0.00 a	63.03±3.02 m	1.11±0.16 e	0.00±0.00 a	0.43±0.02 b
10		60 °C	0.01±0.00 a	68.07±3.03 s	1.35±0.43 g	13.15±2.21 k	0.00±0.00 a
11		80 °C	0.00±0.00 a	65.44±2.97 q	0.00±0.00 a	9.29±0.1.95 i	0.00±0.00 a
12		100 °C	0.03±0.01 b	63.07±2.72 n	1.12±0.11 f	14.85±2.42 l	0.00±0.00 a
13	Brasov V.P	Control	0.49±0.14 f	68.72±4.12 u	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	1.47±0.14 c
14		60 °C	0.42±0.14 e	72.61±4.15 y	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
15		80 °C	0.00±0.00 a	69.01±4.01 w	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.40±0.02 b
16		100 °C	0.00±0.00 a	69.56±4.01 x	0.00±0.00 a	11.31±1.26 j	0.00±0.00 a
17	Sinaia	Control	0.79±0.18 i	60.68±2.15 l	1.06±0.12d	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
18		60 °C	0.00±0.00 a	72.74±3.02 z	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	1.94±0.07 d
19		80 °C	0.33±0.08 c	68.96±2.00 v	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
20		100 °C	1.17±0.26 j	64.45±1.95 p	2.11±0.18 i	0.00±0.00 a	0.44±0.02 b
21	Anina	Control	0.00±0.00 a	9.93±1.11 f	0.68±0.05 b	0.00±0.00 a	0.43±0.02 b
22		60 °C	0.00±0.00 a	67.97±3.45 r	00.00±0.00 a	0.00±0.00 a	2.81±0.24 f
23		80 °C	0.00±0.00 a	1.04±0.09b	5.16±1.70 l	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
24		100 °C	0.00±0.00 a	4.88±0.72 c	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
25	Latorița	Control	0.00±0.00 a	6.75±1.12 e	8.13±1.93m	0.00±0.00 a	0.00±0.00 a
26		60 °C	0.00±0.00 a	53.38±3.20 h	3.00±0.42 k	0.00±0.00 a	2.25±0.26 e
27		80 °C	0.42±0.07 e	57.97±3.26 k	1.76±1.11 h	0.47±0.01 c	6.88±0.96 h

28		100 °C	0.00±0.00 a	56.15±3.25 j	8.12±1.93 m	0.95±0.02 d	4.87±0.78 g
----	--	--------	-------------	--------------	-------------	-------------	-------------

Mediile din coloanele tabelului urmate de litere mici diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Interacțiunea dintre proveniență și temperatura de uscare evidențiază faptul că fiecare sistem biologic prezintă un comportament termochimic specific, controlat de structura internă și de distribuția energetică a compușilor. De exemplu, variațiile α -pinenului și larixolului indică diferențe în energia de activare a proceselor de volatilizare sau degradare, în timp ce creșterea esterilor și amidelor la temperaturi ridicate sugerează procese de reorganizare moleculară sau formare secundară prin reacții termice. Aceste diferențe pot fi interpretate ca variații ale stabilității energetice a compușilor în funcție de proveniență, ceea ce confirmă existența unor structuri moleculare inițiale distincte.

Analiza independentă a provenienței (Tabelul 4.4) arată că distribuția compușilor este controlată de parametri interni ai sistemului biologic, cum ar fi compoziția ligninei, gradul de polimerizare al polizaharidelor și conținutul de extractivi. În mod similar, rezultatele din Tabelul 4.5 evidențiază variații semnificative în cazul alcoolilor biciclici, acetaților diterpenoidici și compușilor oxidați, sugerând diferențe în căile biosintetice și în stabilitatea chimică a acestora.

Tabel 4.4. Variații dependente de proveniență în structura și proprietățile fizico-chimice ale scoarței de Larix decidua.

No*	Origine	α -Pinene (%)	Larixol (%)	Tributyl acetylcitrate (%)	9-Octadecenamide (%)	9,19-Cyclolanostan-3-ol, acetate, (3beta) - (%)
1	Gura Humorului	0.58±0.37 B	9.05±0.59 B	1.55±0.21 E	3.12±0.22 G	1.34±0.85 B
2	Brașov V.C	0.65±0.95 B	9.04±0.30 B	2.24±0.33 G	1.17±0.18 B	1.33±0.40 A
3	Săcele	0.40±0.02 AB	11.59±0.55 F	0.99±0.14 C	2.32±0.30 E	2.22±0.83 G
4	Brasov V.P	0.45±0.31 AB	10.65±0.54 E	0.95±0.09 B	1.48±0.19 C	1.60±0.32 E
5	Sinaia	0.65±0.30 AB	10.04±0.65 D	1.13±0.13 D	1.66±0.15 D	1.59±0.25 D
6	Anina	0.21±0.01 A	8.55±0.63 A	2.11±0.14 F	2.44±0.25 F	1.43±0.21 C
7	Latorița	0.31±0.01 AB	9.62±0.65 C	0.41±0.07 A	0.73±0.04 A	1.66±0.20 F

Valorile medii reflectă influența proveniențelor. Mediile urmate de litere majuscule diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Temperatura de uscare acționează ca un factor de perturbare energetică, influențând distribuția compușilor prin procese de volatilizare, degradare și transformare chimică. Astfel, comportamentul α -pinenului, care atinge un maxim la 60 °C și scade ulterior, poate fi explicat printr-un echilibru între eliberarea din matrice și pierderile prin volatilizare. În contrast, creșterea progresivă a unor compuși precum tributyl acetylcitrate și 9-octadecenamida indică procese de stabilizare sau formare la temperaturi ridicate. Variațiile observate pentru acetatul de cicloartanol, acetatul de kauren-18-ol, oxidul de caryophyllene și acetatul de retinol (Tabelele 4.6 și 4.7) confirmă faptul că fiecare clasă de compuși prezintă un răspuns termic specific, determinat de energia de legătură și de stabilitatea structurală.

Tabel 4.5. Variații dependente de proveniență în structura și proprietățile fizico-chimice ale scoarței de *Larix decidua*.

No*	Origine	Bicyclo[4.4.0]dec-2-ene-4-ol, 2-methyl-9-(prop-1-en-3-ol-2-yl)- (%)	Kauren-18-ol, acetate, (4beta)- (%)	1-Phenanthrene carboxylic acid (%)	Caryophyllene oxide (%)	Retinol Acetate (%)
1	Gura Humorului	0.09±0.02 C	47.36±2.97 D	0.00±0.00 A	4.00±0.35 D	0.00±0.00 A
2	Brașov V.C	0.31±0.08 F	29.68±1.98 B	4.51±0.26 E	11.91±2.70 F	0.00±0.00 A
3	Săcele	0.01±0.00 B	64.90±3.71 E	0.89±0.06 C	9.32±0.38 E	0.11±0.04 B
4	Brasov V.P	0.23±0.07 E	69.97±3.90 G	0.00±0.00 A	2.83±0.30 C	0.47±0.16 C
5	Sinaia	0.57±0.16 G	66.71±3.70 F	0.79±0.03 B	0.00±0.00 A	0.60±0.24 D
6	Anina	0.00±0.00 A	20.95±2.50 A	1.46±0.26 D	0.00±0.00 A	0.81±0.33 E
7	Latorița	0.11±0.01 D	43.56±3.00 C	5.25±0.41 F	0.36±0.02 B	3.50±0.84 F

Valorile medii reflectă influența proveniențelor. Mediile urmate de litere majuscule diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Tabel 4.6. Influența regimului termic de uscare asupra stabilității și distribuției compușilor volatili și semivolatili din scoarța de *Larix decidua*.

No*	Tratamentul	α -Pinene (%)	Larixol (%)	Tributyl acetylcitrate (%)	9-Octadecenamide (%)	9,19-Cyclolanostan-3-ol, acetate, (3beta)- (%)
1	Control	0.58±0.02 B	11.96±0.75 D	0.00±0.00 A	0.00±0.00 A	1.23±0.25 A
2	60 °C	0.73±0.03 B	7.65±0.44 A	1.35±0.17 B	1.73±0.11 B	2.11±0.66 D
3	80 °C	0.33±0.01 A	9.91±0.62 C	1.95±0.28 C	2.47±0.19 C	1.36±0.27 B
4	100 °C	0.22±0.01 A	9.64±0.62 B	2.06±0.30 D	3.18±0.21 D	1.67±0.31 C

Valorile medii reflectă influența tratamentelor aplicate. Mediile urmate de litere majuscule diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Tabel 4.7. Influența regimului termic de uscare asupra stabilității și distribuției compușilor volatili și semivolatili din scoarța de *Larix decidua*.

No*	Tratament	Bicyclo[4.4.0]dec-2-ene-4-ol, 2-methyl-9-(prop-1-en-3-ol-2-yl)- (%)	Kauren-18-ol, acetate, (4beta)- (%)	1-Phenanthrenecarboxylic acid (%)	Caryophyllene oxide (%)	Retinol Acetate (%)
1	Control	0.28±0.06 D	47.98±3.02 B	1.70±0.09 B	0.97±0.07 A	0.33±0.04 A
2	60 °C	0.06±0.01 A	48.73±3.03 C	2.24±0.05 D	2.07±0.28 B	1.00±0.09 C
3	80 °C	0.16±0.03 B	55.23±3.25 D	1.42±0.09 A	5.51±0.62 C	1.04±0.09 D
4	100 °C	0.25±0.03 C	44.14±2.90 A	2.02±0.07 C	7.69±0.74 D	0.76±0.05 B

Valorile medii reflectă influența tratamentelor aplicate. Mediile urmate de litere majuscule diferite sunt semnificativ diferite statistic conform testului Duncan MRT ($p < 0,05$).

Analiza multivariată prin clusterizare ierarhică (Figura 4.2) evidențiază faptul că aceste diferențe nu sunt aleatorii, ci urmează modele bine definite, sugerând existența unor relații structurale și energetice între compuși. Gruparea proveniențelor în funcție de similaritatea profilurilor chimice reflectă proximitatea acestora în spațiul parametrilor fizico-chimici, iar co-apariția anumitor compuși indică posibile corelații în procesele biosintetice sau în răspunsul la tratamentul termic.

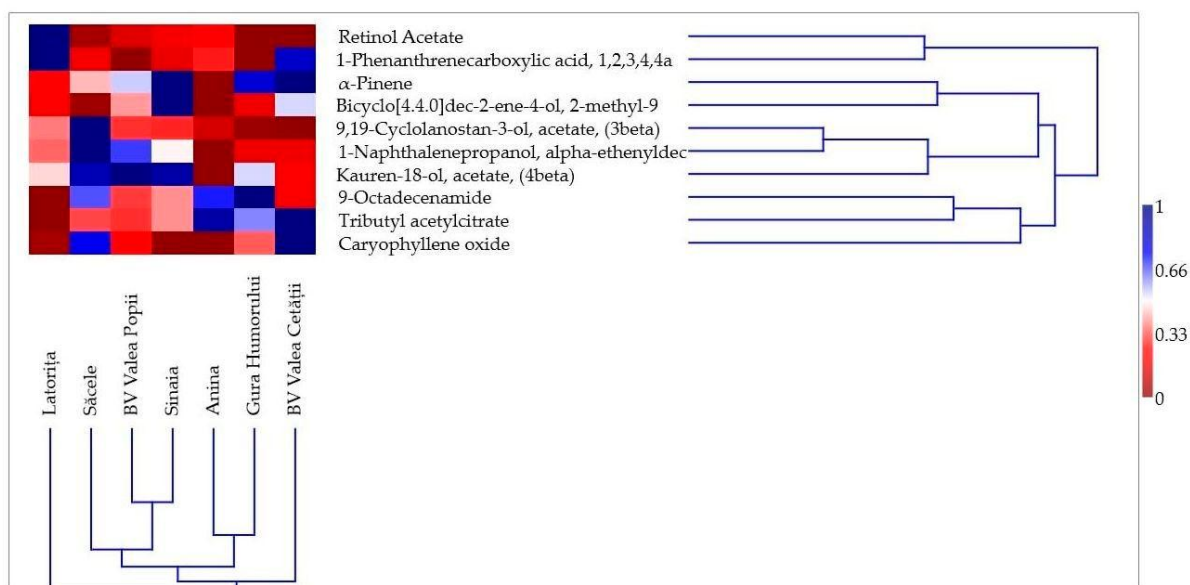


Figura 4.1. Harta termică (heatmap) și analiza de clusterizare ierarhică UPGMA a distribuției compușilor volatili, evidențiind diferențele structurale între proveniențele de *Larix decidua*.

În ansamblu, rezultatele demonstrează că atât proveniența, cât și temperatura de uscare controlează proprietățile fizice și chimice ale scoarței prin modificarea mediului vibrațional, a stabilității energetice și a distribuției compușilor, fără a altera structura fundamentală a sistemului lignocelulozic. Această abordare evidențiază faptul că biomasa vegetală poate fi interpretată ca un sistem fizic complex, în care procesele chimice sunt guvernate de transferul și redistribuția energiei la nivel molecular.

4.2.1 Concluzii privind modificări determinate de temperatură ale compușilor volatili și semivolatili

Tratamentul termic a avut un impact pronunțat asupra profilului chimic al scoarței, confirmând rezultatele unor studii anterioare care arată că temperatura influențează procesele de volatilizare, oxidare, esterificare și descompunere în țesuturile coniferelor (Czajka și colab., 2020; Kain și colab., 2020) .

Rezultatele obținute indică faptul că încălzirea moderată (60-80 °C) favorizează eliberarea și stabilizarea unor compuși precum monoterpenele, esterii, alcoolii terpenoidici și anumiți acetati triterpenoidici. Mai mulți compuși, inclusiv α -pinenul și acetatul de kauren-18-ol, au prezentat concentrații maxime la temperaturi intermediare, fenomen asociat cu mobilizarea parțială a rășinilor și creșterea disponibilității extractivelor.

Expunerea la temperaturi ridicate (100 °C) a favorizat formarea unor compuși precum sesquiterpenoizi oxidați, amide derivate din acizi grași și acizi aromatici, ceea ce reflectă transformări oxidative induse termic. Aceste tipare sunt în concordanță cu pragurile cunoscute de volatilizare ale monoterpenelor și cu sensibilitatea la oxidare a acizilor rezinici, în condițiile în care temperaturile peste 90-100 °C determină trecerea de la simpla eliberare a compușilor către degradarea sau reorganizarea lor structural (Jiang și colab., 2023; Shao și colab., 2019). Creșterile semnificative ale 9-octadecenamidei și oxidului de

caryophyllene la temperaturi ridicate sunt compatibile cu procesele de oxidare a lipidelor, declanșate în mod obișnuit în condiții de stres termic.

4.2.2 Influența condițiilor ecologice și a originii geografice asupra compușilor biochimici din scoarță

Proveniența a influențat semnificativ compoziția chimică a scoarței, reflectând atât variabilitatea genetică, cât și adaptarea la condițiile ecologice. Proveniențele din zone mai reci și de altitudine medie (Săcele, Sinaia) au prezentat niveluri mai ridicate de terpenoizi și compuși rezinoși, asociați cu mecanisme de protecție. În schimb, cele din regiuni mai calde (Anina, Latorița) au evidențiat o abundență crescută de derivați oxidați și esteri lipidici, corelată cu temperaturi mai ridicate și intensificarea metabolismului.

Diferențele biochimice au relevanță ecologică, metabolizii secundari contribuind la protecția împotriva stresului abiotic și biotic (Ferrerres și colab., 2018; Jiang și colab., 2023). În același timp, acestea indică existența unei variabilități genetice utile pentru programele de ameliorare.

Condițiile din plantația Baci, mai calde și mai uscate decât cele din zonele de origine, au influențat procesele de aclimatizare și sinteza metaboliților. Stresul moderat a favorizat acumularea de terpenoizi și compuși fenolici, în timp ce proveniențele montane au păstrat trăsături adaptative specifice mediilor reci și umede.

Interacțiunile proveniență × temperatură evidențiază diferențe în plasticitatea termochimică, unele proveniențe prezentând stabilitate metabolică mai ridicată. Aceste rezultate subliniază importanța selecției genotipurilor adaptate la condiții climatice variabile.

Analizele multivariate confirmă faptul că semnaturile chimice specifice proveniențelor rămân detectabile chiar și după tratamente termice, susținând rolul factorilor genetici în determinarea compoziției scoarței.

4.3 Concluzii privind caracterizarea scoarței utilizând metode fizico-chimice

Rezultatele obținute prin FT-IR și GC-MS evidențiază scoarța de *Larix* decidua ca sursă valoroasă de compuși extractivi, cu aplicații în materiale bio-bazate, adezivi, acoperiri funcționale și antioxidanți naturali. Identificarea proveniențelor cu conținut ridicat de terpenoizi și compuși lipidici susține selecția genotipurilor pentru ameliorare și optimizarea proceselor de uscare și extracție.

Proveniențele Săcele și Sinaia au evidențiat stabilitate termochimică ridicată, indicând potențial pentru aplicații industriale, în special în producția de rășină. Compușii fenolici și derivații ligninei contribuie la proprietăți adezive și stabilitate termică, iar terpenoizii oferă potențial antioxidant.

Integrarea FT-IR și GC-MS a permis corelarea structurii chimice cu compoziția moleculară. Deși utilizarea probelor compozite reduce variabilitatea, aceasta poate limita analiza la nivel individual; totuși, modelele statistice confirmă robustețea rezultatelor.

În ansamblu, chimia scoarței este determinată de interacțiunea dintre factori genetici și condiții de mediu, oferind o bază pentru selecția genotipurilor și valorificarea eficientă a biomasei.

5 Rezultate experimentale privind studiul semințelor de

Larix decidua

5.1 Caracterizarea conurilor de larice

Rezultatele evidențiază variații ale caracteristicilor conurilor (lungime, lățime, greutate și număr de semințe/con) între cele șapte proveniențe analizate.

Lungimea conurilor a fost mai mare în proveniențele Gura Humorului și Latorița ($\approx 3,4$ – $3,5$ cm), iar cea mai mică în Brașov V.C. ($\approx 2,5$ cm). Variabilitatea mai ridicată la Gura Humorului și Latorița indică o heterogenitate mai mare (Figura 5.1. a). Lățimea conurilor a fost maximă în Brașov V.C. ($\approx 2,5$ cm) și minimă în Anina ($\approx 1,08$ cm), această proveniență prezentând și o variabilitate mai mare (Figura 5.1. b). Greutatea conurilor a fost cea mai ridicată în Latorița și Brașov V.P. ($\approx 4,6$ g), iar cea mai scăzută în Anina ($\approx 2,4$ g). Valorile mai dispersate în Latorița și Brașov V.P. sugerează o diversitate fenotipică mai mare (Figura 5.1. c).

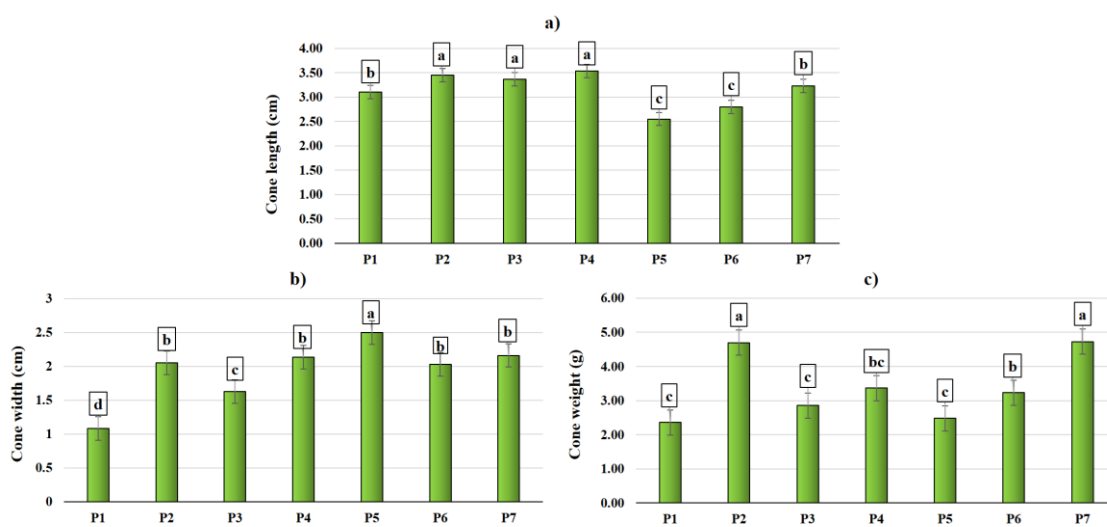


Figura 5.1. Principalele caracteristici ale conurilor în funcție de proveniențele de *Larix decidua*. Barele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare caracter analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). P1 (Anina), P2 (Latorița), P3 (Sinaia), P4 (Gura Humorului), P5 (Brașov V.C.), P6 (Săcele), P7 (Brașov V.P.).

Rezultatele evidențiază diferențe morfologice între proveniențe, sugerând influența combinată a factorilor genetici și de mediu asupra dezvoltării conurilor și semințelor de *Larix decidua*. Proveniențele Latorița și Brașov V.P. se remarcă prin valori mai ridicate și variabilitate mai mare, în timp ce Anina prezintă dimensiuni mai reduse, posibil ca efect al adaptării locale.

Caracteristicile semințelor au variat semnificativ între proveniențe. Lungimea maximă a fost înregistrată la Gura Humorului ($\approx 4,2$ mm), iar cea minimă la Săcele ($\approx 3,2$ mm), cu variabilitate mai ridicată în prima proveniență (Figura 5.2. a). Lățimea a fost mai mare la Sinaia ($\approx 2,4$ mm) și mai redusă la Latorița ($\approx 2,0$ mm), cu variații moderate între proveniențe (Figura 5.2. b). Greutatea semințelor a fost maximă la Sinaia ($\approx 74,3$ mg) și minimă la Brașov V.C. ($\approx 54,2$ mg), celelalte proveniențe prezentând valori intermediare (Figura 5.2. c).

Numărul de semințe/con a fost cel mai ridicat la Latorița (≈ 70 semințe/con) și mai redus la Brașov V.C., indicând diferențe în potențialul reproductiv (Figura 5.2. d).

Semințele mai mari și mai grele sunt asociate, în general, cu germinare mai bună și vigoare crescută, datorită rezervelor nutritive mai mari. În acest context, proveniențele Sinaia, Latorița și Anina prezintă caracteristici favorabile, în timp ce Brașov V.C. evidențiază valori mai reduse. Aceste diferențe reflectă variabilitatea genetică și adaptarea la condițiile de mediu, cu implicații pentru selecția materialului biologic.

Caracteristicile morfologice observate la semințele diferitelor specii forestiere evidențiază importanța originii acestora (Roman și colab., 2022a). Studii similare au fost realizate anterior, subliniind relevanța înțelegerii trăsăturilor reproductive și a diversității genetice între diferite populații (Vilcan (Truta) și colab., 2017; Gramazio și colab., 2018; Todea și colab., 2019; Roman și colab., 2022b).

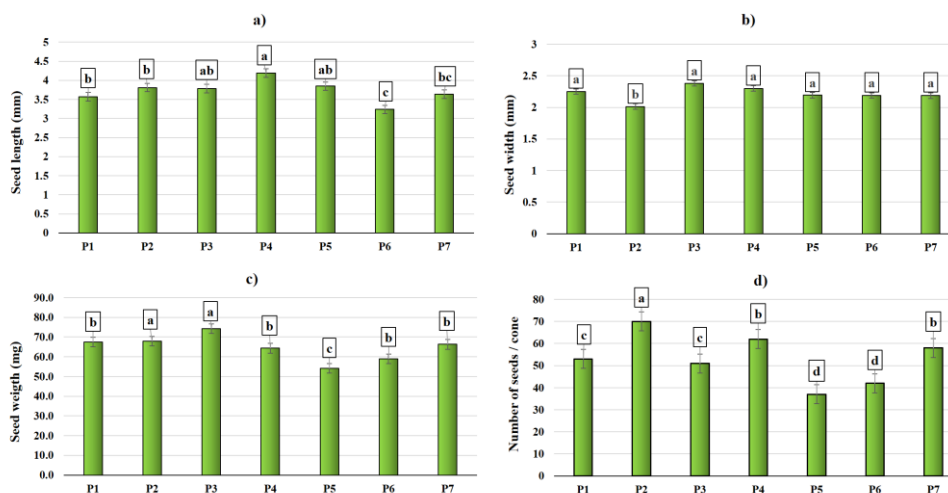


Figura 5.2. Principalele caracteristici ale semințelor în funcție de proveniențele de *Larix decidua*. Barele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare caracter analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). P1 (Anina), P2 (Latorița), P3 (Sinaia), P4 (Gura Humorului), P5 (Brașov V.C.), P6 (Săcele), P7 (Brașov V.P.).

Aceste cercetări sunt importante deoarece oferă informații valoroase despre modul în care populațiile se adaptează la mediile lor specifice și interacționează cu alte specii din ecosisteme. Cunoașterea caracteristicilor reproductive poate orienta eforturile de conservare, în special în contextul schimbărilor de mediu și al degradării habitatelor. În plus, diversitatea genetică joacă un rol major în creșterea capacității populațiilor de a rezista stresului abiotic și de a se adapta la condițiile climatice în schimbare.

5.2 Analiza efectelor câmpului electric asupra germinării semințelor de *Larix decidua*

Capacitatea de germinare a semințelor de *Larix decidua* a variat în funcție de proveniență, intensitatea câmpului electric și durata expunerii (Figura 5.3.), reflectând interacțiunea dintre câmpul aplicat și proprietățile biofizice ale semințelor. Proveniențele P4 și P3 au înregistrat cele mai ridicate valori, iar P7 și P6 cele mai reduse, sugerând diferențe în proprietățile dielectrice și în modul de cuplare la câmp.

Intensitatea câmpului electric a influențat semnificativ germinarea. Variantele 10 V și 50 V au determinat valori mai mari, în timp ce 30 V a generat un răspuns inferior, indicând un comportament neliniar și existența unor praguri optime de stimulare.

Durata expunerii a avut un efect cumulativ: 60 min a condus la cele mai ridicate procente de germinare, în timp ce 15 și 35 min au fost mai puțin eficiente, sugerând că procesele de polarizare și transport ionic necesită timp pentru stabilizare.

Interacțiunea dintre factori arată că valorile mari ale germinării sunt obținute la combinații de intensitate ridicată și durată mare, în timp ce unele proveniențe rămân mai puțin receptive, probabil din cauza limitărilor structurale interne (Figura 5.3.).

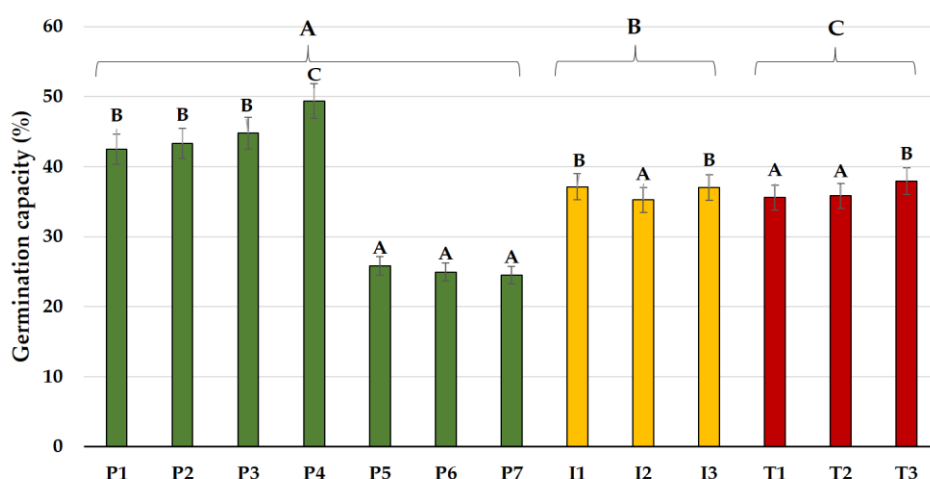


Figura 5.3. Efectele intensității câmpului electric asupra capacității de germinare (%) la *Larix decidua*, în funcție de proveniență (A), intensitate (B) și timpul de expunere (C). Barelele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare factor analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). P1 (Anina), P2 (Latorița), P3 (Sinaia), P4 (Gura Humorului), P5 (Brașov V.C.), P6 (Săcele), P7 (Brașov V.P.); I1 = 10 V, I2 = 30 V, I3 = 50 V; T1 = 15 min, T2 = 35 min, T3 = 60 min.

Interacțiunea dintre proveniență (P) și intensitatea câmpului electric (I) evidențiază variații ale răspunsului în funcție de caracteristicile fizice ale semințelor. Valoarea maximă a germinării pentru combinația P4I3 și valorile

ridicate pentru P2I1 indică o eficiență crescută a proceselor de polarizare și transport ionic în aceste condiții, în timp ce valorile minime pentru P6I2 sugerează o disipare inefficientă a energiei sau o distribuție neuniformă a câmpului în structura semințelor (Figura 5.4.). Aceste diferențe pot fi asociate cu variații ale structurii membranelor celulare și ale conținutului de apă, factori care influențează proprietățile electrice ale sistemului.

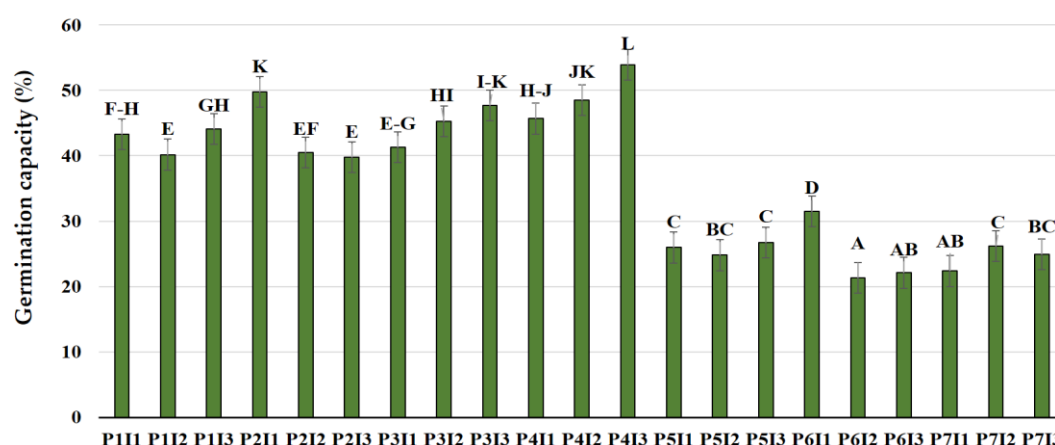


Figura 5.4. Capacitatea de germinare (%) la *Larix decidua*, în funcție de interacțiunea dintre proveniență și intensitatea câmpului electric. Barele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare factor analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). P1 (Anina), P2 (Latorița), P3 (Sinaia), P4 (Gura Humorului), P5 (Brașov V.C.), P6 (Săcele), P7 (Brașov V.P.); I1 = 10 V, I2 = 30 V, I3 = 50 V.

Interacțiunea dintre proveniență (P) și durata expunerii (T) indică faptul că dinamica temporală a germinării este controlată de capacitatea sistemului de a integra energia electrică în procesele fiziologice. Proveniența P4 prezintă un răspuns stabil și ridicat pentru toate intervalele de timp, cu un maxim la T3, ceea ce sugerează o adaptare eficientă la stimulul electric, în timp ce valorile reduse pentru P5T1 indică o capacitate limitată de răspuns în condiții de expunere scurtă (Figura 5.5.).

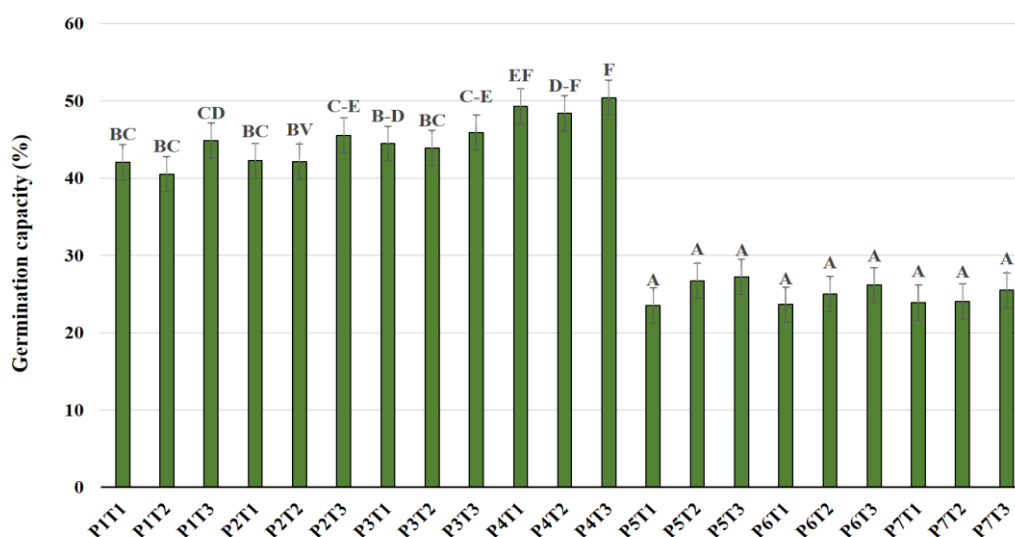


Figura 5.5. Capacitatea de germinare (%) la *Larix decidua* în funcție de interacțiunea dintre proveniență și timpul de expunere la câmp electric (EF). Barele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare factor analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). P1 (Anina), P2 (Latorița), P3 (Sinaia), P4 (Gura Humorului), P5 (Brașov V.C.), P6 (Săcele), P7 (Brașov V.P.); T1 = 15 min, T2 = 35 min, T3 = 60 min.

În ceea ce privește interacțiunea dintre durata expunerii (T) și intensitatea câmpului electric (I), rezultatele evidențiază existența unor combinații optime ale parametrilor electrici. Valorile maxime ale germinării pentru T3I1 și T3I3 sugerează că atât intensitatea moderată, cât și cea ridicată pot fi eficiente atunci când timpul de expunere este suficient pentru a permite stabilizarea proceselor de polarizare și transport ionic. În schimb, combinațiile T1I2 și T2I2 conduc la valori minime, indicând condiții suboptime de transfer energetic (Figura 5.6.).

În ansamblu, rezultatele arată că acțiunea câmpului electric asupra germinării poate fi descrisă ca un proces de transfer și redistribuție a energiei în cadrul sistemului biologic, controlat de parametrii câmpului și de proprietățile fizice ale semințelor. Efectele observate sunt consecința unor mecanisme de polarizare dielectrică, migrație ionică și modificare a permeabilității membranelor, care, în condiții optime, conduc la accelerarea și creșterea eficienței procesului germinativ.

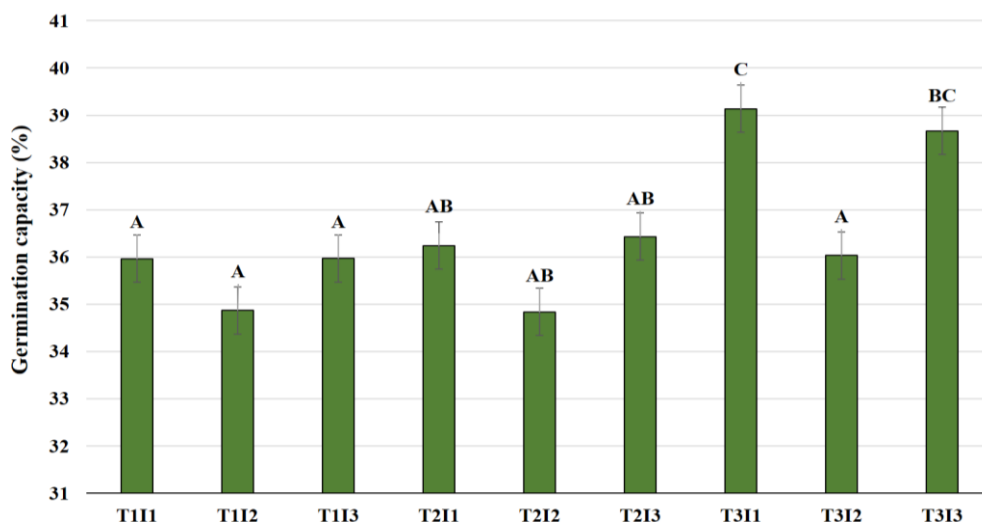


Figura 5.6. Capacitatea de germinare (%) la *Larix decidua* în funcție de interacțiunea dintre timpul de expunere și intensitatea câmpului electric (EF). Barelele reprezintă media $\pm$ eroarea standard (SE) ($n = 30$). Pentru fiecare factor analizat, literele diferite plasate deasupra barelor indică diferențe semnificative între tratamente, conform testului Tukey ($\alpha = 0,05$). T1 = 15 min, T2 = 35 min, T3 = 60 min; I1 = 10 V, I2 = 30 V, I3 = 50 V.

5.3 Analiza efectelor câmpurilor electromagnetice

Analiza datelor evidențiază faptul că expunerea semințelor de *Larix decidua* la câmp electromagnetic de intensitate redusă (0,4 mT) determină un răspuns germinativ dependent de durata tratamentului și de proveniența materialului biologic, manifestat prin variații sistematice ale indicilor GP, GI, SE și CRG. Comparativ cu varianta martor, expunerea de scurtă durată (10 minute) conduce la o creștere clară a procentului de germinare pentru toate proveniențele analizate, cu valori maxime înregistrate la proveniențele Sinaia și Anina, ceea ce indică un efect stimulator eficient al câmpului electromagnetic asupra inițierii proceselor germinative (Tabelul 5.1.).

Tabel 5.1. Răspunsul germinativ al semințelor de larice la acțiunea câmpurilor electromagnetice, în funcție de proveniență și de parametri fizici ai câmpului exprimat prin capacitatea de germinare (%).

No	Treatment/Proveniență	Indicii de germinare (%)			
		GP	GI	SE	CRG
Control (no treatment)					
1	Anina	64.28	1.83	7.84	7.12
2	Latorița	58.47	1.00	7.23	7.52
3	Sinaia	61.12	1.31	6.82	7.25
4	Gura Humorului	51.79	0.93	8.30	7.80
5	Brașov V.C.	47.58	1.14	9.24	7.15
6	Săcele	50.47	1.18	7.26	7.34
7	Brașov V.P.	48.17	1.12	8.13	7.13
10 min					
1	Anina	72.26	1.73	5.7	7.63
2	Latorița	62.32	1.49	5.8	7.48
3	Sinaia	76.48	1.82	8.7	7.31
4	Gura Humorului	55.46	1.56	7.3	7.24
5	Brașov V.C.	52.14	1.21	6.2	7.12
6	Săcele	58.36	1.13	6.2	7.33
7	Brașov V.P.	51.72	1.23	6.7	7.21
20 min					
1	Anina	62.45	1.15	5.3	7.15
2	Latorița	57.61	1.21	7.3	7.00
3	Sinaia	61.8	1.11	5.9	7.23
4	Gura Humorului	52.1	1.00	6.8	7.18
5	Brașov V.C.	41.17	1.18	7.2	7.14
6	Săcele	47.26	1.24	7.06	7.23
7	Brașov V.P.	41.23	1.18	7.23	6.97
30 min					
1	Anina	65.21	1.70	5.46	7.23
2	Latorița	53.57	1.21	5.23	7.31
3	Sinaia	58.25	1.61	7.12	7.27
4	Gura Humorului	50.48	1.26	5.43	7.23
5	Brașov V.C.	55.62	1.37	5.82	7.49
6	Săcele	61.3	1.67	5.54	7.72
7	Brașov V.P.	54.12	1.38	7.23	7.24

* GP – procentul de germinare; GI – indicele de germinare; SE – viteza de germinare; CRG – coeficientul vitezei de germinare.

Creșterea germinării este asociată cu valori ridicate ale indicelui de germinare (GI), indicând atât o capacitate germinativă mai mare, cât și o accelerare a procesului, prin activarea mai rapidă a metabolismului.

La 20 de minute de expunere se observă o scădere a GP și GI pentru majoritatea proveniențelor, uneori până la nivelul martorului, evidențiind un răspuns neliniar și existența unui optim de acțiune. La 30 de minute, valorile se stabilizează sau cresc ușor, fără a mai atinge maximul de la 10 minute. Viteza de germinare (SE) confirmă o accelerare la expuneri optime, în timp ce coeficientul CRG rămâne relativ constant, sugerând o modulare funcțională, nu structurală.

Diferențele între proveniențe indică o componentă genetică importantă: unele (Sinaia, Anina) răspund mai puternic, altele mai slab. Efectele pot fi explicate prin influența câmpului electromagnetic asupra distribuției sarcinilor, mobilității ionilor și permeabilității membranare, facilitând imbibitiia.

Comparativ cu alte tratamente, câmpul electromagnetic are avantajul unui caracter neinvaziv și al unui control bun, inducând efecte moderate, dar stabile. Astfel, reprezintă o metodă eficientă pentru stimularea germinării fără utilizarea substanțelor chimice și fără riscuri de degradare a materialului biologic.

5.4 Efectele radiațiilor gamma asupra capacității de germinare a semințelor de *Larix decidua*

Variația indicilor de germinare evidențiază impactul combinat al provenienței și al tratamentelor cu radiații gamma asupra comportamentului germinativ al semințelor de *Larix decidua* (Tabelul 5.2.). Din perspectivă fizică, aceste rezultate pot fi interpretate ca efect al transferului de energie ionizantă către sistemul biologic, transfer care determină modificări la nivel molecular și subcelular, influențând procesele inițiale ale germinării.

Tabel 5.2. Răspunsul germinativ (%) al semințelor de *Larix decidua* la doza absorbită de radiații γ (Gy), în funcție de proveniență.

No	Treatment/Proveniență	Indicii germinativi (%)			
		GP	GI	SE	CRG
Control (no treatment)					
1	Anina	46.67	1.08	7.10	7.65
2	Latorita	40	1.04	8.30	7.84

3	Sinaia	53.33	1.21	6.30	7.39
4	Gura Humorului	40	0.93	8.30	7.80
5	Braşov V.C.	33.33	0.73	10	7.586
6	Săcele	36.67	0.88	9.1	7.33
7	Braşov V.P.	36.67	0.9	9.1	8.03
1 Gy					
1	Anina	43.33	0.94	7.7	7.93
2	Latoriţa	30	0.59	11.1	6.72
3	Sinaia	50	1.1	6.7	7.41
4	Gura Humorului	36.37	0.76	9.1	7.04
5	Braşov V.C.	33.3	0.71	10	7.44
6	Săcele	33.3	0.8	20	7.58
7	Braşov V.P.	36.67	0.83	9.1	7.1
1.5 Gy					
1	Anina	50	1.13	6.7	7.85
2	Latoriţa	36.67	0.85	9.1	7.01
3	Sinaia	60	1.35	5.6	7.33
4	Gura Humorului	43.3	1.06	7.7	7.39
5	Braşov V.C.	43.33	0.98	7.7	7.41
6	Săcele	43.33	1	7.7	7.1
7	Braşov V.P.	40	0.88	8.3	6.86
2 Gy					
1	Anina	66.67	1.64	5	7.41
2	Latoriţa	60	1.41	5.6	7.69
3	Sinaia	73.33	1.78	9.1	7.35
4	Gura Humorului	56.67	1.41	5.09	7.66
5	Braşov V.C.	56.67	1.38	5.9	7.39
6	Săcele	60	1.37	5.7	7.06
7	Braşov V.P.	53.33	1.24	6.3	7.17
4 Gy					
1	Anina	56.67	1.46	17.6	7.87
2	Latoriţa	43.33	0.99	7.7	7.1
3	Sinaia	63.33	1.59	5.3	7.66
4	Gura Humorului	46.67	1.16	7.1	7.73
5	Braşov V.C.	46.67	1.22	7.1	8
6	Săcele	46.67	1.15	7.11	7.53
7	Braşov V.P.	43.33	1.07	7.7	7.65

* GP – procentul de germinare; GI – indicele de germinare; SE – viteza de germinare; CRG – coeficientul vitezei de germinare.

Parametrii analizați (GP, GI, SE, CRG) reflectă atât eficiența finală a germinării, cât și dinamica procesului, fiind indicatori ai modului în care energia absorbită este convertită în procese fiziologice.

În variantele martor, valorile GP (33,33%–53,33%) evidențiază diferențe inițiale între proveniențe, asociate structurii interne și compoziției biochimice.

Aplicarea radiațiilor gamma introduce un mecanism de interacțiune bazat pe ionizare. La 1 Gy se observă o ușoară reducere a GP și GI, sugerând perturbări fără efect stimulat. La 1,5 Gy răspunsul devine heterogen, indicând competiția între procesele de deteriorare și cele de adaptare.

Doza de 2 Gy produce cele mai puternice efecte stimulatorie, cu creșteri semnificative ale GP și GI (maxim la Sinaia – 73,33%), indicând un nivel optim de transfer energetic. La 4 Gy, răspunsul devine din nou variabil, sugerând depășirea parțială a pragului optim și apariția efectelor de degradare.

Per ansamblu, răspunsul este dependent de doză și neliniar, cu existența unui interval optim de stimulare. Analiza CCA evidențiază diferențe între proveniențe: Anina și Sinaia sunt corelate cu GP și GI, în timp ce Brașov V.P., Brașov V.C., Săcele și Latorița sunt asociate mai mult cu SE și CRG, indicând variații în modul de absorbție și utilizare a energiei ionizante.

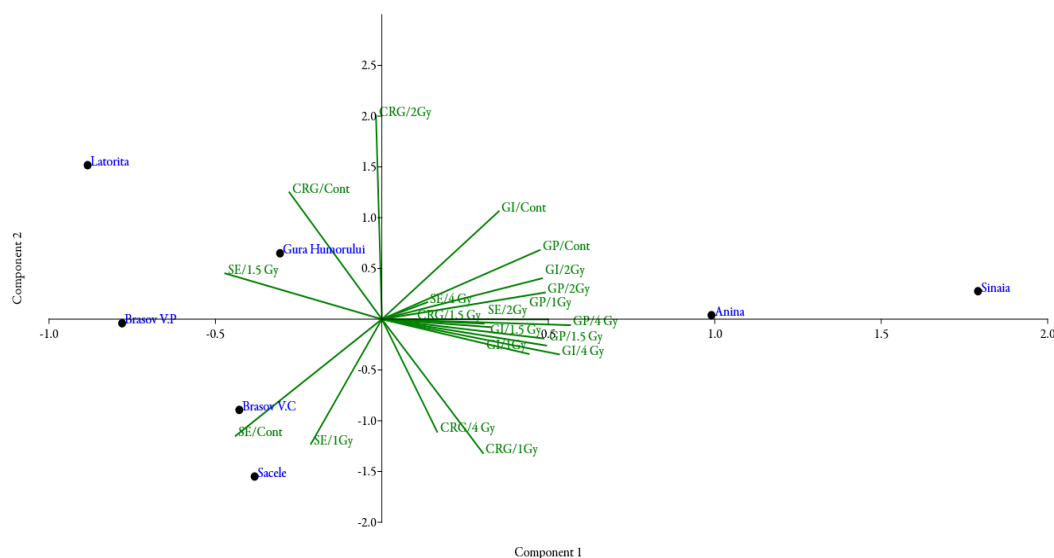


Figura 5.7. Analiza de corespondență canonică (CCA) pentru cele șapte proveniențe de *Larix decidua* și influența tratamentelor cu radiații γ asupra capacității de germinare.

Dendrograma UPGMA (Figura 5.8.), bazată pe indicii de similaritate Gower, evidențiază organizarea sistematică a răspunsurilor germinative în funcție de tratament și proveniență. Gruparea variantelor martor și a tratamentelor moderate într-un cluster distinct, separat de tratamentele cu doze

mai ridicate, sugerează existența unor regimuri energetice diferite de interacțiune. Această separare reflectă tranziția de la un regim dominat de procese fiziologice naturale la unul influențat semnificativ de efectele ionizante.

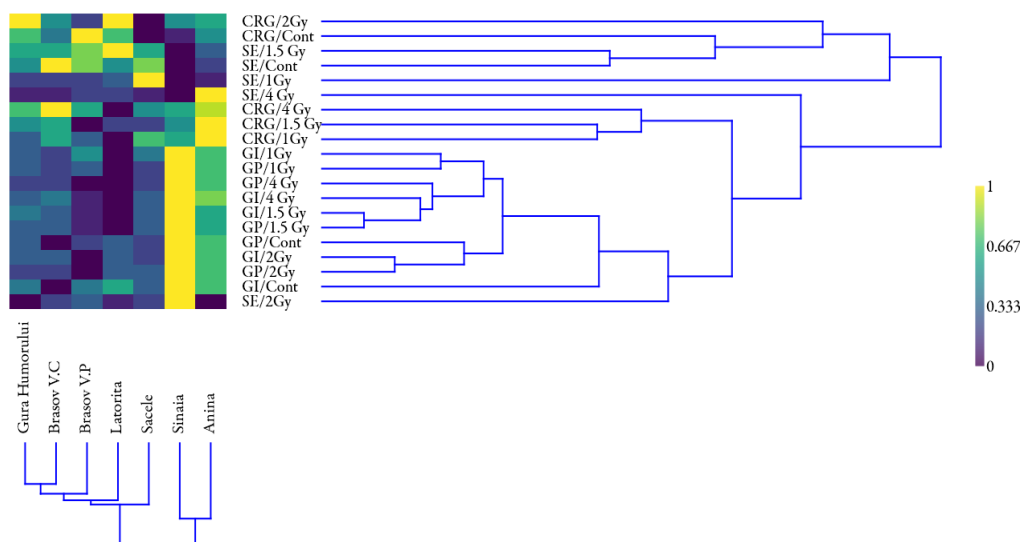


Figura 5.8. Clusterizare ierarhică - metoda UPGMA (unweighted pair group method with arithmetic mean) bazată pe indicele de similaritate Gower pentru cele șapte proveniențe de *Larix decidua* și influența tratamentelor cu radiații γ asupra capacității de germinare.

În același timp, gruparea proveniențelor (Gura Humorului, Brașov V.C., Brașov V.P.) indică similarități în răspunsul la iradiere, în timp ce Anina și Sinaia se disting printr-un comportament diferit, ceea ce sugerează particularități ale structurii și proprietăților fizico-chimice ale semințelor. Aceste diferențe pot fi asociate cu variații ale densității structurale, conținutului de apă sau compoziției chimice, factori care influențează eficiența absorbției energiei ionizante.

În ansamblu, analizele multivariate realizate prin UPGMA și CCA confirmă faptul că răspunsul germinativ la radiațiile gamma este rezultatul unei interacțiuni complexe între parametrii fizici ai radiației și proprietățile interne ale sistemului biologic. Radiațiile ionizante acționează ca un factor energetic capabil să modifice structura și funcționalitatea sistemului, iar efectele observate sunt determinate de echilibrul dintre procesele de excitație, ionizare, reparare și degradare, dependente atât de doză, cât și de proveniență.

5.5 Concluzii privind germinarea semințelor în câmp electric, câmp electromagnetic și sub acțiunea radiațiilor gamma

Analiza caracteristicilor semințelor evidențiază diferențe clare între proveniențele de *Larix decidua*, determinate de interacțiunea dintre fondul genetic și condițiile de mediu. Proveniențe precum Latorița și Brașov V.P. prezintă valori morfometrice mai ridicate, în timp ce Anina are dimensiuni mai reduse, ceea ce influențează modul de absorbție și utilizare a energiei în procesul de germinare. Semințele mai mari (Sinaia, Latorița, Anina) indică rezerve energetice mai ridicate și un potențial germinativ superior.

Câmpul electric determină un transfer direct de energie prin polarizare și transport ionic, iar răspunsul germinativ depinde de corelarea dintre intensitate, durată și proprietățile dielectrice ale semințelor. Valorile ridicate ale germinării apar în condiții de transfer energetic eficient, în timp ce combinațiile neoptime conduc la răspunsuri reduse.

Câmpul electromagnetic produce efecte mai moderate, cu un comportament neliniar și existența unui optim la expuneri scurte. Acțiunea sa implică orientarea dipolilor și influențarea mobilității ionice, fără efecte structurale majore.

Radiațiile gamma induc un transfer energetic ridicat prin ionizare, generând efecte dependente de doză: stimulare la doze moderate și inhibiție la doze mari. Diferențele între proveniențe reflectă variații în capacitatea de a tolera și disipa energia ionizantă.

Comparativ, câmpul electric este cel mai eficient pentru stimularea directă, câmpul electromagnetic oferă control și stabilitate, iar radiațiile gamma prezintă un răspuns variabil. Optimizarea germinării necesită corelarea parametrilor fizici cu caracteristicile materialului biologic, pentru un transfer energetic eficient fără depășirea pragurilor de toleranță.

6 Concluzii finale

Analiza FT-IR evidențiază influența provenienței și a tratamentelor termice asupra structurii chimice a scoarței de *Larix decidua*, reflectată prin variații ale benzilor spectrale. Spectrele confirmă prezența ligninei, celulozei, hemicelulozelor și compușilor extractivi, iar creșterea temperaturii determină diminuarea grupărilor $-OH$, modificări ale benzilor carbonil și variații în structura ligninei. Aceste rezultate arată că uscarea implică nu doar deshidratare, ci și modificări chimice.

Analiza GC-MS confirmă că temperatura și proveniența influențează compoziția chimică, determinând volatilizarea compușilor ușori și creșterea fracțiilor stabile, precum și formarea unor compuși secundari. Profilul chimic este dominat de compuși terpenici și fenolici, iar variațiile între proveniențe indică diferențe în stabilitatea moleculară și răspunsul la tratamente termice.

Câmpurile electrice și electromagnetice acționează ca stimuli fizici, influențând polarizarea, distribuția sarcinilor și transportul ionic. Rezultatele indică existența unui interval optim de parametri, în care germinarea este stimulată, urmat de scăderea eficienței la valori mai ridicate, ceea ce confirmă comportamentul neliniar al sistemului. Radiațiile gamma produc un răspuns dependent de doză: stimulare la doze reduse și inhibiție la doze mari, prin procese de ionizare și generare de radicali liberi. Diferențele între proveniențe reflectă variații în capacitatea de absorbție și reparare.

Corelarea rezultatelor arată că răspunsul biologic este determinat de interacțiunea dintre structura chimică și energia aplicată. Stabilitatea moleculară influențează toleranța la stimuli, iar structurile mai reactive pot facilita activarea proceselor biologice. Integrarea metodelor FT-IR, GC-MS și a experimentelor de germinare permite o interpretare coerentă a relației dintre structură, energie și răspuns biologic.

Diseminarea rezultatelor - Lista lucrărilor publicate

Articole ISI publicate pe tema tezei

1. **Truta, P.**, Morar, I. M., Stefan, R., Gal, E., Dan, C., Sestras, P., Adriana F. Sestras, Alina M. Truta, David, L. (2025). Integrated FT-IR and GC-MS Profiling Reveals Provenance-and Temperature-Driven Chemical Variation in *Larix decidua* Mill. Bark. Forests, 17(1), 20. (IF 2025=2.5) WOS: 001671202800001. <https://www.mdpi.com/1999-4907/17/1/20>

2. **Truta, P.**, Morar, I. M., Truta, A. M., Dan, C., Viman, O., Arion, I. D., Ioras F., Sestras A.F., David, L. (2025). Reproductive trait variability and seed germination responses to electric field and low-dose gamma irradiation in *Larix decidua* Mill. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 53(4), 14811. (IF 2024=1.3) WOS: 001654109200049. <https://bnu.repository.guildhe.ac.uk/id/eprint/20776/>

Prezentare conferință internațională susținută pe tema tezei

1. **Petru Truta**, Irina M. Morar, Catalina Dan, Iulia Arion, Roxana L. Stoiandod, Carla Aparaschive, Adriana F. Sestras, Alina M. Truta and David Leontin; Non-Chemical Methods for Improving Larch (*Larix decidua*) Seed Germination; The 23rd International Conference "Life Sciences for Sustainable Development" 26th– 28th September, 2024 Cluj-Napoca, Romania.

Alte articole publicate în jurnale ISI

1. Morar, I. M., Stefan, R., Dan, C., Sestras, R.E., **Truta, P.**, Medeleanu, M., Ranga F., Sestras P., Truta A.M., Sestras, A.F. (2024). FT-IR and HPLC analysis of silver fir (*Abies alba* Mill.) bark compounds from different geographical

provenances. *Heliyon*, 10(5). (IF 2023=3.4) (Q1) WOS: 001206351700001
[https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)02851-2](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02851-2)

2. Holonec, R., Viman, O., Morar, I. M., Sîngeorzan, S., Scheau, C., Vlasin, H. D., **Truta, P.**, Criveanu, H., Holonec, L., Truta, A.M. (2021). Non-chemical treatments to improve the seeds germination and plantlets growth of sessile oak. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 49(3). (IF 2021=1.249) WOS: 000704166300006
<https://www.notulaebotanicae.ro/index.php/nbha/article/view/12401>

Articole BDI

1. Morar, I., Truta, A., Arion, I., Reborean, F., Varga, M., **Truta, P.**, Dan, C. (2025). Phenotypic variability of *Picea abies* characteristics in regard with microstationary ecological conditions. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 29(2), 159-166.
2. Truța, A. M., Viman, O., Dohotar, V. D., Sîngeorzan, S., **Truța, P.**, Holonec, L. (2020). The Influence of Certain Types of Substrate and Biochemical Substances in Seed Germination and Plant Development of Spruce (*Picea abies*). *Bulletin of the University of Agricultural Sciences Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 77(1):128-135, CABI, <file:///C:/Users/USAMV-Cluj/Downloads/13762-Article%20Text-54132-1-10-20200603.pdf>
3. Holonec, L., Viman, O., Sîngeorzan, S. M., **Truța, P.**, Truța, A. M. (2021). Chemical Methods to Improve Seed Germination and Seedling Growth of Honey Locust (*Gleditsia triacanthos* L.). seeds. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture*, 78(1):63-70, CABI, [file:///C:/Users/USAMV-Cluj/Downloads/14103-Article%20Text-55075-3-10-20210604%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USAMV-Cluj/Downloads/14103-Article%20Text-55075-3-10-20210604%20(1).pdf)

4. Truța, A. M., Viman, O., Dohotar, V. D., Sîngeorzan, S., **Truța, P.**, Holonec, L. (2020). The Influence of Certain Types of Substrate and Biochemical Substances in Seed Germination and Plant Development of Spruce (*Picea abies*). Bulletin of the University of Agricultural Sciences Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture, 77(1):128-135, CABI, <file:///C:/Users/USAMV-Cluj/Downloads/13762-Article%20Text-54132-1-10-20200603.pdf>