



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură și Exploatare Forestiere

Ing. Emanuel Vasile BEŞLIU

Variabilitatea genetică a fagului în culturi comparative de proveniențe din România

REZUMAT

Conducător științific

Prof. dr. ing. Alexandru Lucian CURTU

BRAȘOV, 2026

CUPRINS

| | |
|--|----|
| PREFAȚĂ | 4 |
| ABREVIERI | 6 |
| INTRODUCERE | 9 |
| CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CUNOȘTINȚELOR | 10 |
| 1.1. POTENȚIALUL ADAPTATIV AL SPECIILOR DE ARBORI | 10 |
| 1.1.1. INTERACȚIUNEA DINTRE GENOTIP ȘI MEDIU..... | 10 |
| 1.1.2. IMPLICAȚIILE VARIABILITĂȚII GENETICE ÎN PROCESUL DE ADAPTARE | 11 |
| 1.1.3. PLASTICITATEA FENOTIPICĂ | 12 |
| 1.1.4. MIGRAȚIA | 12 |
| 1.1.5. MIGRAȚIA ASISTATĂ..... | 13 |
| 1.2. CULTURILE DE PROVENIENȚE | 14 |
| 1.3. FAGUL (<i>FAGUS SYLVATIC</i> L.) | 14 |
| CAPITOLUL 2: SCOP ȘI OBIECTIVE | 17 |
| 2.1. SCOPUL CERCETĂRIILOR | 17 |
| 2.2. OBIECTIVELE CERCETĂRIILOR..... | 17 |
| CAPITOLUL 3: MATERIAL ȘI METODĂ..... | 18 |
| 3.1. CULTURILE DE PROVENIENȚE INTERNAȚIONALE DE FAG DIN ROMÂNIA | 18 |
| 3.2. CARACTERIZAREA CONDIȚIILOR STAȚIONALE DIN CELE PATRU CULTURI | 19 |
| 3.3. MĂSURĂTORILE EFECTUATE | 20 |
| 3.4. ANALIZA STATISTICĂ A DATELOR | 26 |
| 3.4.1. ANALIZA DATELOR LA NIVELUL SUPRAVIEȚUIRII ȘI CARACTERISTICILOR BIOMETRICE | 26 |
| 3.4.2. ANALIZA PLASTICITĂȚII FENOTIPICE..... | 27 |
| 3.4.3. ANALIZA REACȚIEI PROVENIENȚELOR LA TRANSFER..... | 27 |
| 3.4.4. ANALIZA MODELĂRII FUNCȚIEI UNIVERSALE DE RĂSPUNS..... | 27 |
| 3.4.5. ANALIZA DATELOR FENOLOGICE | 29 |
| 3.4.6. ANALIZA DATELOR ANATOMICE ALE LEMNULUI | 30 |
| CAPITOLUL 4: REZULTATE ȘI DISCUȚII | 31 |
| 4.1. SUPRAVIEȚUIREA ȘI CARACTERISTICILE BIOMETRICE | 31 |
| 4.1.1. SUPRAVIEȚUIREA..... | 31 |

| | | |
|---|--|----|
| 4.1.2. | ÎNĂLȚIMEA ȘI DIAMETRUL DE BAZĂ | 32 |
| 4.1.3. | DIAMETRUL RAMURILOR | 35 |
| 4.1.4. | ÎNFURCIREA | 36 |
| 4.1.5. | CALITATEA TULPINII | 38 |
| 4.1.6. | EVALUAREA PERFORMANȚELOR DE CREȘTERE | 40 |
| 4.1.7. | DISCUȚII | 42 |
| 4.2. | PLASTICITATEA FENOTIPICĂ..... | 45 |
| 4.2.1. | DISCUȚII | 47 |
| 4.3. | ANALIZA TRANSFERULUI PROVENIENȚELOR | 48 |
| 4.3.1. | DISCUȚII | 50 |
| 4.4. | TESTAREA MODELULUI FUNCȚIEI UNIVERSALE DE RĂSPUNS..... | 52 |
| 4.4.1. | MODELAREA CREȘTERII ÎN ÎNĂLȚIME PENTRU PERIOADA ACTUALĂ | 52 |
| 4.4.2. | MODELAREA CREȘTERII ÎN ÎNĂLȚIME ÎN DIFERITE SCENARII CLIMATICE..... | 54 |
| 4.4.3. | DISCUȚII | 58 |
| 4.5. | ANALIZA PROCESELOR FENOLOGICE..... | 60 |
| 4.5.1. | ÎNFRUNZIREA..... | 60 |
| 4.5.2. | SENESCENȚA..... | 63 |
| 4.5.3. | DURATA SEZONULUI DE VEGETAȚIE..... | 65 |
| 4.5.4. | DISCUȚII | 66 |
| 4.6. | ANALIZA ANATOMICĂ A LEMNULUI | 69 |
| 4.6.1. | EVALUAREA CREȘTERILOR..... | 69 |
| 4.6.2. | RELAȚIA DINTRE CLIMAT ȘI PARAMETRII ANATOMICI | 70 |
| 4.6.3. | DISCUȚII | 74 |
| CAPITOLUL 5: CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE | | 78 |
| 5.1. | CONCLUZII | 78 |
| 5.1.1. | CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA SUPRAVIEȚUIRII ȘI A CARACTERISTICILOR BIOMETRICE | 78 |
| 5.1.2. | CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA PLASTICITĂȚII FENOTIPICE | 78 |
| 5.1.3. | CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA TRANSFERULUI PROVENIENȚELOR | 78 |
| 5.1.4. | CONCLUZII DESPRINSE DIN MODELAREA ÎNĂLȚIMII LA NIVELUL ROMÂNIEI | 79 |
| 5.1.5. | CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA FENOLOGIEI | 79 |
| 5.1.6. | CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA ANATOMICĂ A LEMNULUI | 80 |

| | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|----|
| 5.2. | CONTRIBUȚII ORIGINALE | 80 |
| 5.3. | DISEMINAREA REZULTATELOR | 81 |
| 5.4. | DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE..... | 82 |
| CAPITOLUL 6: BIBLIOGRAFIE..... | | 83 |

PREFAȚĂ

Rezultatele celor patru ani de studiu sunt prezentate în această teză de doctorat, realizată cu sprijinul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, Stațiunea Brașov și sub egida Școlii Doctorale Interdisciplinare din cadrul Universității Transilvania din Brașov. Cercetarea a vizat evaluarea potențialului adaptativ al fagului pe baza unei analize multidirecționale realizate în culturi comparative din România, în scopul observării comportamentului proveniențelor internaționale în condițiile staționale locale. Întreaga activitate a fost sprijinită de numeroși specialiști colegi și de familia mea, fără de care nu aș fi reușit îndeplinirea acestui obiectiv. Drept urmare, în cele ce urmează doresc să îmi afirm recunoștința pentru implicarea lor în progresul meu profesional.

Cu smerenie și profundă recunoștință, mai întâi de toate îi mulțumesc lui Dumnezeu pentru sprijin, înțelepciune, pricepere și, mai mult ca orice, pentru oportunitatea de a fi înconjurat de oameni deosebiți, a căror susținere întruchipează binecuvântarea lui. Toate realizările obținute sunt efectul dragostei lui Dumnezeu arătată față de mine.

În plan profesional, îmi exprim gratitudinea față de Prof. Dr. Ing. Alexandru Lucian Curtu, sub îndrumarea căruia am reușit să finalizez această lucrare. Îi mulțumesc pentru încrederea acordată, pentru profesionalismul cu care m-a sprijinit și pentru oportunitățile pe care mi le-a pus la dispoziție, contribuind astfel la progresul meu în cercetarea științifică. Nu în ultimul rând, doresc să apreciez bunăvoința, răbdarea și inteligența care descriu caracterul d.lui profesor.

Doresc să îmi afirm aprecierea față de membrii comisiei de îndrumare care m-au sprijinit și îndrumat în toți acești ani. Mulțumesc d.lui Prof. Dr. Ing. Neculae Șofletea pentru profesionalism și pentru evaluările sale constructive, care au fost esențiale pentru îmbunătățirea tezei, dar și în decursul formării mele profesionale din cadrul programelor de licență și masterat. Mulțumesc d.rei Conf. Ing. Elena Ciocîrlan pentru implicarea sa în perfecționarea lucrării de față, dar și pentru bunăvoința și ajutorul acordat, încă din primul an de facultate. Mulțumiri alese adresez colegului meu CS I Dr. Ing. Marius Budeanu pentru toată susținerea și implicarea lui în finalizarea lucrării și în parcursul meu profesional. Această lucrare nu ar fi fost posibilă fără infrastructura, sprijinul financiar și competența științifică puse de el la dispoziția mea.

Îmi exprim sincera apreciere față de conducerea Institutului Național de Cercetare Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, reprezentată prin Acad. CS I Dr. Ing. Ovidiu Badea, CS II Dr. Ing. Șerban Octavian Davidescu, CS I Dr. Ing. Ecaterina Nicoleta Apostol și CS I Dr. Ing. Nicu Constantin Tudose, pentru întreaga logistică pusă la dispoziția mea, pentru suportul financiar al cercetărilor, dar mai cu seamă pentru stagiile de perfecționare profesională, care au influențat decisiv progresul meu profesional.

Pe parcursul cercetărilor am fost sprijinit de expertiza statistică în analiza datelor a dl. Conf. Dr. Ing. Ioan Dutcă. De asemenea, dl. Dr. Ing. Albert Ciceu m-a ajutat în înțelegerea și implementarea modelării. Pe

lângă aceștia, dna. CS II Dr. Ing. Maria Ioana Pleșca, prin proiectul pe care îl coordonează, a susținut financiar parte din aceste cercetări. Tuturor le adresez mulțumiri.

Mulțumesc d.lui Prof. Dr. Ing. Cătălin Roibu pentru expertiza și întreaga logistică puse la dispoziția mea în cadrul analizelor anatomice ale lemnului, care sunt un punct forte al acestei lucrări.

Adresez mulțumiri d.lui Prof. Dr. Ing. Iosif Vorovencii pentru acceptul de a fi președintele comisiei de susținere publică a prezentei lucrări.

Mulțumirile mele se îndreaptă și către colegii mei Teh. Dan Pepelea, Teh. Gabriela Grosu, Ing. Ștefan Tănăsie, Ing. Bogdan Tănăsie, Ing. Cosmin Durdu, care m-au sprijinit în cadrul lucrărilor de teren și către colegii de doctorat Dr. Ing. Mihnea Ioan Cezar Ciocîrlan, ACS Ing. Emanuel Stoica, ACS Ing. Pleșca Bogdan și ACS Ing. Ștefan Petrea, pentru colaborările benefice și suportul acordat.

Mulțumesc d.lui Marin Știrbu, d.nei Maria Ecaterina Asandei, d.rei Denisa Cosmiuc, d.lui Andrei Mursa și d.lui Cosmin Adriescu pentru tot suportul acordat în analiza anatomică a lemnului, efectuată în cadrul Laboratorului de Dendrometrie al Universității „Ștefan Cel Mare” Suceava.

Prietenei mele, dr. Marinela Blaj, îi mulțumesc pentru ajutorul acordat în corectarea și editarea acestei lucrări, dar și pentru încurajările și sfaturile care mi-au fost sprijin în decursul timpului.

Toate cercetările și întreg progresul meu profesional nu ar fi existat fără susținerea familiei mele. Le sunt profund recunoscător părinților mei, Vasile și Viorica, pentru tot efortul și dedicarea lor nemărginită în creșterea și susținerea mea; tot lor le datorez și pasiunea pentru acest domeniu. Adresez mulțumiri surorilor mele Lavinia și Anca, precum și cumnaților mei Andrei și Adi, pentru încurajări și sprijin emoțional. Fratelui meu David îi mulțumesc nu doar pentru încurajările și prietenia lui necondiționată, ci și pentru ajutorul acordat în lucrările de teren. În mod deosebit, mulțumesc socrilor mei, Mihai și Kalipsonia, a căror grijă și bunătate m-au întărit și susținut. Mulțumesc și bunicilor mei, Dumitru, Floarea și Aurica, pentru încurajare.

Iubitei mele soții, Mihaela, îi sunt recunoscător pentru dragostea sa necondiționată, manifestată prin înțelepciune, răbdare, încurajare, consolare și sprijin concret. Încrederea ei în mine, ajutorul în lucrările de teren și dăruirea ei au fost baza finalizării acestui stagiou doctoral.

Dedic această lucrare fetiței mele, Eva Olivia, căreia îi sunt recunoscător pentru imboldul de a continua, generat de nașterea ei și pentru dragostea ei sinceră.

Emanuel Vasile Beșliu

ABREVIERI

F. sylvatica – *Fagus sylvatica*;

F. orientalis – *Fagus orientalis*;

a.s.l – engl. above sea level – deasupra nivelului mării;

EQ – indicele Ellenberg Quotient;

SDM – engl. Species Distribution Model - modelul distribuției speciilor;

URF – engl. Universal Response Function – modelul funcției universale de răspuns;

G - genotip;

M – mediu;

ΔEQ – distanța ecologică de transfer;

C – cultura Cărbunari;

S – cultura Săcele;

A – cultura Aleșd;

F – cultura Fântănele;

Sr – supraviețuirea;

Db – diametrul de bază;

Ht – înălțimea totală;

Fk – înfurcirea;

Ct – calitatea tulpinii;

N – nivelul de referință;

CR – caracteristica analizată;

SV – sursa variației;

GD – gradele de libertate;

MP – media pătratelor;

F – valoarea testului F;

P – valoarea semnificație statistice;

MD – media generală;

AS – abaterea standard;

ES – eroarea standard;

CV – coeficientul de variație;

H – valoarea diferențelor dintre distribuțiile grupurilor;

XS – valoarea diferențelor dintre valorile observate și cele așteptate;

KS – testul Kolmogorov-Smirnov;

V%– varianța în procente;

χ^2 - testul Chi-pătrat;

R - rezultatul ecuației de regresie;

site_Tmax_sm și prov_Tmax_sm – temperatura maximă din timpul verii la nivelul locului de testare și al locului de origine;

site_PPT_sp și prov_PPT_sp - precipitațiile din primăvară la nivelul locului de testare și al locului de origine;

site_AHM și prov_AHM - indicii anual de temperatura și umiditate la nivelul locului de testare și al locului de origine;

prov_PPT_01 - precipitațiile din luna ianuarie la nivelul locului de testare;

OOB - eng. Out-Of-Bag - eroarea de predicție;

Hn – înălțimea normalizată;

He – înălțimea estimată;

RCP – engl. - Representative Concentration Pathway - scenariu reprezentativ al concentrațiilor de gaze cu efect de seră;

GLMM - model mixt generalizat;

GDD – engl. Growing degree days – zile grade de creștere;

SDD – engl. Senescence degree days – zile grade de senescență;

DOY – engl. day of the year – ziua anului;

GAM – engl. General additive model – model aditiv generalizat;

MRW – media lățimii inelului (creșterea anuală);

MLA – media ariei lumenului;

MVA – media ariei vaselor;

TRW – lățimea inelului anual de creștere;

r – valoarea corelației dintre parametri anatomici;

CD – densitatea celulelor;

Dh – media diametrului hidraulic;

Ks – conductanța hidraulică;

MLAm – media minimă a ariei lumenului;

MLAx – media maximă a ariei lumenului;

MRW – media creșterilor anuale;

RGVI – indicele de grupare a vaselor; și parametri climatici;

vpd – deficitul de presiune a vaporilor de apă;

tmx – temperatura maximă;

tmp – temperatura medie;

tmin – temperatura minimă;

soil – indicele de umiditate a solului;

pre – precipitațiile medii;

Spei 1-12 – indicele standardizat de evapotranspirație lunar.

INTRODUCERE

Realitatea actuală, dominată de incertitudinile generate de schimbările climatice (Lee et al. 2023), aduce în prim-plan necesitatea identificării precise a limitărilor ecologice ale speciilor de arbori (Benito Garzón et al. 2019), acțiune esențială pentru cuantificarea potențialului adaptativ, care stă la baza fundamentării strategiilor de atenuare a impactului climatic. Ținând cont de complexitatea factorilor de mediu (Booth et al. 1988), care condiționează procesele fiziologice ale speciilor de arbori (Case et al. 2005; Holt et al. 2004), estimarea potențialului adaptativ necesită o abordare multidirecțională, bazată pe analiza proceselor definiții ale adaptării.

Testarea potențialului adaptativ al speciilor de arbori poate fi realizată eficient prin intermediul culturilor de proveniențe (Mátyás 1996), care permit separarea efectului genotipului de cel al mediului (White et al. 2007) și, prin urmare, facilitează identificarea populațiilor cu adaptări specifice, care pot fi utilizate ca surse de material genetic în strategiile de migrație asistată (Chakraborty et al. 2024), menite să susțină persistența speciilor sub presiunea schimbărilor climatice (Ste-Marie et al. 2011).

Fagus sylvatica L. este considerată a fi cea mai importantă specie de arbori din Europa (Leuschner et al. 2006) și o specie emblematică pentru ținutul forestier românesc (Drăcea 2018). Condițiile staționale foarte diverse în care vegetează la nivelul arealului au determinat dezvoltarea mai multor ecotipuri (Șofletea & Curtu 2008), iar testarea diferitelor populații europene de fag a devenit necesară datorită nevoii de cunoaștere a particularităților de adaptare ale speciei (Von Wuehlich 2004). Astfel, implementarea rețelei internaționale de culturi de proveniențe a generat posibilitatea testării potențialului adaptativ al speciei în diverse condiții staționale și realizarea prognozelor privind viitorul speciei (Robson & Garzón 2018).

Având în vedere necesitatea aprofundării cunoașterii asupra comportamentului fagului în condițiile staționale din România, studiul de față urmărește estimarea potențialului adaptativ al speciei printr-o abordare multidirecțională, menită să surprindă cât mai eficient acest proces. Astfel, utilizând cele patru culturi de proveniențe internaționale de fag, instalate în condiții caracteristice pentru arealul autohton al speciei, s-au realizat cercetări privind: evaluarea performanțelor de creștere, determinarea nivelului de plasticitate fenotipică, examinarea efectului transferului proveniențelor, modelarea creșterii în înălțime în diferite scenarii climatice, studiul particularităților fenologice și analiza anatomică a lemnului.

Rezultatele obținute, ce au fost publicate și în mai multe articole științifice (Besliu et al. 2024a; Besliu et al. 2024b; Besliu et al. 2024c), aduc o contribuție modestă la cunoașterea particularităților de adaptare a speciei și susțin nevoia unei ajustări a managementului pădurilor de fag pentru asigurarea persistenței și productivității viitoare. De asemenea, studiul oferă informații referitoare la transferul materialelor forestiere de reproducere și, totodată, evidențiază necesitatea aprofundării problematicei adaptării speciei la nivel local,

CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL CUNOȘTIINȚELOR

1.1. Potențialul adaptativ al speciilor de arbori

1.1.1. Interacțiunea dintre genotip și mediu

Potențialul adaptativ al speciilor este definit ca fiind funcția unui complex de factori biologici, fiziologici, ecologici, precum și a procesului de evoluție, care acționează simultan și diferit în timp și spațiu (Royer-Tardif et al. 2021), furnizând speciilor abilitatea de a se aclimatiza la noi condiții de mediu (Glick et al. 2011). Acești factori sunt determinați de plasticitatea fenotipică a indivizilor, diversitatea genetică a populațiilor, capacitatea de evoluție a speciilor, precum și de schimbul genetic în interiorul populațiilor sau între populații diferite (Alfaro et al. 2014; Jump et al. 2009; Menon et al. 2020; Nicotra et al. 2010; Savolainen et al. 2007).

Adaptarea la condițiile de mediu este considerată a fi parte a procesului de evoluție, care este determinat de presiunea de selecție a mediului, astfel fiind promovate genotipurile cele mai rezistente. Însă apariția unor genotipuri mai performante este condiționată de schimbul de gene între populații (Bussotti et al. 2015).

Contextul actual, în care schimbările climatice sunt în prim plan, a reaprins nevoia testării capabilităților speciilor de arbori de a rezista și, implicit, a se adapta la noi condiții de mediu (Benito Garzón et al. 2019). Studiul adaptabilității este condiționat de analiza interacțiunilor dintre factorii de mediu și particularitățile biologice ale speciilor, iar pentru obținerea unor rezultate concrete trebuie analizat tot complexul de factori.

Una dintre legile fundamentale ale geneticii prezintă fenotipul ca fiind rezultatul interacțiunii dintre potențialul ereditar și totalitatea factorilor externi. Din această lege decurge problematica diferențierii controlului genetic și al celui de mediu în variația unui caracter. Astfel, relația G (genotip) x M (mediu) implică determinarea potențialului genetic, care stă la baza unui caracter, și a potențialului productiv, reprezentat de fenotip sub acțiunea factorilor de mediu. Într-un mod mai explicit, potențialul genetic al arborelui este integral transmis în fenotip numai în cazul unor condiții de mediu propice. Dacă aceste condiții optime nu sunt asigurate, fenotipul va fi net inferior, chiar dacă capacitatea genetică a individului este ridicată (Enescu 1972).

White et al. (2007) definesc relația G x M ca fiind deviația unui genotip de la continuitatea performanțelor de creștere în diferite condiții staționale. Prin urmare, apariția diferențelor fenotipice ale unui genotip la schimbarea mediului indică prezența unei interacțiuni semnificative între acesta și mediu.

Bazându-se pe faptul că fenotipul este rezultatul interacțiunii dintre genotip și mediu, Fiorani & Schurr (2013) au afirmat că determinarea caracteristicilor fenotipului implică o serie de măsuri și tehnici care, în final, asigură un răspuns clar în privința reacției speciilor la diferite condiții, analizarea fenotipului fiind astfel un mod eficient de determinare a performanțelor de creștere și adaptare.

Analiza diferențelor care apar între populații sau specii, în legătură cu performanțele de creștere și potențialul adaptativ, se bazează pe studiul relației dintre genotip și mediul de viață, iar unele dintre conceptele derivate din această relație sunt plasticitatea fenotipică, analiza reacției populațiilor la transferul în alte condiții staționale, particularitățile migrației speciilor, evaluarea comportamentului fenologic, precum și analiza anatomică a lemnului.

1.1.2. Implicațiile variabilității genetice în procesul de adaptare

Adaptarea speciilor forestiere la schimbările de mediu este unul dintre cele mai intens studiate subiecte, iar un rol primordial în această luptă o are variabilitatea genetică, care condiționează procesul de evoluție naturală a speciilor (Ciocîrlan & Șofletea 2013).

Specializarea genotipului este parte integrantă a adaptabilității speciilor și presupune schimbarea acestuia prin determinarea unor noi norme de reacție, care să înnoiască capacitatea de aclimatizare a vechiului genotip. Acest proces al adaptării este un mecanism al evoluției și implică modificări în structura genetică a speciilor de arbori, modificări care sunt bazate pe variabilitatea genetică a populațiilor (Enescu & Ionită 2000). Potențialul adaptativ este determinat în principal de interacțiunea dintre schimbul de gene și selecție, iar potențialul de aclimatizare la noi condiții de mediu este influențat de variabilitatea genetică și dispersie (Savolainen et al. 2007).

Diferențierea geografică a populațiilor, în privința variabilității genetice, este rezultatul acțiunii unor factori genetici cum sunt mutațiile, deriva genetică, selecția naturală sau schimbul de gene (Booy et al. 2000).

Variabilitatea genetică scăzută a populațiilor poate influența negativ procesul de adaptare, datorită lipsei schimbului de gene; astfel, populațiile fragmentate sau cele cu slabă reprezentare geografică sunt în pericol de extincție (Alberto et al. 2013; Keir et al. 2011).

Procesul de adaptare are loc atât între diferite populații ale unei specii, cât și în interiorul aceleiași populații, atunci când condițiile staționale sunt diferite. Astfel, adaptarea la condițiile locale poate fi eficientă dacă există o variabilitate genetică ridicată. Prin urmare, diversitatea genetică este esențială în procesul de adaptare și evoluție a speciilor de arbori (Booy et al. 2000).

Analiza variabilității genetice are o deosebită importanță în determinarea diferențelor între populații deoarece aceste informații stau la baza cuantificării potențialului adaptativ al speciilor și a fundamentării intervențiilor umane în scopul susținerii echilibrului în distribuția și persistența geografică a acestora. De asemenea, această variabilitate genetică cuprinde atât forme ale variabilității fenotipice, cât și cele ale variabilității structurii genomice a speciilor.

1.1.3. Plasticitatea fenotipică

Capacitatea unui genotip de a manifesta diferite fenotipuri, sub influența condițiilor staționale diverse, este cunoscută sub denumirea de plasticitate fenotipică (Bradshaw 2006). Prin urmare, plasticitatea fenotipică se referă la abilitatea unui genotip de a supraviețui în condiții de vegetație diferite, prin modificarea fenotipului, iar măsura în care aceste modificări au loc determină gradul de plasticitate al unui organism (Bradshaw 1965). Astfel, plasticitatea fenotipică vizează ajustarea caracteristicilor funcționale ale speciilor de arbori, atât la nivel morfologic, cât și fiziologic, în scopul adaptării la noi condiții de mediu (Bussotti et al. 2015).

Plasticitatea fenotipică poate fi analizată la nivel de caracter sau la nivel de genotip; este controlată genetic și poate fi afectată de fenomenul de selecție. De asemenea, această abilitate a plantelor este implicată direct în procesul de adaptare și este influențată în mod particular de stimulii de mediu (Bradshaw 1965). Crispo (2008) prezintă plasticitatea fenotipică ca fiind un proces aflat în strânsă legătură cu selecția divergentă și schimbul de gene dintre populații. Importanța acestui proces natural decurge din faptul că poate determina adaptarea rapidă a genotipurilor la noi condiții de mediu, permițând astfel supraviețuirea populațiilor în diferite condiții de mediu și reducând în același timp riscul extincției (Benito Garzón et al. 2011).

Plasticitatea este determinată de factorii epigenetici care conduc la schimbări ale expresiei genelor fără a altera ADN-ul organismelor (Nicotra et al. 2010), iar limitările acestui proces apar atunci când presiunea mediului depășește plasticitatea caracteristicilor de adaptare a speciei, fenomen întâlnit în populațiile marginale de la limita arealului (Bussotti et al. 2015; Chevin et al. 2010; Thuiller et al. 2008).

Conceptul de plasticitate fenotipică are două sensuri: unul care vizează capacitatea genotipului de a menține fitnessul prin adaptarea fenotipului, pe când celălalt vizează o abordare diametral opusă, care semnalează lipsa capacității de adaptare sau lipsa fitnessului (Bradshaw 2006).

Plasticitatea fenotipică este separată și de Ghalambor et al. (2007) în plasticitate adaptativă și non-adaptativă. Plasticitatea adaptativă este definită ca fiind abilitatea unui genotip de a coloniza un nou mediu, favorizând atingerea unui nou optim din punct de vedere fenotipic, în care selecția va acționa. Plasticitatea non-adaptativă este răspunsul genotipului la interacțiunea cu stațiuni limitative, prin expunerea unui fenotip care este mult inferior celui din optimul ecologic al speciei.

Conceptul de plasticitate fenotipică înglobează procese genetice complexe și destul de puțin descoperite, mai ales la nivelul vegetației forestiere. Însă, pe baza diferențierii fenotipice se pot extrage informații prețioase cu privire la nivelul de plasticitate al speciilor, fapt ce este de o importanță crucială în contextul schimbărilor de mediu.

1.1.4. Migrația

Migrația este fenomenul natural ce presupune schimbul de gene între populații (Enescu 1972). Într-o formulare mai precisă, migrația este definită ca fiind mișcarea alelelor între populații (White et al. 2007).

Acest proces se poate realiza natural, prin transferul polenului (migrația genelor) și a semințelor (migrația genotipului) (Enescu 1972) sau artificial, prin transplantarea puieților (Wright 1976). Astfel, efectele migrației pot conduce la diversificarea structurii genetice a populațiilor, însă persistența acestui fenomen, pe parcursul mai multor generații, poate afecta diferențierea genetică între populații (White et al. 2007).

Fenomenul migrației este considerat a fi parte din potențialul adaptativ al speciilor la schimbările de mediu (Aitken et al. 2008). Prin urmare, acest proces apare atunci când exigențele ecologice ale speciei sunt depășite, iar mecanismul de adaptare folosește migrația în scopul identificării și colonizării unor noi habitate, care pot să asigure persistența speciei (Thurman et al. 2020).

Limitările acestui proces apar, în principal, datorită biologiei speciilor de arbori care nu favorizează dispersia într-un ritm rapid. Acestea decurg din capacitatea de reproducere, care apare la vârste foarte înaintate la speciile cele mai importante (Giesecke & Brewer 2018) și prezintă o periodicitate mare, iar dispersia materialului semincer este dificilă (Svenning et al. 2008; Svenning & Skov 2007). Pe lângă acestea, rapiditatea schimbărilor climatice, previzionate pentru viitor, ar putea depăși capacitatea de migrație a speciilor, iar în aceste condiții extincția anumitor specii este foarte probabilă (Aubin et al. 2018; Boisvert-Marsh & de Blois 2021). Cu toate acestea, speciile de arbori cu capacitate ridicată de reproducere și o dispersie facilă, ar putea substitui speciile cu un potențial redus al migrației (Boisvert-Marsh et al. 2020), însă acest fapt ar cauza pierderea speciilor valoroase economic.

Luând în considerare aceste aspecte, intervenția umană este necesară în aceste procese naturale dezechilibrate de practicile antropice, în vederea reducerii, pe cât posibil, a consecințelor schimbărilor de mediu, așteptate în viitor. Unul dintre mecanismele ce pot fi utilizate în acest caz este sprijinul migrației speciilor, prin identificarea celor mai valoroase și reziliente populații și specii.

1.1.5. Migrația asistată

Migrația asistată este definită ca sprijinul artificial al mișcării sau expansiunii speciilor, respectiv al populațiilor, în vederea diminuării efectelor negative ale schimbărilor climatice (Ste-Marie et al. 2011). Acest concept derivă în principal din două fenomene: asistarea transferului de gene și asistarea colonizării de noi teritorii. Asistarea mișcării genelor prevede intervenția factorului antropic în transferul genotipurilor între populații, dar doar la nivelul arealului natural de răspândire al speciei. Transferul artificial al unor specii sau populații în afara arealului natural, corespunde fenomenului de asistare a colonizării (Aitken & Whitlock 2013). Pe lângă acestea, mai există și posibilitatea introducerii speciilor exotice, care este considerată o altă ramură a migrației asistate și poate fi efectuată prin transferul intercontinental sau transcontinental al speciilor (Johnston 2009).

Prin urmare, migrația asistată este o tehnică ce presupune intervenția umană în scopul sprijinirii transferului populațiilor din zonele în care acestea sunt în pericol de extincție, datorită schimbărilor de

mediu, în alte zone, unde condițiile climatice actuale și viitoare pot favoriza supraviețuirea speciei și menținerea serviciilor ecosistemice ale acesteia (Sansilvestri et al. 2015).

În sectorul silvic, migrația asistată este considerată a fi foarte utilă în direcția menținerii viabilității și a productivității arboretelor instalate (Leech et al. 2011), a utilizării surselor de semințe adaptate la climat, asigurându-se astfel menținerea arboretului pe toată durata procesului de producție (Gray et al. 2011), prevenirea dispariției unor specii și protejarea biodiversității (Hewitt et al. 2011), precum și păstrarea diverselor servicii ecosistemice oferite de pădure (Pedlar et al. 2012).

Însă, utilizarea migrației asistate implică și potențiale pericole, cum ar fi: riscul producerii unor invazii, dificultatea implementării, hibridizarea interspecifică, posibilitatea slabei adaptări a populațiilor sudice la condițiile din nordul arealului, precum și pierderile economice și ecologice ce pot apărea (Benito-Garzon et al. 2013; Hewitt et al. 2011).

1.2. Culturile de proveniențe

Genotipurile selectate din populațiile naturale ce aparțin unei anumite zone din arealul speciei sunt cunoscute sub denumirea de proveniență, care este definită și ca sursă, origine sau origine naturală (Wright 1976). White et al. (2007) au definit proveniența ca fiind locația geografică a populației din care a fost recoltat materialul de reproducere.

Testarea performanțelor de creștere și adaptare a proveniențelor selectate din diferite populații se face în culturi specializate, denumite culturi sau teste comparative. Scopul principal al acestor teste este observarea contribuțiilor genetice și a influențelor de mediu care conduc la apariția fenomenului natural de variație a plantelor lemnoase la nivelul fenotipului (White et al. 2007).

Culturile de proveniențe sunt definite de Wright (1976) ca fiind experimente în care se utilizează semințe colectate din diferite arborete, în general naturale, iar puieții sunt instalați în condiții similare. Singura metodă ce poate fi utilizată pentru determinarea performanțelor de creștere și adaptare a diferitelor proveniențe, în condiții de mediu diverse și, implicit, a deciziilor privind transferul materialelor de reproducere, este utilizarea testelor de proveniențe de lungă durată (White et al. 2007).

Mátyás (1996) definește testele de proveniențe ca fiind unele dintre cele mai bune metode prin care se pot testa capacitățile de adaptare a speciilor forestiere la diferite condiții de mediu, reliefând astfel o importantă utilitate a acestor culturi, care au cunoscut o creștere semnificativă a relevanței în cercetarea silvică din ultimii ani.

1.3. Fagul (*Fagus sylvatica* L.)

Din punct de vedere al încadrării sistematice, specia *F. sylvatica* L. face parte din ordinul *Fagales*, familia *Fagaceae*, genul *Fagus* (Manos et al. 2001; Milesescu et al. 1967; Șofletea & Curtu 2008).

Genul *Fagus* este unul dintre cele mai importante genuri de plante din zona temperată a emisferei nordice, unde este reprezentat de 10 specii de arbori, răspândite în Europa, estul Americii de Nord și Asia (Denk et al. 2002; Shen 1992).

Legat de originea genului *Fagus*, unele dintre cele mai vechi fosile identificate au o vechime de 45 milioane de ani și au fost descoperite în vestul Americii de Nord (Manchester & Dillhoff 2004), iar acum circa 30 de milioane de ani se presupune că acest gen era răspândit din America de Nord până în Asia și vestul Europei (Denk et al. 2005). La nivelul continentului european, mai exact în zona Saxoniei, au fost identificate fosile de *Fagus prisca* Ett. datând din Cretacic (Milescu et al. 1967).

Pe teritoriul României, cea mai întâlnită specie din genul *Fagus* este *F. sylvatica* L., dar, sporadic, apar și *F. orientalis* Lipsky precum și hibridul *F. × taurica* Popl. (Șofletea & Curtu 2008).

În perioada glaciațiunilor, fagul a supraviețuit în câteva refugii la nivelul continentului european, din care, ulterior, s-a extins pe întreg arealul. Slovenia și zona de est a munților Alpi precum și sudul Moraviei și Boemiei sunt considerate a fi principalele refugii unde fagul s-a retras în perioada glaciațiunilor. Pe lângă acestea, cercetările au evidențiat existența unor refugii mai restrânse în sudul Franței, centrul și sudul Italiei, nordul munților Iberici și în sudul peninsulei Balcanice (Magri 2008; Milescu et al. 1967). Colonizarea teritoriilor, după perioada glaciațiunilor, a fost influențată de factorii locali și regionali care au limitat expansiunea acestei specii și, în final, au contribuit la trasarea limitelor arealului natural de răspândire (Magri 2008; Magri et al. 2006).

În România, cercetările efectuate au evidențiat faptul că în a doua jumătate a postglaciarului, fagul a cunoscut o mare expansiune (Milescu et al. 1967), iar structura genetică a populațiilor atestă apartenența fagului din Carpați la haplotipul european (Magri 2008).

Alte cercetări au remarcat că, în expansiunea sa de la nivelul României, fagul a concurat cu molidul în zonele altitudinale înalte și cu carpenul în zonele joase. Pe lângă acestea, se consideră că începutul expansiunii acestei specii a avut loc în zona munților Maramureșului, acum 5110 ani. În sud-vestul și nord-vestul țării a apărut acum circa 4500 de ani, în sud-est acum 3000 de ani, iar în sud-vest acum 4800-5000 de ani. De asemenea, există ipoteza existenței unui refugiu glaciatic în zona Munților Apuseni, dar aceasta nu a fost confirmată de alte cercetări (Fărcaș et al. 2013).

Fagul (*F. sylvatica* L.) este una dintre cele mai importante specii de arbori din ținutul forestier european (Leuschner & Ellenberg 2017; Peters 2013), unde acoperă peste 910.000 km² (Bohn & Gollub 2007).

Arealul natural se întinde de la Munții Cantabrics în partea de vest, până la Munții Carpați și Munții Balcani în est, iar în partea de sud a arealului apare din Sicilia și urcă spre nord până în sudul Suediei și Norvegia (Magri 2008).

Fagul acoperă un spectru larg de stațiuni, fiind specie de câmpie și deal în partea de nord a arealului natural de răspândire, unde coboară până la nivelul mării, iar în partea de sud și est ajunge să vegeteze în zona montană, atingând altitudini de peste 2000 m (a.s.l.) (Magri 2008; Șofletea & Curtu 2008; Von Wuehlisch 2008).

Din totalul arealului european al acestei specii, o treime se regăsește în regiunea Munților Carpați (Biriș 2014), iar dacă nu ar fi fost înlocuită artificial, prin promovarea speciilor de rășinoase, ar fi ocupat în jur de 65% din totalul pădurilor de foioase și amestecuri din Europa (Knapp & Fichtner 2011).

În România, fagul este cea mai răspândită specie forestieră, însumând peste 30% din suprafața acoperită de păduri (Ifn 2024) și, totodată, 10% din totalul făgetelor europene (Biriș 2014). Cele mai întinse suprafețe se regăsesc în zona Munților Carpați, dar apare și în Banat, Transilvania și în zona centrală a Podișului Moldovei (Milescu et al. 1967).

În concluzie, *F. sylvatica* este o specie cu o importanță deosebită la nivelul continentului european, datorită arealului întins pe care îl ocupă și, în consecință, a implicațiilor deosebite în ceea ce privește aspectele ecologice, sociale și economice. Aceste implicații sunt cunoscute și la nivelul României, unde este cea mai întâlnită specie forestieră, România fiind descrisă de distinsul profesor Marin Drăcea, ca fiind un imens făget și denumită, de aceea, țara fagilor (Drăcea 2018).

Arealul natural de răspândire al speciei *F. sylvatica* este condiționat de factorii locali, îndeosebi cei climatici (Fang & Lechowicz 2006; Magri 2008). Astfel, aria de răspândire a acestei specii poate fi grupată în două zone din punct de vedere climatic, una aflată sub influența climatului oceanic și atlantic (vestul și centrul Europei), iar cealaltă aflată sub influența climatului continental (nord-estul și sud-estul Europei) (Șofletea & Curtu 2008).

În sudul și estul Europei, expansiunea fagului este limitată de temperaturile ridicate și precipitațiile scăzute (Czúcz et al. 2010; Jump et al. 2006a), iar în zona de nord-est a continentului european, temperaturile scăzute, coroborate cu înghețurile târzii, precum și cu precipitații mai mici de 500 mm/an împiedică ascensiunea speciei către ținuturile nordice (Bolte et al. 2007).

Exigențele fagului în privința condițiilor climatice includ temperaturi medii anuale care variază între 4,5 °C și 10 °C, precipitații medii anuale de 500-1000 mm, un sezon de vegetație de 110-150 de zile, cu veri umede și ierni blânde (Bolte et al. 2007; Giesecke et al. 2006; Packham et al. 2012), iar în ceea ce privește rezistența la secetă, este considerată a fi o specie moderat-sensibilă (Leuschner 2020).

Ținând cont de întinsul areal de răspândire și marea variație a condițiilor de vegetație din cuprinsul acestuia, *F. sylvatica* este considerată a fi cea mai de succes specie de plante din Europa Centrală (Leuschner et al. 2006).

CAPITOLUL 2: SCOP ȘI OBIECTIVE

2.1. Scopul cercetărilor

Preocupările actuale în cercetarea din domeniul forestier sunt concertate pe evaluarea capacității de adaptare a speciilor de arbori și a răspunsului acestora la dezechilibrele produse de fluctuațiile unui mediu aflat în schimbare. Aceste ținte ale comunității de cercetare sunt absolut necesare deoarece cunoașterea și testarea limitelor ecologice ale speciilor sunt primordiale în problematica adaptării. Odată cu apariția incertitudinilor privitoare la viitorul climatic al Terrei, domeniul forestier a intrat într-un proces de schimbare a paradigmei. Astfel, preocupările centrate în jurul productivității pădurilor au fost transformate progresiv în obiective orientate spre potențialul de adaptare al ecosistemelor forestiere. Însă, cele două perspective pot fi ușor contopite, deoarece nu poate exista productivitate fără adaptabilitate, iar productivitatea este, de fapt, una dintre modalitățile de validare a adaptabilității. În atingerea acestor ținte intervine mecanismul de testare a populațiilor și speciilor de arbori, corespondent geneticii cantitative. Astfel, prin modificarea condițiilor de mediu, genotipurile sunt evaluate pe baza răspunsului fenotipic, iar productivitatea și adaptabilitatea pot fi evaluate în scopul creșterii potențialului pădurilor de a susține nevoile comunității umane. Cunoscut fiind faptul că specia *F. sylvatica* este emblematică pentru ținutul forestier românesc, iar programele de ameliorare au favorizat speciile de rășinoase, determinarea potențialului adaptativ este esențială pentru viitorul speciei în zona arcului carpatic. În concluzie, putem afirma că:

Scopul cercetărilor a fost evaluarea unor proveniențe de fag din Europa, testate în diferite condiții locale de mediu în vederea estimării potențialului adaptativ și a posibilității de valorificare a acestora în condițiile staționale din România.

2.2. Obiectivele cercetărilor

Prezentul studiu de cercetare, centrat în jurul fagului, își propune îndeplinirea următoarelor obiective, stabilite în funcție de necesitățile de cercetare actuale:

1. Evaluarea performanțelor de creștere, în două serii de culturi de proveniențe, utilizând analiza variabilității răspunsului fenotipic, cuantificarea plasticității fenotipice și testarea reacției acestora la transferul în diferite condiții de mediu;
2. Modelarea experimentală a creșterii în înălțime pentru proveniențele internaționale de fag în condițiile de mediu din România, pentru perioada de testare, dar și în diferite scenarii climatice;
3. Studiul proceselor fenologice la nivelul proveniențelor testate în cultura Săcele;
4. Analiza anatomică a lemnului pentru proveniențele selectate din cultura Fântânele.

CAPITOLUL 3: MATERIAL ȘI METODĂ

3.1. Culturile de proveniențe internaționale de fag din România

Din datele analizate, primele preocupări legate de testarea fagului în România au apărut odată cu inițierea proiectelor europene de instalare a două serii de culturi de proveniențe internaționale în perioada 1995-1998. În urma acestor proiecte, două culturi de proveniențe au fost instalate în primăvara anului 1995 la Săcele (Carpații de Curbură – Munții Baiului) și Cărbunari (Carpații Orientali – Munții Gutâiului), iar alte două la Aleșd (Carpații Occidentali – Munții Plopiș) și Fântânele (Subcarpații Moldovei – Culmea Pietricica), în primăvara anului 1998 (Figura 3.1). Culturile din anul 1995 conțin un număr de 16 proveniențe comune, dar numărul total de proveniențe per cultură este diferit. În cultura Săcele s-au introdus un număr de 44 de proveniențe, iar în cultura Cărbunari 26 de proveniențe. În privința seriei din anul 1998, în cele două culturi au fost instalate 32 de proveniențe, dintre care 31 sunt comune (Mihai 2009). Prin urmare, instalarea acestor serii de culturi internaționale de proveniențe a vizat, în principal, testarea nivelului de adaptare al speciei la diferite condiții de mediu prin includerea populațiilor din întregul areal al speciei (Robson & Garzón 2018; Von Wuehlisch 2004).

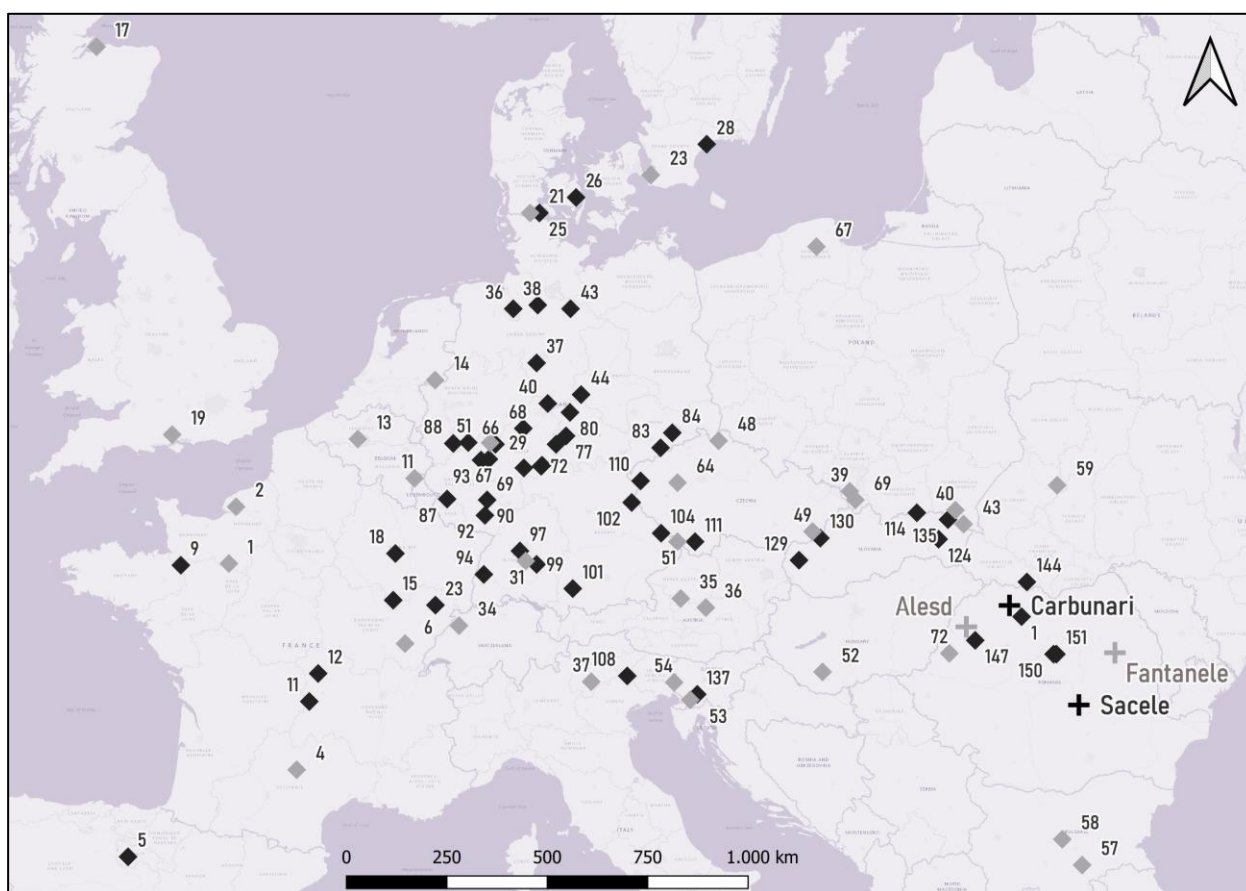


Figura 3.1. Locațiile proveniențelor (romburi negre pentru seria 1995 și gri pentru seria 1998) și culturilor (plus negru pentru seria 1995 și gri pentru seria 1998) (Robson & Garzón 2018).

Dispozitivul experimental utilizat la instalarea celor patru teste de proveniențe este de tipul blocurilor complet randomizate de 10 x 10, cu trei repetiții și un număr total de 50 de puieți/bloc, plantați la schema de 2 x 1 m (2 m între rânduri și 1 m între puieți pe rând). Fiecare bloc însumează o suprafață de 100 m² (Liesebach 2017; Von Wuehlisch 2004).

Având în vedere numărul mare de proveniențe testate și separarea lor pe serii de culturi, s-au atribuit coduri individuale fiecărei proveniențe, respectiv fiecărei culturi, în scopul eficientizării raportării în text. Aceste coduri fac referire la seria de culturi (95=1995 și 98=1998), indicativul culturii (A=Aleșd), indicativul țării de origine (Fr=Franța), respectiv numărul provenienței (1=1). Prin urmare, pentru referire la proveniența 1 Franța din cultura Aleșd, vom utiliza codul 98-A-Fr-01.

Proveniențele testate în cadrul primei serii provin din 12 țări din Europa, respectiv din condiții staționale diverse, iar cele două culturi din România sunt instalate în arealul natural al fagului, dar în condiții de mediu diferite (Robson & Garzón 2018).

Proveniențele românești 150 Sovata (25) și 151 Sovata (26), în prezentul studiu, au fost analizate ca o singură proveniență (150 Sovata), deoarece sunt originare din condiții staționale similare, atât din punct de vedere climatic, cât și geografic (același bazin hidrografic și altitudine similară).

În culturile instalate în seria din anul 1998, proveniențele sunt originare din 18 țări europene, iar cele două experimente, Aleșd și Fântânele, sunt amplasate în condiții staționale contrastante. Cultura de la Fântânele se află la limita estică a arealului natural al fagului, pe când cea de la Aleșd este situată în optimul ecologic al speciei. De asemenea, în cadrul acestei serii a fost introdusă și o proveniență de *F. orientalis*, originară din Bulgaria (57 - Gramaticovo) (Robson & Garzón 2018).

3.2. Caracterizarea condițiilor staționale din cele patru culturi

Pe baza mediilor anuale ale temperaturii și precipitațiilor, raportate la fișa ecologică a speciei (Stănescu et al. 1997), s-a realizat analiza climatică a culturilor, eficientizând astfel comparațiile între locurile de testare și, în același timp, oferind o imagine mai clară pentru înțelegerea reacției proveniențelor de fag la interacțiunea cu diferite condiții climatice. Un tip similar de caracterizare a fost utilizat și de Petrík et al. (2022) pentru separarea climatică a proveniențelor testate în culturile internaționale de fag. Datele climatice utilizate au fost extrase din baza de date *B4est*, utilizând aplicația *Climate Downscaling Tool* (B4EST 2024). Acest instrument se bazează pe reducerea la scară (engl. downscaling) a variabilelor climatice, utilizând o ajustare dinamică a gradientului altitudinal, la o rezoluție de 1 km, pe baza datelor furnizate de bazele CRU și UKCP18 (Marchi et al. 2024). Pe lângă acestea, pentru testarea acurateții datelor climatice, s-a utilizat temperatura înregistrată cu ajutorul senzorilor Hobo ProV2, instalați în fiecare cultură.

Analiza datelor climatice la nivelul seriei 95, extrase pentru perioada cuprinsă între anul instalării (1995) și anul în care s-au efectuat măsurătorile (2022), indică, pe de o parte, existența unor valori apropiate ale precipitațiilor medii anuale, iar pe de altă parte o diferență mai ridicată în cazul temperaturii medii.

În cazul culturii Săcele, valoarea medie a precipitațiilor a fost de 873 mm, iar în cultura Cărbunari precipitațiile au însumat 906 mm. Temperatura medie anuală în cultura Săcele (7,2 °C) a fost mai scăzută cu 2,4 °C față de cea înregistrată în cultura Cărbunari (9,6 °C). Astfel, condițiile climatice poziționează cele două experimente în optimul ecologic al speciei.

La nivelul culturilor din seria 98, analiza datelor climatice a evidențiat o diferențiere clară între cele două locuri de testare. Astfel, în cultura Aleșd, cuantumul precipitațiilor medii anuale a fost de 877 mm, iar temperatura medie a fost de 8,3 °C, situându-se în optimul ecologic al speciei. La nivelul culturii Fântânele, precipitațiile medii anuale au însumat 591 mm, iar temperatura medie a fost de 10,0 °C, ceea ce poziționează acest experiment în zona condițiilor limitative din punct de vedere ecologic.

3.3. Măsurătorile efectuate

În anul 2022, la 27 de ani de la instalarea experimentelor din seria 95 și, respectiv, 24 de ani pentru cele din seria 98, cele patru culturi de proveniențe internaționale de fag instalate în România au fost identificate, iar materializarea în teren a limitelor culturilor, repetițiilor și proveniențelor a fost realizată folosind vopsea de culoare galbenă. Concomitent, a fost executat un elagaj artificial pentru accesibilizare în cultura Săcele, iar în toate culturile au fost instalați senzori de înregistrare a temperaturii și umidității relative a aerului (Hobo Prov2 Temp/RH). Acești senzori au fost instalați în arbori, la înălțimea de 2,5 – 3 m de la sol, pe expoziție nordică, iar datele au fost înregistrate la o periodicitate cuprinsă între 30 de minute și o oră, în decurs de trei ani.

Metodologia de lucru a vizat alegerea schematică a cinci arbori per proveniență, respectiv per repetiție, respectându-se o schemă prestabilită (alegerea arborilor pe diagonală). În cazul în care arborele indicat de schemă a lipsit, a fost selectat un altul aflat în apropiere. Prin urmare, a fost selectat un număr total de 15 arbori din fiecare proveniență per cultură.

Măsurătorile au fost efectuate conform manualului *Treebredex* (Ducci et al. 2012) și au vizat determinarea următoarelor caracteristici fenotipice:

- Diametrul de bază (*Db*);

Acest caracter a fost măsurat utilizând clupa forestieră. Pentru fiecare arbore selectat au fost efectuate două măsurători pe direcții diferite (perpendiculare), la înălțimea de 1,3 m, iar valoarea finală a fost obținută prin calcularea valorii medii a celor două valori.

- Înălțimea totală (*Ht*);

Ht a fost măsurată utilizând Hipsometrul cu ultrasunete Haglof Vertex IV, la nivelul fiecărui arbore selectat.

- Înfrucirea (*Fk*);

Înfrucirea a fost apreciată conform protocolului *Treebredex*, care propune utilizarea unei scări cu 7 clase.

- Diametrul ramurilor (D_r):

Pentru acest caracter, a fost măsurat diametrul ramurii medii situate la înălțimea de 2,2 m pe trunchi, utilizând un șubler electronic.

- Calitatea tulpinii (C_t):

A fost apreciată pe baza protocolului *Treebredex*, adaptat cu specific la rectitudinea tulpinii arborilor.


- Supraviețuirea (S_r).







Pentru determinarea acestei caracteristici s-au numărat toți arborii rămași de la nivelul fiecărei proveniențe, respectiv repetiții, iar valoarea S_r a fost obținută prin efectuarea raportului dintre numărul actual de arbori și numărul de arbori instalați inițial, raport ce a fost multiplicat cu 100 pentru obținerea procentelor.






Suplimentar măsurărilor efectuate la nivelul caracteristicilor biometrice ale arborilor, în cultura Săcele s-au realizat observații asupra proceselor fenologice de înfrunzire și senescentă. Aceste observații au fost efectuate pentru o perioadă de trei ani (2022-2024), cu o periodicitate de aproximativ șapte zile calendaristice. Pentru aceste observații a fost ales un număr de trei arbori predominanți din fiecare proveniență (cu excepția provenienței 95-Ge-92 din repetiția a doua, pentru care au fost aleși ultimii doi arbori care au supraviețuit), cu coroane bine dezvoltate. Acești arbori au fost selectați în repetiția unu a culturii Săcele (cea mai omogenă), în primăvara anului 2022, iar în anul următor (2023) observațiile au fost extinse și la repetiția doi. Prin urmare, aceste observații au fost efectuate pentru un număr total de 262 de arbori. Pentru realizarea acestora s-a utilizat un binoclu, pentru a crește vizibilitatea, iar observațiile au vizat partea superioară a coroanei și au fost efectuate din aceeași poziție (partea din amonte a arborelui).

Pentru derularea acestor observații s-au utilizat scările fenologice folosite în culturile internaționale de fag instalate în Europa (Robson & Garzón 2018; Robson et al. 2013), scări stabilite de Du Cros et al. (1988), având șapte clase pentru înfrunzire și cinci pentru senescentă (Tabelul 3.4).

Tabelul 3.4. Scările fenologice utilizate pentru aprecierea stadiilor de înfrunzire și senescentă (Robson & Garzón 2018) (foto: Beșliu E.V.).

| Înfrunzire | | |
|------------|-----------------|---|
| Clasa | Stadiul | Descrierea vizuală |
| 1 | Muguri dorminzi |  |

| | | |
|-------------------|----------------------------|--|
| 2 | Muguri umflați și alungiți |  |
| 3 | Muguri deschiși |  |
| 4 | Frunze deschise parțial |  |
| 5 | Frunze deschise total |  |
| 6 | Frunze ondulate |  |
| 7 | Frunze mature |  |
| Senescentă | | |

| Clasa | Stadiul | Descrierea vizuală |
|-------|------------------|--|
| 1 | Frunze verzi |  |
| 2 | Îngălbenire 5% |  |
| 3 | Îngălbenire 50% |  |
| 4 | Îngălbenire 100% |  |
| 5 | Port de iarnă |  |

Pentru analizele anatomice ale lemnului, a fost aleasă cultura Fântânele, datorită localizării acesteia la limita arealului natural de distribuție al speciei *F. sylvatica*, unde aspectele referitoare la reacția speciei la fenomenele de secetă pot fi mai concret identificate și studiate. Pentru acest studiu, s-au luat în considerare performanțele proveniențelor testate (Figura 4.12), fiind alese proveniențele situate la extreme în privința performanțelor de creștere, dar și proveniența autohtonă testată în această cultură.

Provenința 98-Fr-04 a fost selectată datorită slabei performanțe obținute, iar provenința 98-Au-36 pentru cea mai ridicată performanță. Provenința românească, 98-Ro-72, a manifestat o performanță situată în jurul mediei.

Extragerea probelor de creștere a fost efectuată la începutul anului 2025 (în primele zile din luna ianuarie) și s-a realizat mecanizat, folosind burghiul *Pressler* acționat de o mașină de înfiletat electrică, respectând metodologia propusă de Schweingruber et al. (1990). Pentru cele 3 proveniențe selectate, au fost extrase minim 3 probe (câte o carotă pe fiecare arbore) din fiecare repetiție, numărul acestora fiind condiționat de numărul mic de arbori care au supraviețuit în cazul provenienței 98-Fr-04.

Pentru analizele anatomice au fost selectate câte trei probe de creștere per repetiție, însumând un număr total de nouă probe pentru fiecare dintre cele trei proveniențe. Metodologia de lucru pentru analizarea acestor probe a presupus parcurgerea mai multor etape, după cum urmează (Figura 3.2):

1. Îndreptarea și secționarea probelor

În primă fază, probele de lemn selectate pentru includerea în analiză au fost îndreptate cu un core-microton (Gärtner & Nievergelt 2010). Ulterior, acestea au fost secționate în două segmente cu lungimea de până la 5 cm, cu ajutorul unui bisturiu, urmărindu-se ca secțiunea să fie efectuată la nivelul unui inel vizibil, iar tăietura să fie oblică. În acest fel s-a asigurat refacerea corectă a probei pentru analiză.

2. Efectuarea microsecțiunilor

Microsecțiunile transversale au fost tăiate folosind un microtom de tipul Thermo HM 340E Electronic Rotary Microtome. Grosimea microsecțiunilor a fost de 10 μm .

3. Curățarea microsecțiunilor și pregătirea lamelelor

După tăiere, microsecțiunile au fost clătite succesiv cu apă distilată și clor, iar apoi au fost colorate utilizând o soluție pe bază de safranină și astrablue. Următorul pas a fost spălarea cu etanol în concentrații cuprinse între 75% și 100%. În final, microsecțiunile au fost lipite pe lamele și presate pentru 24 de ore cu ajutorul unor magneți (Gärtner & Schweingruber 2013).

4. Scanarea probelor

Scanarea lamelelor a fost efectuată utilizându-se un scanner de ultimă generație Digital Slide Scanner ZEISS AxioScan 7, care a permis obținerea unor imagini cu o rezoluție de 2,9 pixeli/micrometru.

5. Analiza imaginilor

Imaginile obținute au fost editate cu programul ZEISS ZEN 3.11 și ulterior analizate cu ROXAS v3.0.250 (Prendin et al. 2017; von Arx & Carrer 2014).

6. Măsurarea lățimii inelului

Lățimea inelului a fost măsurată cu softul Corecorder (Maxwell & Larsson 2021), iar interdatarea a fost efectuată cu softul COFECHA (Holmes 1983).

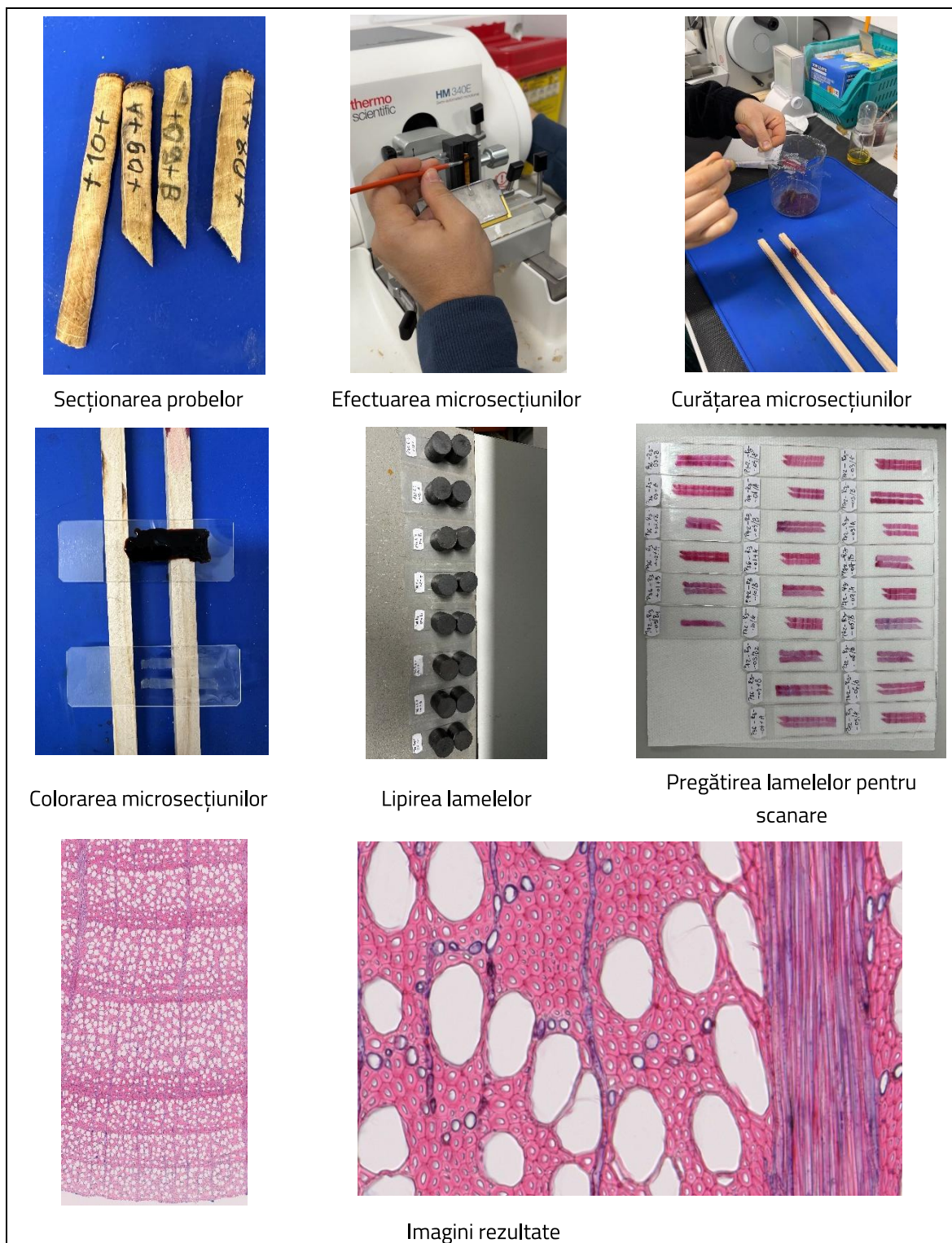


Figura 3.2. Metodologia de lucru aplicată în analiza anatomică a lemnului (foto: Beșliu E.V.).

3.4. Analiza statistică a datelor

Data fiind complexitatea analizelor efectuate, care au necesitat abordări statistice diferențiate în funcție de natura datelor utilizate și scopul cercetărilor, acestea au fost separate în mai multe subcapitole, fiind descrise pentru fiecare tip de analiză utilizată. Toate analizele statistice au fost realizate utilizând programul *R statistics* (R 2024), în care au fost utilizate diferite pachete de lucru ce vor fi evidențiate în cele ce urmează. Manipularea datelor referitoare la locațiile proveniențelor și culturilor, respectiv întocmirea hărților utilizate în această lucrare, au fost realizate utilizând programul *Qgis* (Team 2024).

3.4.1. Analiza datelor la nivelul supraviețuirii și caracteristicilor biometrice

Datorită diferențierii celor două serii de culturi în privința proveniențelor testate, aceste analize au fost efectuate separat pentru fiecare serie, iar reprezentarea grafică a rezultatelor a urmat aceeași abordare distinctă. Testarea liniarității datelor a fost realizată utilizând testul *Shapiro Wilk* (Shapiro & Wilk 1965), iar acuratețea modelului utilizat a fost testată pe baza graficelor valorilor reziduale.

Pentru studiul variabilității la nivelul *Sr* și al caracteristicilor: *Ht*, *Db* și *Dr*, a fost aplicat un model statistic linear, rulat cu ajutor pachetului de lucru *metan* (Olivoto & Lúcio 2020):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \tau_j + (\alpha\tau)_{ij} + Y_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (1),$$

unde: Y_{ijk} = variabila de răspuns (dependentă) (i = proveniența, j = cultura, k = repetiția); μ = media generală; α_i = efectul provenienței; τ_j = efectul culturii; $(\alpha\tau)_{ij}$ = efectul interacțiunii dintre proveniența (i) și cultură (j) Y_{jk} = efectul repetiției la nivelul culturii; ε_{ijk} = eroarea aleatorie.

Reprezentările grafice au fost realizate cu ajutorul pachetului *ggplot2* (Wickham 2011) și *metan* (Olivoto & Lúcio 2020), iar pe graficele realizate a fost reprezentat rezultatul testului statistic T , pentru a evidenția semnificația diferențelor dintre cele două locuri de testare din fiecare serie de culturi, precum și valorile erorii standard.

În cazul caracteristicilor *Fk* și *Ct*, dată fiind natura datelor (variabile categoriale) variabilitatea a fost testată utilizând testul χ^2 (*Chi-pătrat*), iar vizualizarea grafică a fost efectuată prin grafice de tip mozaic realizate cu ajutorul pachetului *vdv* (Meyer et al. 2024).

Performanțele proveniențelor au fost studiate la nivel de cultură, utilizându-se o reprezentare grafică sub formă de cadrane, realizate cu pachetul *ggplot2* (Wickham 2011), în care mediile *Sr* și ale *Ht* au fost considerate criterii de selecție și apreciate ca fiind reprezentative pentru performanțele de creștere și adaptare (Engel et al. 2023; Matisons et al. 2018).

3.4.2. Analiza plasticității fenotipice

Abilitatea arborilor de a se adapta la diferite condiții staționale a fost cuantificată pe baza indicelui de plasticitate fenotipică (*Relative Distances Plasticity Index – RDPI*) descris de Valladares et al. (2006). Acest indice presupune calcularea valorii absolute a diferențelor dintre caracteristicile fenotipice ale unei proveniențe care este testată în condiții de mediu diferite. Indicele ia valori între zero (lipsa plasticității) și unu (valoarea maximă a plasticității fenotipice), iar calculul a fost efectuat cu pachetul de lucru *Plasticity* (Ameztegui 2017). Analiza plasticității fenotipice (*Pf*) a fost efectuată separat pe cele două serii de culturi, analizându-se doar proveniențele comune, iar în reprezentarea grafică a fost utilizată analiza varianței (*ANOVA*) pentru generarea nivelului de diferențiere general, respectiv testul *Tukey* pentru evidențierea diferențelor dintre proveniențe, prin includerea acestora în grupuri omogene. În calculul *Pf* au fost incluse caracteristicile *Sr*, *Ht* și *Db*.

3.4.3. Analiza reacției proveniențelor la transfer

Analiza reacției proveniențelor la transferul către alte condiții de mediu a fost efectuată utilizând metoda *Distanțelor ecologice de transfer* (Mátyás et al. 2009a; Mátyás & Yeatman 1992). Această metodă se bazează pe prezumția potrivit căreia răspunsul fenotipic al proveniențelor este influențat nu doar de mediu de testare, ci și de distanța transferului. Prin urmare, metoda permite o vizualizare a adaptării macroclimatice a proveniențelor, comparând condițiile climatice dintre locul de testare și locul de origine al acestora. Calculul favorabilității climatice a fost efectuat pe baza indicelui *Ellenberg quotient (EQ)* (Ellenberg 1988), iar diferența dintre valoarea *EQ* a locului de testare și valoarea *EQ* a locului de origine reprezintă valoarea distanței de transfer (ΔEQ). Datele climatice utilizate au fost cele prezentate anterior, extrase din portalul *B4est* (B4EST 2024) pentru perioada 1995/1998-2022. Pentru vizualizarea influenței distanțelor de transfer asupra caracteristicilor fenotipice a fost necesară eliminarea efectului locului de testare, realizată prin corectarea valorilor caracteristicilor analizate cu valoarea diferenței dintre media pe cultură și media generală, care include ambele locuri de testare (Mátyás et al. 2009a). În final, a fost întocmit graficul ecuației de regresie dintre valorile distanțelor de transfer și caracteristicile fenotipice, utilizând o funcție polinomială, testată cu ajutorul unui model liniar simplu. În această analiză au fost incluse ca variabile dependente *Sr*, *Ht* și *Db*, iar ca variabilă independentă (explicativă) a fost utilizată ΔEQ . Funcția transferului a fost aplicată în cazul proveniențelor comune din cele două serii de culturi, iar reprezentarea grafică a fost efectuată cu pachetul *ggplot2* (Wickham 2011).

3.4.4. Analiza modelării Funcției Universale de Răspuns

În modelarea răspunsului adaptativ al proveniențelor a fost selectat modelul *Funcției universale de răspuns (Universal Response Function - URF)* (Wang et al. 2010). Acest model de predicție utilizează caracteristicile fenotipice ca o funcție simultană de răspuns la influența condițiilor climatice ale mediului

naturale a speciei (Doniță et al. 2008), iar graficele finale au fost adaptate utilizând pachetul de lucru *ggplot2* (Wickham 2011).

3.4.5. Analiza datelor fenologice

Pentru determinarea cât mai precisă a potențialului adaptativ al proveniențelor internaționale de fag, au fost analizate fenologia de primăvară (înfrunzirea) și senescenta, în scopul identificării sensibilității climatice a proveniențelor testate în cultura Săcele. Datele referitoare la temperatura aerului, utilizate în analizele efectuate, au fost înregistrate, pe parcursul celor trei ani, prin intermediul a doi senzorii HOBO, instalați în două repetiții ale acestei culturi. În final, pe baza temperaturilor înregistrate au fost calculate temperatura medie zilnică, precum și temperaturile minime și maxime ($^{\circ}\text{C}$). De asemenea, pentru cuantificarea necesarului termic, corespunzător intrării și ieșirii din vegetație a proveniențelor de fag, s-au calculat doi indici: zile grade de creștere (*GDD*) (*growing degree days*) și zile grade de senescentă (*SDD*) (*senescence degree days*). Acești indici au fost calculați la nivelul fiecărei zile, prin efectuarea diferenței dintre temperatura medie și temperatura de bază (Ciocîrlan et al. 2024; McMaster & Wilhelm 1997). În final, pentru identificarea necesarului termic s-a realizat cumulul acestor indici pentru atingerea fiecărei clase de înfrunzire și senescentă. Pentru temperatura de bază s-au utilizat pragurile termice de 5°C pentru *GDD*, respectiv 15°C pentru *SDD*.

Intrarea în vegetație a proveniențelor a fost asimilată cu momentul atingerii stadiului muguri deschiși, iar ieșirea din vegetație s-a considerat a fi marcată de momentul atingerii stadiului îngălbenire 50% (Ciocîrlan et al. 2024; Schieber et al. 2013). Durata sezonului de vegetație a fost calculată ca diferența în zile între intrarea și ieșirea din vegetație (Ciocîrlan et al. 2024; Drobyshev et al. 2010).

La nivelul datelor provenite din observațiile efectuate asupra proceselor de fenologie, testul *Kolmogorov-Smirnov* (Conover 1999) a fost utilizat pentru testarea distribuției acestora. Acesta a fost selectat datorită dimensiunii mari a setului de date, care nu a permis utilizarea testului *Shapiro Wilk* (Shapiro & Wilk 1965).

Datorită faptului că distribuția datelor nu a fost normală, analiza diferențelor dintre proveniențe, ani și repetiții a fost realizată utilizând testul neparametric *Kruskal-Wallis* (Kruskal & Wallis 1952), unde variabila dependentă a fost *DOY* (engl. day of the year = ziua anului). Complementar, testul *Dunn* (Dunn 1964) a fost aplicat pentru cuantificarea diferențelor la nivelul tuturor variabilelor analizate.

Pentru identificarea variației *DOY* în funcție de temperatură, a fost aplicat un model mixt generalizat (GLMM), utilizând distribuția Gamma, care presupune transformarea logaritmică a variabilei dependente. Distribuția Gamma este recomandată pentru acest tip de date calendaristice, cât și pentru cele neparametrice. Influența temperaturii a fost surprinsă prin aplicarea unei funcții spline la nivelul fiecărui an (cu trei grade de libertate), fiind astfel posibilă surprinderea efectului nelinier al temperaturii asupra fenologiei, dar și a variațiilor anuale ale acesteia. Modelul a fost generat prin intermediul pachetului de lucru *glmmTMB* (Brooks et al. 2017):

$$\log(\mu_{ij}) = \beta_0 + f(T_{ij}) + u_{0j} + u_{1j}T_{ij} \quad (2),$$

unde: μ_{ij} = valoarea așteptată a *DOY*; β_0 = valoarea de bază a *DOY* estimată de model, independent de efectele temperaturii și ale variațiilor între ani; $f(T_{ij})$ = funcția spline a temperaturii; u_{0j} și u_{1j} = intercept și pantă aleatoare pentru fiecare an (j).

Un model similar a fost utilizat pentru analiza cerințelor termice ale proveniențelor pentru momentul intrării (muguri deschiși) și ieșirii din vegetație (îngălbenire 50%). De această dată, variabila dependentă a fost *GDD*, respectiv *SDD* (cumulat), iar proveniența a fost setată ca efect fix și anul ca efect aleator. Același model a fost utilizat și pentru analiza duratei sezonului de vegetație. Pentru vizualizarea optimă a diferențelor dintre proveniențe, valorile generate de model au fost adaptate prin intermediul metodei *Holm*, pentru generarea grupurilor omogene, utilizând pachetul de lucru *emmeans* (Lenth 2023).

În altă ordine de idei, pentru reprezentarea grafică a necesarului termic pe clase, a fost utilizat un grafic de tip progresie în trepte, generat pe baza *GDD* și *SDD*. Toate reprezentările grafice, referitoare la analizele asupra înfrunzirii și senescentei au fost realizate cu ajutorul pachetelor de lucru *ggplot2* (Wickham 2011) și *metan* (Olivoto & Lúcio 2020).

3.4.6. Analiza datelor anatomice ale lemnului

Analiza diferențelor privind creșterea și aria lumenului s-a realizat prin aplicarea unui model liniar generat cu ajutorul pachetului *ImerTest* (Kuznetsova et al. 2017):

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + u_j + v_k + w_{kl} + \epsilon_{ijkl} \quad (3)$$

unde: Y_{ijk} = variabila de răspuns (dependentă) (i = proveniența, j = anul, k = repetiția, l = arborele); μ = media generală; α_i = efectul provenienței; u_j = efectul anului; v_k = efectul repetiției; w_{kl} = efectul arborelui; ϵ_{ijkl} = eroarea reziduală.

Corelațiile dintre parametrii anatomici și climat au fost efectuate utilizând pachetul de lucru *dendroTools* (Jevšenak 2020), iar datele climatice utilizate în aceste analize au fost extrase din bazele de date CRU (Harris et al. 2020) și TerraClimate (Abatzoglou et al. 2018).

Analiza datelor cronologice a fost realizată cu ajutorul pachetului de lucru *dp/R* (Bunn 2008), iar generarea modelului *GAM* (*General additive model*) pentru testarea interacțiunii dintre media ariei vaselor și climat, la nivelul sectoarelor, a fost realizată cu ajutorul pachetului *mgcv* (Wood 2017):

$$Y_m = \mu + \alpha\{i(m)\} + \gamma\{g(m)\} + f\{i(m), g(m)\}(x_m) + b\{t(m)\} + \epsilon_m \quad (4)$$

unde: Y_m = variabila corespunzătoare mediei ariei vaselor; μ = media generală; α_i = efectul provenienței; γ_g = efectul grupului climatic; x_m = poziția relativă la nivelul inelului; $f\{i, g\}(x)$ = funcția smooth specifică interacțiunii proveniență:grup climatic; b_t = efectul arborelui; ϵ_m = eroarea reziduală.

Diferențele la nivelul proveniențelor, afișate pe graficele modelului, au fost calculate utilizând testul *Kolmogorov-Smirnov* (Conover 1999).

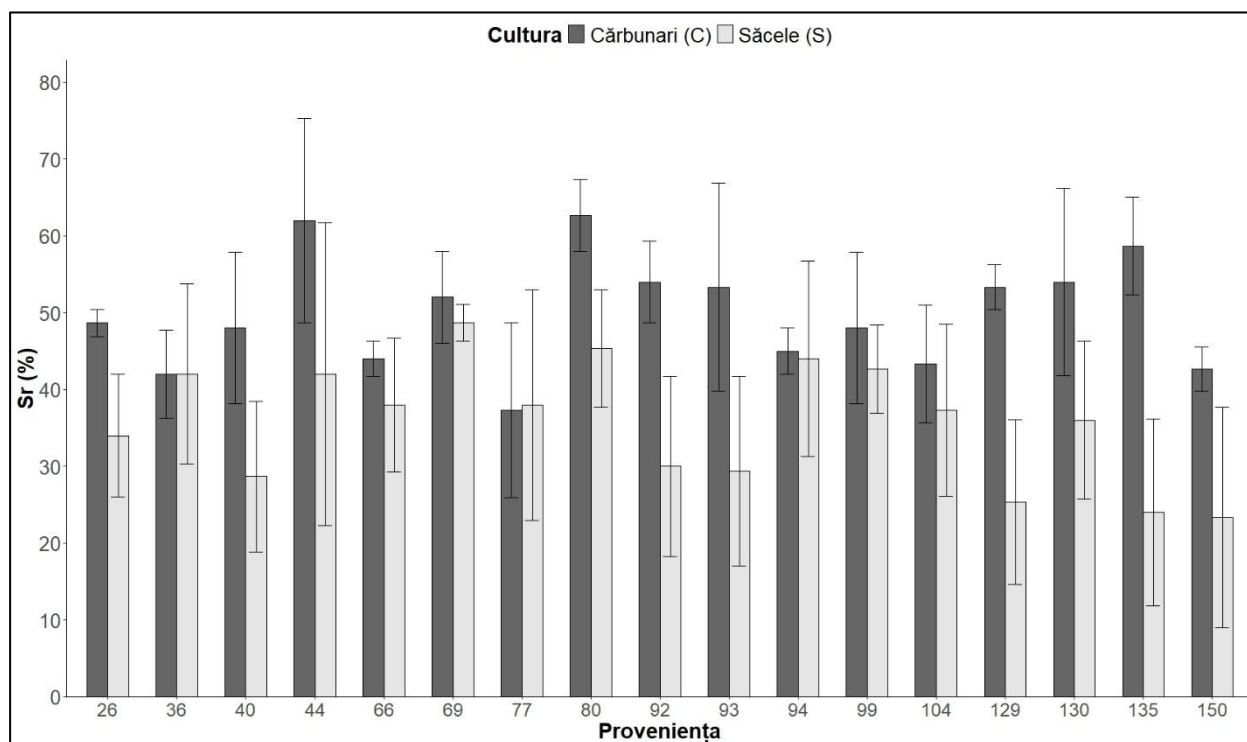
CAPITOLUL 4: REZULTATE ȘI DISCUȚII

4.1. Supraviețuirea și caracteristicile biometrice

4.1.1. Supraviețuirea

Evaluarea variabilității supraviețuirii (Sr) la nivelul seriei 95 a evidențiat existența unor diferențe semnificative în privința repetițiilor și a culturilor, însă diferențierea proveniențelor în cadrul culturilor, respectiv interacțiunea proveniență x localitate (cultură, loc de testare) nu au fost semnificative. Sr a înregistrat o valoare medie de 50% în cultura Cărbunari, superioară semnificativ ($p < 0,001^{***}$) față de valoarea obținută în cultura Săcele (35,8%). În cazul seriei 98, diferențele au fost semnificative la toate nivelurile, sugerând astfel implicarea tuturor factorilor analizați în performanțele legate de Sr . În cultura Aleșd, media Sr a fost cu 7,8% mai mare decât în cultura Fântânele, această diferență fiind semnificativă din punct de vedere statistic ($p < 0,001^{***}$).

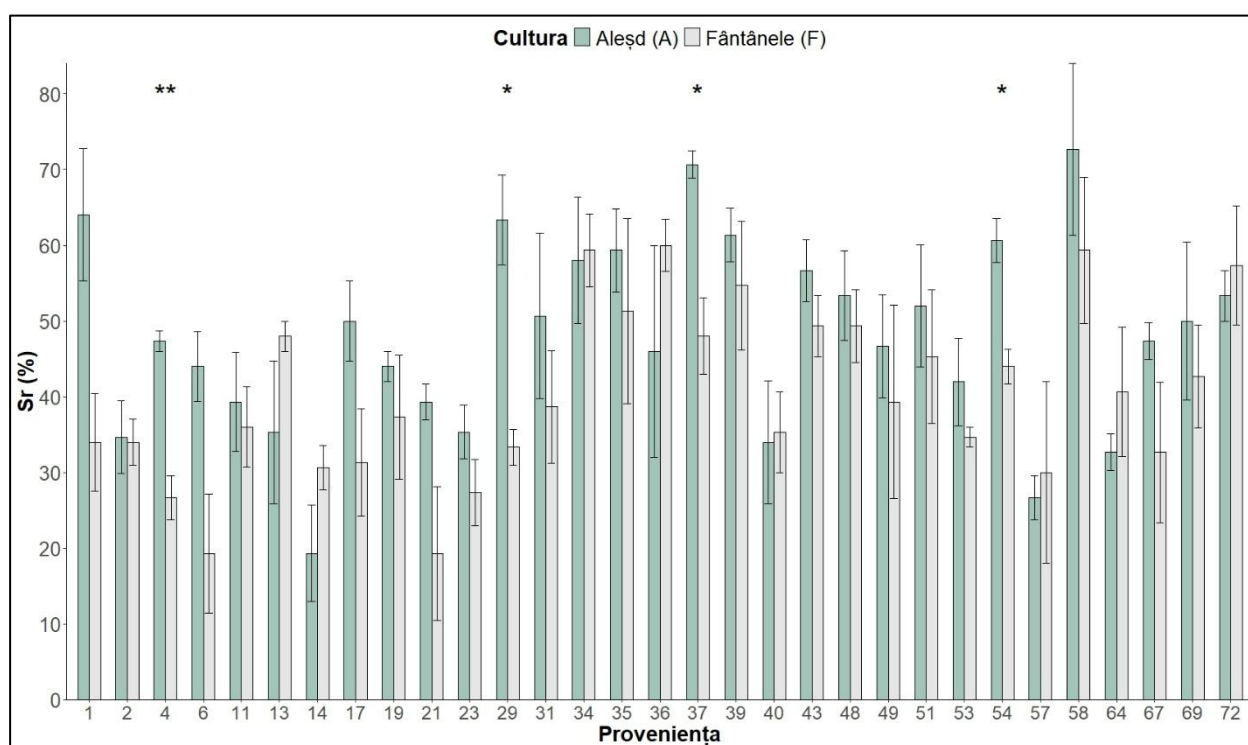
În cazul seriei 95 (Figura 4.1), cele mai mari valori pentru Sr au fost obținute în cultura Cărbunari, acolo unde 15 din cele 17 proveniențe comune au obținut valori superioare comparativ cu testul Săcele. Proveniențele 95-Ge-80, 95-Ge-44 și 95-Sk-135 au obținut cele mai ridicate valori ale Sr , iar cele mai scăzute performanțe au fost înregistrate de proveniențele 95-Ro-150, 95-Sk-135 și 95-Sk-129, în cultura Săcele. Reacții similare, în cele două locuri de testare, au fost observate la proveniențele 95-Ge-36, 95-Ge-77 și 95-Ge-94, însă variații ridicate, cuprinse între 18% și 35%, au fost înregistrate de proveniențele 95-Ge-92, 95-Ge-93, 95-Sk-129, 95-Sk-130 și 95-Sk-135. Proveniența autohtonă 95-Ro-150 a obținut valori ale Sr sub media celor două experimente.



Linii negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard.

Figura 4.1. Analiza supraviețuirii în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024c).

Evaluarea Sr la nivelul seriei 98 (Figura 4.2) a evidențiat superioritatea culturii Aleșd, unde cele mai ridicate valori au fost obținute de proveniențele 98-Bg-58 și 98-It-37 cu peste 70%, respectiv 98-Fr-01 cu 64%. La polul opus, cele mai slabe performanțe privind Sr (19%) au fost înregistrate de proveniența 98-Ol-14 în cultura Aleșd, respectiv de proveniențele 98-Fr-06 și 98-Dk-21 în cultura Fântânele. Variații mari ale Sr au fost identificate în cazul proveniențelor 98-Fr-04, 98-Ge-29, 98-It-37 și 98-Sl-54. Acestea au obținut valori semnificativ mai ridicate ($p < 0,05^*$) în mediul de testare Aleșd. Cu toate că majoritatea proveniențelor au înregistrat valori mai mari în cultura Aleșd, proveniențele 98-Be-13, 98-Ol-14 și 98-Au-36 au obținut valori mai ridicate în condițiile mai restrictive de vegetație din cultura Fântânele, dar ne semnificative statistic. Proveniențele 98-Fr-02, 98-El-34 și 98-Pl-40 au obținut valori foarte apropiate pentru Sr în ambele locuri de testare, evidențiind astfel reacția constantă și stabilitatea acestora la interacțiunea cu locuri de testare diferite din punct de vedere stațional. Reacția provenienței autohtone, 98-Ro-72, s-a dovedit a fi similară în cele două experimente, unde a obținut valori peste 50%, ceea ce denotă o performanță bună la nivelul Sr .



Liniile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard; *- reprezintă semnificația testului t (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$; **** pentru $p < 0,0001$).

Figura 4.2. Analiza supraviețuirii în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024b).

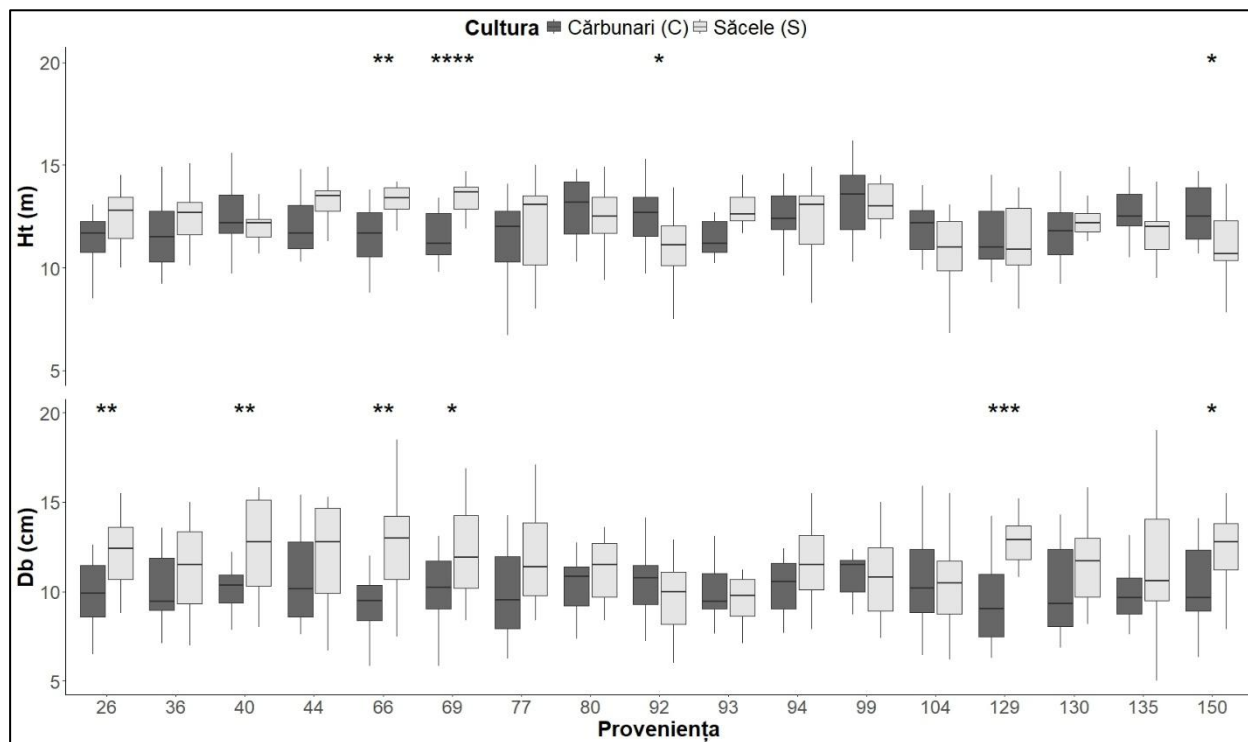
4.1.2. Înălțimea și diametrul de bază

În seria 95, variabilitatea Ht a fost ridicată atât la nivelul celor două culturi, cât și în cazul interacțiunii proveniență x localitate, dar ne semnificativă pentru diferența dintre cele două locuri de testare. Prin urmare, acest caracter este influențat în mod evident de factorii de natură genetică ai proveniențelor, dar și de repetiție. În privința Db s-a observat lipsa variației semnificative între proveniențe, la nivelul culturilor, iar interacțiunea proveniență x localitate a fost aproape de pragul de semnificație. Factorii ce au influențat semnificativ acest caracter au fost repetiția și cultura. În seria 98, variabilitatea a fost

ridicată în cazul *Ht* aproape la toate nivelurile, excepție făcând repetiția în cultura Fântânele. Astfel, valorile *Ht* din cultura Aleșd au fost în medie mai ridicate cu 1 m față de cultura Fântânele. În contrast, influență semnificativă asupra *Db* a avut doar locul de testare (factorul cultura), în timp ce, în interiorul experimentelor, s-a obținut o omogenitate ridicată, nici factorul genetic (proveniența) și nici cel de mediu (repetiția) neavând o influență statistic semnificativă.

Deși diferențele dintre cele două culturi din seria 95 sunt ne semnificative pentru *Ht*, anumite proveniențe au manifestat o reacție contrastantă între cele două locuri de testare, fapt susținut și de semnificația interacțiunii proveniență x localitate ($p < 0,001^{***}$). Prin urmare, se observă că proveniențele 95-Ge-66 și 95-Ge-69 au înregistrat performanțe semnificativ mai ridicate în cultura Săcele, pe când proveniența 95-Ge-92 și proveniența autohtonă 95-Ro-150 au avut performanțe semnificativ mai bune în cultura Cărbunari. De asemenea, cele mai mari valori medii ale *Ht* au fost obținute de proveniențele 95-Ge-66 și 95-Ge-69 în cultura Săcele, respectiv de proveniența 95-Ge-99 în cultura Cărbunari. În cultura Săcele au fost observate cele mai scăzute medii ale *Ht* la proveniențele 95-Ge-92, 95-Ge-104 și 95-Sk-135 (Figura 4.3).

În privința *Db* au fost înregistrate valori medii semnificativ mai mari în cultura Săcele ($p < 0,001^{***}$), iar valorile cele mai ridicate au fost obținute de proveniențele 95-Ge-40, 95-Ge-44 și 95-Ge-66. Cele mai scăzute valori medii au fost remarcate în cultura Cărbunari la proveniențele 95-Dk-26, 95-Ge-66 și 95-Sk-129. Media *Db* pentru proveniența autohtonă 95-Ro-150 a fost semnificativ mai ridicată în cultura Săcele (Figura 4.3).

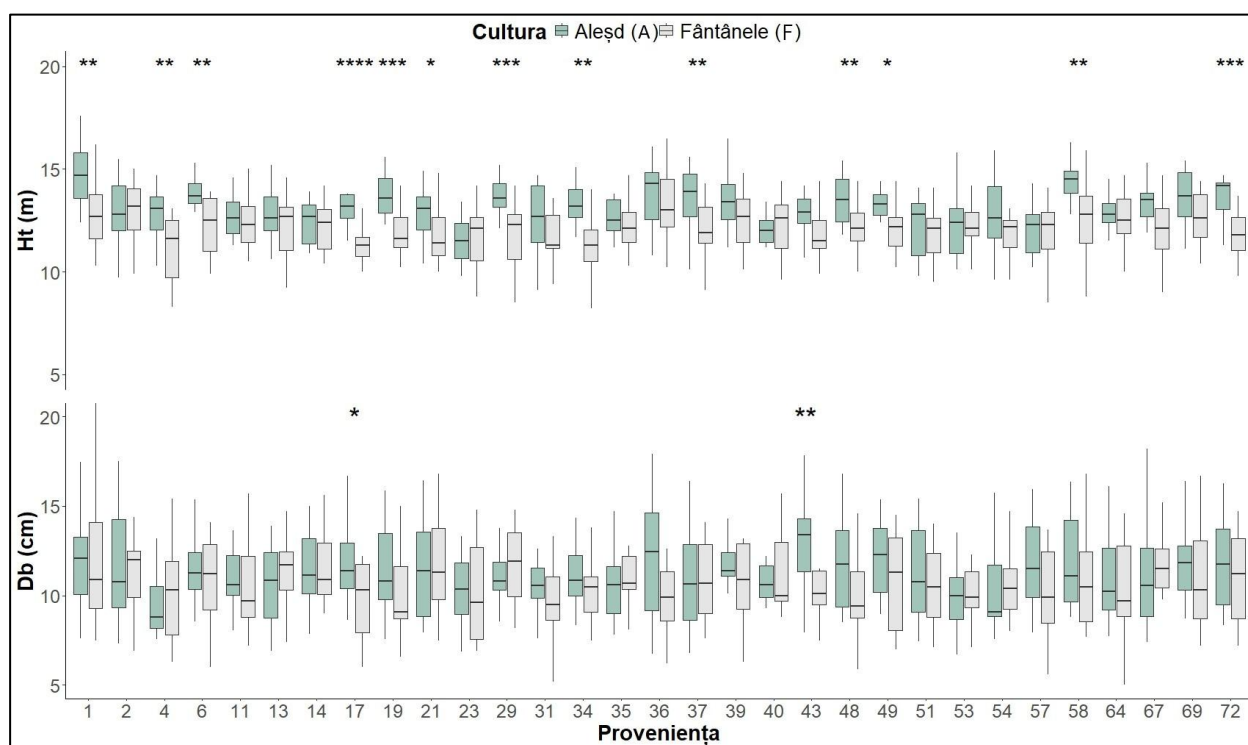


În diagrama boxplot sunt reprezentate: valoarea minimă, quartila 1, mediana, quartila 3 și valoarea maximă; *- reprezintă semnificația testului t (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$; **** pentru $p < 0,0001$).

Figura 4.3. Analiza înălțimii și a diametrului de bază în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024c).

Un grad ridicat de variabilitate a fost observat în cadrul seriei 98 pentru *Ht*. Reprezentarea grafică a rezultatelor (Figura 4.4) indică nivelurile de diferențiere între proveniențe și între cele două culturi. Pentru 13 proveniențe, diferențele au fost semnificative statistic ($p < 0,05^*$ la $p < 0,0001^{****}$), indicând o influență evidentă a mediului de testare asupra performanțelor *Ht*. Cele mai mari valori medii ale *Ht* au fost înregistrate în cultura Aleșd de către proveniențele 98-Fr-01, 98-Au-36 și 98-Bg-58. Contrar, cele mai scăzute valori au fost înregistrate de proveniențele 98-Fr-04, 98-Mb-17 și 98-EI-34 în condițiile de staționale, limitative pentru fag, din cultura Fântânele. Totuși, proveniențele 98-Se-23 și 98-PI-40 au obținut valori medii ale *Ht* puțin mai ridicate în cultura Fântânele, însă ne semnificative statistic. De remarcat este comportamentul provenienței 98-Au-36, care a înregistrat performanțe similare și printre cele mai ridicate în ambele locuri de testare. Proveniența autohtonă, 98-Ro-72, a fost influențată semnificativ de condițiile de mediu contrastante, obținând valori evident mai mici pentru *Ht* în condițiile limitative din cultura Fântânele.

În ceea ce privește *Db*, diferențe semnificative între cele două culturi au fost observate doar la proveniențele 98-Mb-17 și 98-PI-43, care au obținut valori mai mari în cultura Aleșd. Performanțele cele mai însemnate au fost obținute de proveniențele 98-Au-36, 98-PI-43 și 98-PI-49 în cultura Aleșd, iar cele mai scăzute de proveniențele 98-PI-64 și 98-Ge-31 în cultura Fântânele. Reacția provenienței românești, 98-Ro-72, a fost similară în cele două culturi.



În diagrama boxplot sunt reprezentate: valoarea minimă, quartila 1, mediana, quartila 3 și valoarea maximă; '*'- reprezintă semnificația testului t (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$; **** pentru $p < 0,0001$).

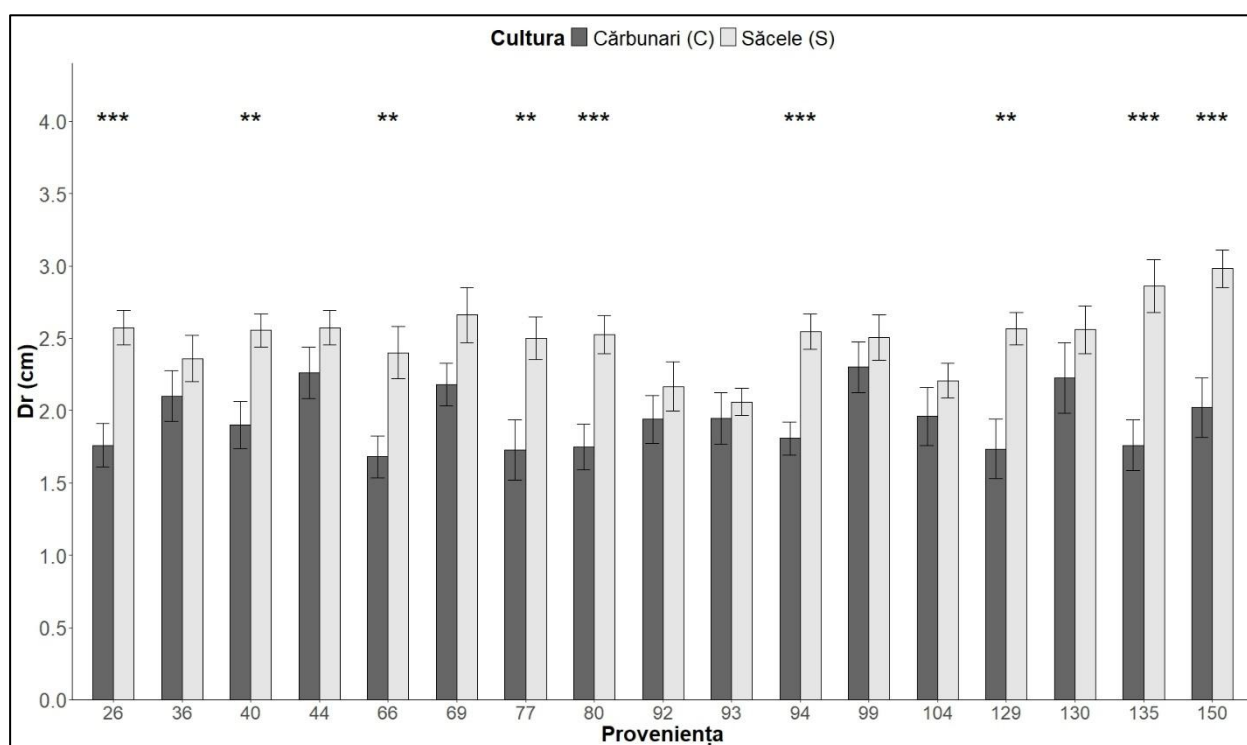
Figura 4.4. Analiza înălțimii și a diametrului de bază în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024b).

4.1.3. Diametrul ramurilor

La nivelul seriei 95, diferențele dintre proveniențe în cele două culturi, dar și interacțiunea dintre acestea au fost semnificative, indicând faptul că diametrul ramurilor (Dr) este influențat atât de factorii de mediu, cât și de bagajul genetic al proveniențelor. Media Dr a fost semnificativ mai mare ($p < 0,001^{***}$) în cultura Săcele, cu 0,6 cm. La nivelul culturii Cărbunari, proveniența nu a avut o influență semnificativă, iar în cazul culturii Săcele repetiția a fost factorul fără semnificație în variația Dr .

Referitor la variația Dr în testele din seria 98, s-a constatat existența unei variații largi la toate nivelurile. Singurul factor fără semnificație a fost repetiția în cultura Aleșd. Prin urmare, și în cazul acestei serii Dr s-a dovedit a fi atât controlat genetic, cât și influențat de condițiile de testare. Diferența dintre condițiile staționale ale celor două culturi a fost mai mică (0,2 cm), dar semnificativă statistic ($p < 0,001^{***}$).

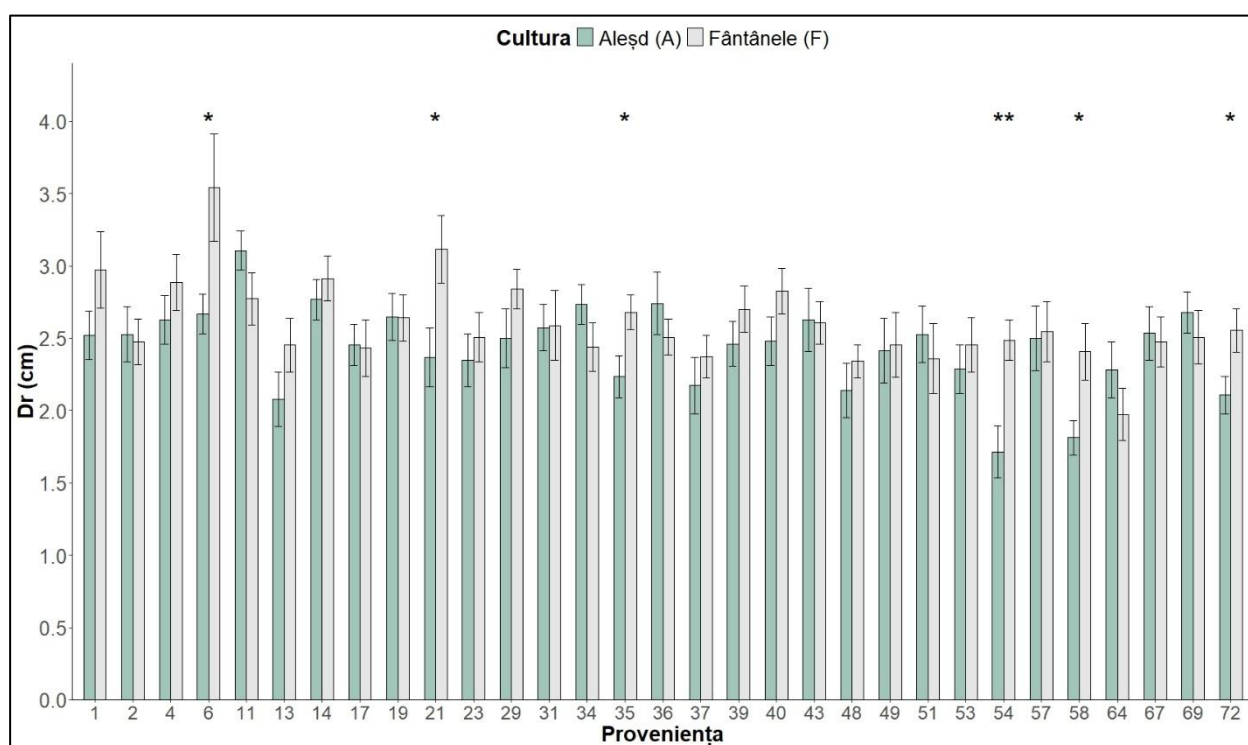
Evaluarea variabilității în seria 95 a scos în evidență reacția diferită a proveniențelor în cele două experimente. În figura 4.5 se remarcă faptul că toate proveniențele au înregistrat valori mai mari ale Dr în cultura Săcele, iar majoritatea diferențelor sunt asigurate statistic. În consecință, reacția proveniențelor atrage atenția asupra condițiilor staționale care au influențat evident performanțele proveniențelor la nivelul acestei caracteristici. Cele mai mari valori medii pentru Dr au fost obținute de proveniențele 95-Ro-150, 95-Sk-135 și 95-Ge-69 în cultura Săcele, în timp ce proveniențele 95-Ge-66, 95-Ge-66 și 95-Ge-77 au înregistrat cele mai mici medii în cultura Cărbunari. Performanță constantă în ambele locuri de testare au obținut proveniențele 95-Ge-92, 95-Ge-93 și 95-Ge-104.



Liniiile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard; *- reprezintă semnificația testului t (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$; **** pentru $p < 0,0001$).

Figura 4.5. Analiza diametrului ramurilor în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024a).

Privitor la seria 98, cele mai multe proveniențe au înregistrat valori mai ridicate în experimentul Fântânele, iar pentru șase dintre acestea, diferențele au fost semnificative ($p < 0,05^*$), exprimând totodată sensibilitatea acestora față de condițiile staționale (Figura 4.5). Prin urmare, aceste rezultate indică faptul că proveniențele reacționează la interacțiunea cu locuri de testare mai restrictive prin intensificarea creșterilor la nivelul Dr . Cele mai ridicate valori medii, care marchează cea mai slabă performanță, au fost obținute de proveniențele 98-Fr-06 și 98-Dk-21 în cultura Fântânele, respectiv 98-Lu-11, în cultura Aleșd. Contrar acestora, cele mai scăzute valori ale Dr , deci cele mai bune performanțe, s-au observat la proveniențele 98-Sl-54 și 98-Bg-58 în cultura Aleșd, respectiv 98-Pl-64 în cultura Fântânele. Unele dintre proveniențele cu o reacție foarte similară în ambele experimente au fost 98-Fr-2, 98-Mb-17, 98-Mb-19 și 98-Ge-31, ceea ce sugerează o influență mai mică a locului de testare asupra fenotipului acestora. Proveniența 98-Ro-72 (autohtonă) a înregistrat performanțe semnificativ mai bune în experimentul Aleșd, evidențiind în același timp și sensibilitatea acesteia la schimbarea condițiilor staționale.



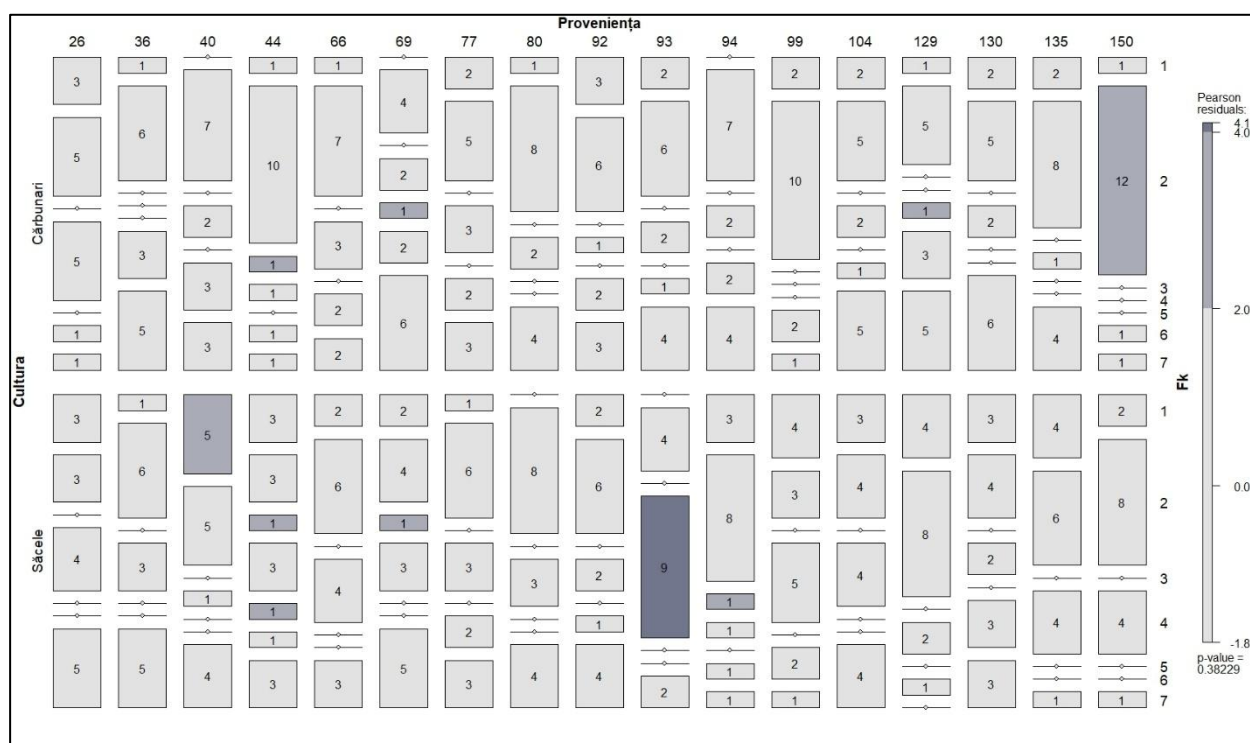
Liniile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard; *- reprezintă semnificația testului t (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$; **** pentru $p < 0,0001$).

Figura 4.6. Analiza diametrului ramurilor în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024a).

4.1.4. Înfurcirea

Evaluarea variabilității pentru înfurcirea (Fk) a scos în evidență existența unei tendințe similare în ambele serii de culturi. Astfel, se observă existența unor diferențieri semnificative între culturi ($p < 0,001^{***}$) și lipsa diferențierii între proveniențe, atât la nivelul seriilor, cât și la nivelul fiecărei culturi. Prin urmare, această caracteristică se dovedește a fi influențată în mod evident de condițiile de mediu și mai puțin de particularitățile genetice ale proveniențelor.

La nivelul seriei 95, valorile F_k au fost semnificativ diferite între cele două culturi, diferențe identificate în cazul clasei a patra de F_k . Astfel, în cultura Cărbunari s-a constatat existența unui număr semnificativ mai mic de arbori cu o înfurcire în treimea mijlocie a tulpinii (clasa 4). Tot în această cultură, s-a observat un număr mai mare de arbori fără înfurcire (clasa 7), iar în cultura Săcele un număr mai ridicat de arbori cu multiple înfurciri în prima parte a tulpinii (clasa 1), dar aceste diferențe nu au fost marcate ca fiind semnificative. La nivelul celor două culturi (Figura 4.7) nu au fost identificate variații semnificative statistic între proveniențe. Cu toate acestea, cele mai slabe performanțe privind F_k (clasa 1) au fost identificate în cultura Săcele la proveniențele 95-Ge-40, 95-Ge-99, 95-Sk-129 și 95-Sk-135. Contrar, cei mai mulți arbori fără înfurcire (clasa 7) au fost observați la proveniențele 95-Ge-69 și 95-Sk-130 în cultura Cărbunari. Pe lângă acestea, proveniența 95-Ge-69 a înregistrat un număr însemnat de arbori fără înfurciri în ambele culturi. În cazul provenienței autohtone, 95-Ro-150, s-a observat un număr mare de arbori înfurciți în prima parte a tulpinii (clasele 1 și 2), în ambele experimente. Un comportament asemănător în cele două culturi a fost observat și la proveniențele 95-Ge-36, 95-Ge-66 și 95-Ge-92.

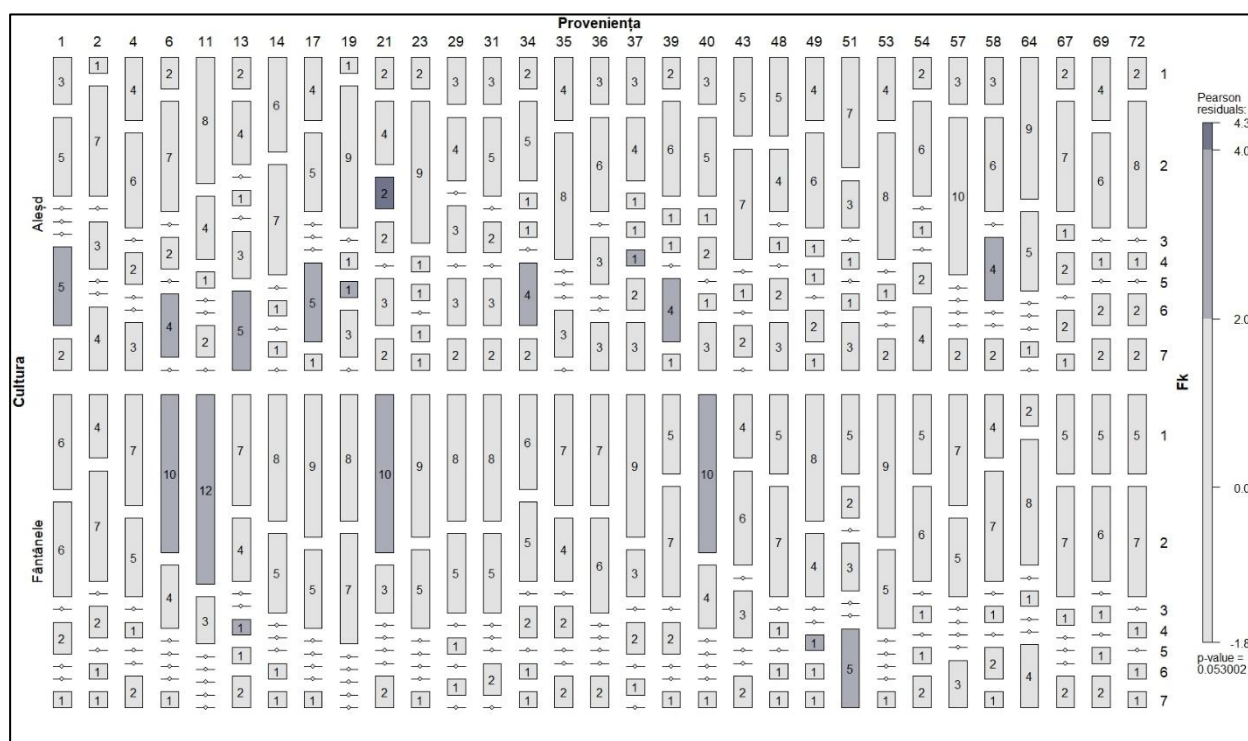


Culorile din grafic și intensitatea acestora reprezintă nivelul semnificației pentru măsura statistică Pearson residuals: gri = ne semnificativ, roșu = valori semnificativ mai mici, albastru = valori semnificativ mai mari; valorile reprezentate în interiorul chenarelor indică numărul observațiilor; liniile orizontale indică lipsa observațiilor.

Figura 4.7. Analiza înfurcirii în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024a).

În cazul seriei 98, o variație semnificativă pentru F_k a fost observată la nivelul claselor unu și șase. Prin urmare, în condițiile de mediu mai favorabile din experimentul Aleșd, numărul arborilor cu înfurciri multiple în prima parte a tulpinii (clasa 1) a fost mai scăzut, iar numărul arborilor cu o înfurcire în treimea superioară a tulpinii (clasa 6) a fost mai mare comparativ cu valorile obținute în cultura Fântânele. De asemenea, în condițiile mai grele de vegetație din cultura Fântânele, aproximativ jumătate (46%) dintre

arbori au prezentat înfurcări în partea inferioară a tulpinii (clasele 1 și 2), iar în cultura Aleșd s-a înregistrat un număr mai mare de arbori fără înfurcure (clasa 7). Acest trend al F_k a fost confirmat și în seria 95. Deși nu au fost identificate diferențe notabile între proveniențe, se poate observa numărul mare de arbori identificați în cultura Fântânele, care prezintă înfurcări multiple în treimea inferioară a tulpinii (clasa 1) (Figura 4.8). Astfel, proveniențele cu cea mai slabă performanță au fost 98-Fr-06, 98-Lu-11, 98-Dk-21 și 98-Pl-40. Pe de altă parte, cei mai mulți arbori fără înfurcure (clasa 7) au fost identificați în cultura Aleșd, la proveniențele 98-Fr-02, 98-Be-13 și 98-Sl-54. În general, o performanță mai bună a fost observată în cultura Aleșd, însă proveniențele 98-Ch-51 și 98-Ch-64 au înregistrat un număr mai mare de arbori fără înfurcure în cultura Fântânele. Proveniența 98-Lu-11 a avut o performanță slabă în ambele experimente, iar proveniența autohtonă a prezentat un număr mare de înfurcări în treimea inferioară (clasele 1 și 2) și un număr mic de arbori fără înfurcure (clasa 7), în ambele locuri de testare.



Culorile din grafic și intensitatea acestora reprezintă nivelul semnificației pentru măsura statistică Pearson residuals: gri = ne semnificativ, roșu = valori semnificativ mai mici, albastru = valori semnificativ mai mari; valorile reprezentate în interiorul chenarelor indică numărul observațiilor; liniile orizontale indică lipsa observațiilor.

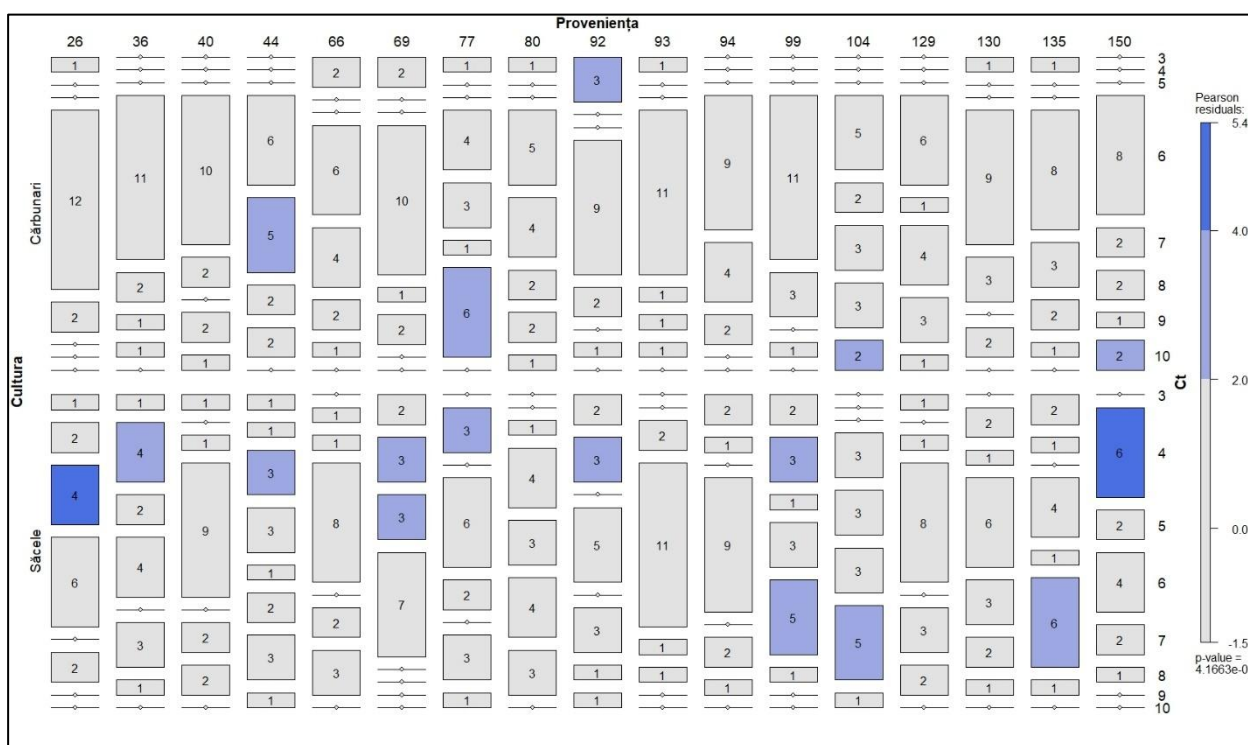
Figura 4.8. Analiza înfurcării în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024a).

4.1.5. Calitatea tulpinii

O variație semnificativă a calității tulpinii (C_t) s-a observat la nivelul seriei 95, atât între culturi, cât și între proveniențe ($p < 0.001^{***}$). Însă, la nivelul culturilor, diferențele între proveniențe au fost semnificative doar în cazul culturii Săcele ($p < 0,05^*$). Prin urmare, se constată o influență pregnantă a locului de testare în controlul acestei caracteristici, pe când proveniența a manifestat o influență mai scăzută.

Referitor la seria 98, Ct a prezentat o variație ridicată la toate nivelurile ($p < 0,001^{***}$), ceea ce semnaleză o influență ridicată a locului de testare, dar și a bagajului genetic al proveniențelor, în expresia fenotipică a acestei caracteristici.

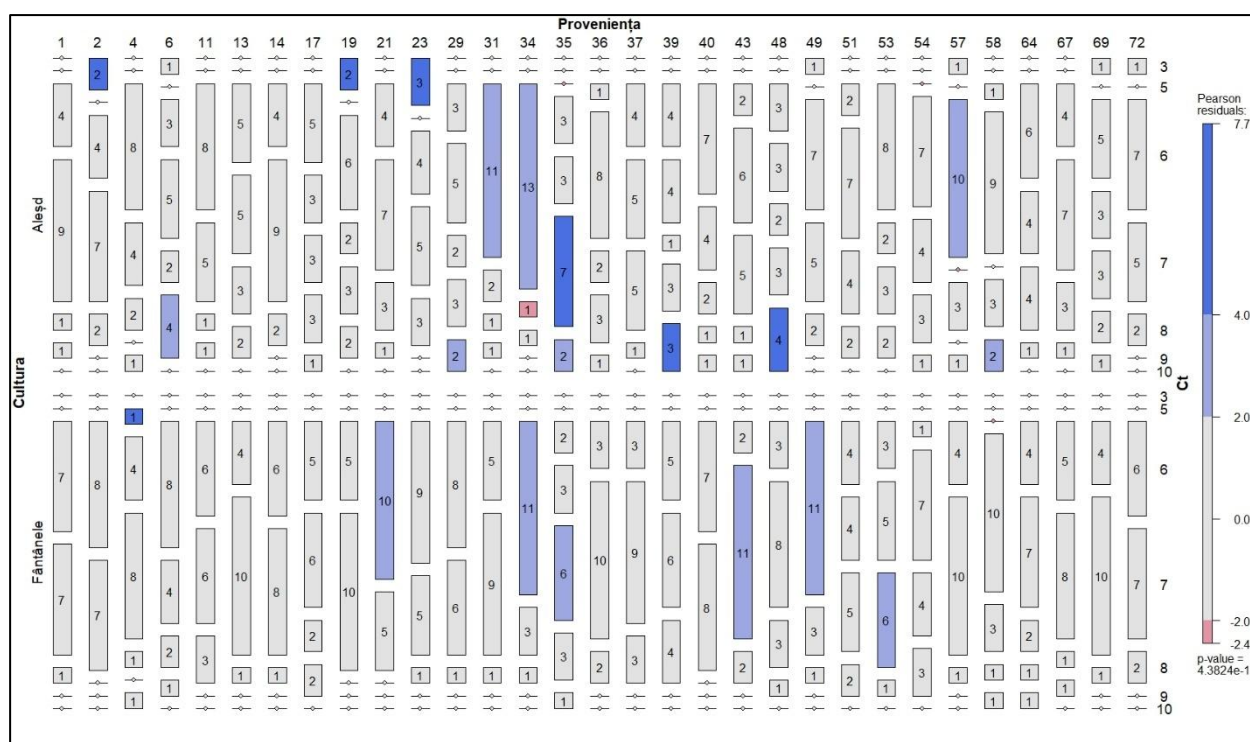
În seria 95, diferențele dintre cele două locuri de testare au fost semnificative la nivelul claselor patru, cinci și șapte. Acest rezultat sugerează că în cultura Săcele a fost identificat un număr semnificativ mai mare de arbori cu o curbura majoră (clasa 4) și arbori cu tulpini ușor sinuoase (clasa 5), respectiv un număr semnificativ mai mic de arbori cu două curbură medii (clasa 7). Pe de altă parte, în privința arborilor cu tulpină dreaptă (clasele 9 și 10) nu au fost identificate diferențe notabile. În consecință, se observă o proporție mai ridicată a arborilor cu defecte severe (clasele 3-6) în condițiile de mediu din cultura Săcele. La nivelul celor două locuri de testare, diferențe evidente au fost sesizate doar între proveniențele culturii Săcele. De asemenea, în acest experiment a fost identificată o reprezentare mai largă a claselor 3 – 5 (defecte severe) comparativ cu experimentul Cărbunari, aspect observat la proveniențele 95-Dk-26, 95-Ge-36, respectiv la proveniența 95-Ge-69 și cea autohtonă, 95-Ro-150, care au avut și cele mai slabe performanțe. Proveniențele care au performat (clasele 9 și 10) au fost 95-Ge-77 în cultura Cărbunari și 95-Ge-104 în cultura Săcele. De menționat este și reacția proveniențelor 95-Ge-40, 95-Ge-66 și 95-Ge-93, care au avut o performanță slabă, dar constantă în ambele experimente (Figura 4.9).



Culorile din grafic și intensitatea acestora reprezintă nivelul semnificației pentru măsura statistică Pearson residuals: gri = nesemnificativ, roșu = valori semnificativ mai mici, albastru = valori semnificativ mai mari; valorile reprezentate în interiorul chenarelor indică numărul observațiilor; liniile orizontale indică lipsa observațiilor.

Figura 4.9. Analiza calității tulpinii în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024a).

În seria 98, diferențele semnificative între cele două experimente au constat într-un număr mai mare de arbori cu multe defecte majore (clasa 3), dar în același timp și într-un număr mare de tulpini drepte (clasele 9 și 10), identificate în cultura Aleșd. De asemenea, s-a observat o pondere mai mică a arborilor grupați în clasa a șaptea (două curburi medii) în același experiment. Aceste aspecte evidențiază influența condițiilor staționale asupra calității tulpinilor fagului. Privitor la reacția proveniențelor, se remarcă faptul că cele mai bune performanțe (clasele 9 și 10) au înregistrat proveniențele 98-Au-35, 98-PI-39 și 98-PI-48 în cultura Aleșd. Însă, cele mai slabe performanțe au fost observate tot în experimentul Aleșd, la proveniențele 98-Fr-02, 98-Mb-19 și 98-Se-23. Totodată, este de menționat reprezentarea foarte scăzută a claselor 9 și 10 (tulpina dreaptă) în cultura Fântânele, dar și ponderea mare a clasei șase (tulpină ușor sinuoasă) în ambele locuri de testare (Figura 4.10).



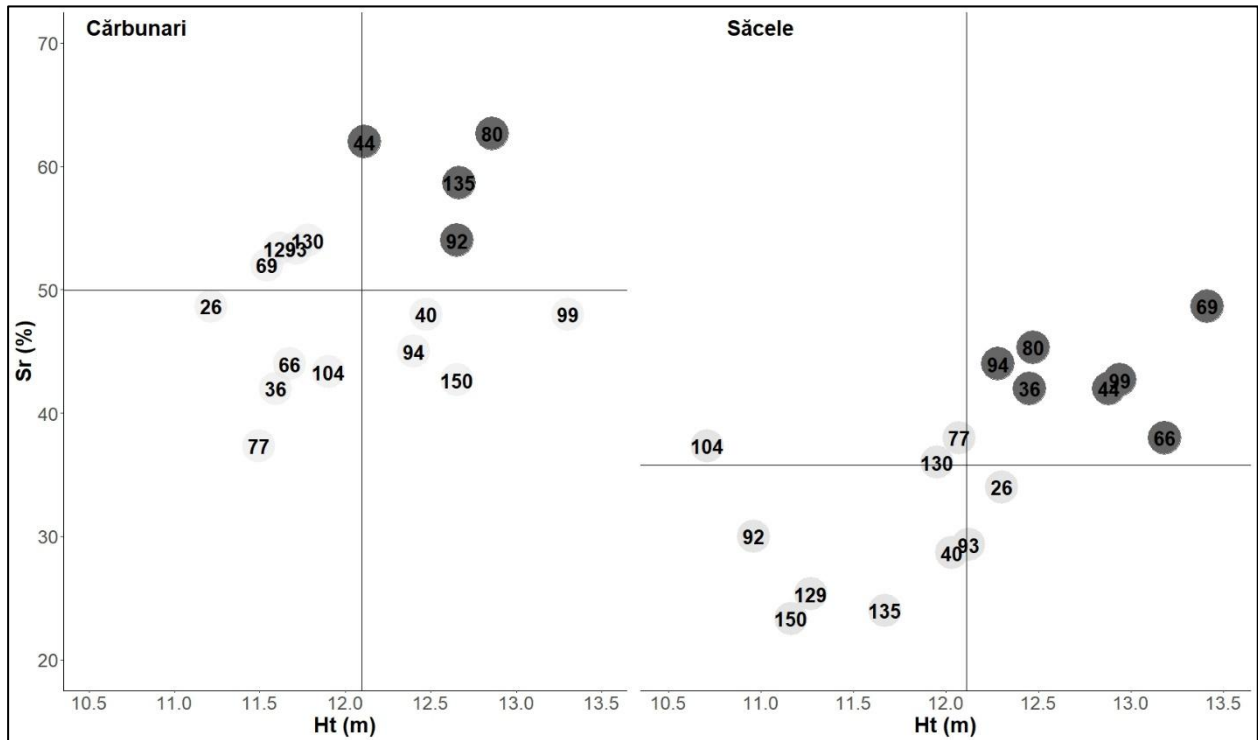
Culorile din grafic și intensitatea acestora reprezintă nivelul semnificației pentru măsura statistică Pearson residuals: gri = ne semnificativ, roșu = valori semnificativ mai mici, albastru = valori semnificativ mai mari; valorile reprezentate în interiorul chenarelor indică numărul observațiilor; liniile orizontale indică lipsa observațiilor.

Figura 4.10. Analiza calității tulpinii în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024a).

4.1.6. Evaluarea performanțelor de creștere

Separarea proveniențelor în funcție de performanțele de creștere a scos în evidență existența unor reacții variate ale acestora în cele două experimente din seria 95 (Figura 4.11). În cultura Cărbunari, s-au remarcat doar patru proveniențe, 95-Ge-44, 95-Ge-80, 95-Ge-92 și 95-Sk-135, iar în cultura Săcele, în fruntea clasamentului s-au poziționat proveniențele 95-Ge-44, 95-Ge-66, 95-Ge-69 și 95-Ge-99. Reacții similare în ambele experimente au fost observate la proveniențele 95-Ge-44 și 95-Ge-80, care au fost incluse în categoria celor mai bune proveniențe în ambele locuri de testare. De asemenea, performanțe slabe în cele două culturi au obținut proveniențele 95-Ge-104, 95-Sk-129 și

95-Sk-130. Totodată, anumite proveniențe au avut o reacție contrastantă în cele două experimente. Astfel, se observă că proveniențele 95-Ge-66 și 95-Ge-36 au avut performanțe ridicate în cultura Săcele, dar slabe în cultura Cărbunari, pe când proveniențele 95-Ge-92 și 95-Sk-135 au reacționat în mod opus, fiind mai performante în testul Cărbunari, dar foarte slabe în testul Săcele. Proveniența autohtonă, 95-Ro-150, a înregistrat performanțe scăzute în ambele experimente, în special datorită valorilor scăzute ale *Sr*.

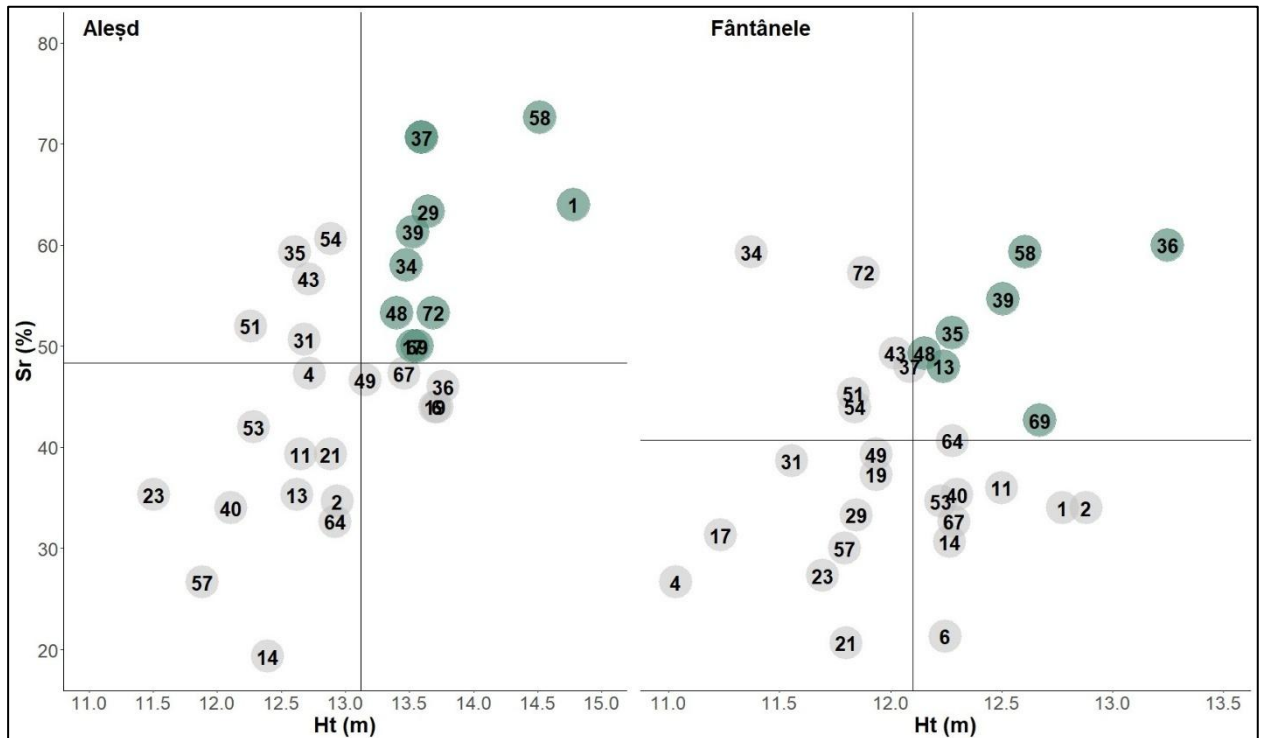


Curcile negre marchează cele mai ridicate performanțe ale proveniențelor; valorile medii ale experimentelor sunt marcate prin linii orizontale pentru *Sr* și linii verticale pentru *Ht*.

Figura 4.11. Evaluarea performanțelor de creștere în cadrul seriei 95, modificat după Besliu et al. (2024c).

Reacții variate ale proveniențelor au fost observate și în cazul seriei 98. În cultura Aleșd, au fost selectate 10 proveniențe cu performanțe ridicate de creștere. Dintre acestea, primele trei clasate au fost 98-Fr-01, 98-It-37 și 98-Bg-58. Cea mai scăzută performanță a fost înregistrată de proveniențele 98-Ol-14, 98-Se-23 și de proveniența de fag oriental 98-Bg-57. Un aspect important de menționat este faptul că aceste proveniențe, cu performanță ridicată, sunt originare din stațiuni cu altitudine mică (între 40 și 200 m). În cazul culturii Fântânele, doar șapte proveniențe au fost evidențiate pentru performanțe superioare, iar dintre acestea, proveniențele 98-Au-36, 98-Pl-39 și 98-Bg-58 au fost primele clasate. Proveniențele cu cele mai slabe performanțe au fost 98-Fr-04, 98-Mb-17 și 98-Dk-21. În altă ordine de idei, proveniențele 98-Pl-39, 98-Pl-48, 98-Pl-69 și 98-Bg-58 au performat în ambele experimente, fiind astfel mai puțin afectate de condițiile staționale contrastante din cele două teste. O reacție similară, dar neperformantă, a fost înregistrată de proveniențele 98-Fr-04, 98-Dk-21, 98-Se-23 și 98-Bg-57, în cele două culturi. Reacții diferite în cele două teste s-au consemnat în cazul

proveniențelor 98-Mb-17 și 98-Ge-29, care au fost incluse în categoria celor mai bune proveniențe în cultura Aleșd, dar în cultura Fântânele au avut unele dintre cele mai slabe performanțe. Contrar acestora, proveniența 98-Be-13 a obținut o performanță ridicată în mediul mai restrictiv (Fântânele) și una scăzută în condiții staționale optime (Aleșd). În legătură cu proveniența românească, 98-Ro-72, se poate remarca performanța ridicată din cultura Aleșd, iar în cultura Fântânele a fost aproape de a fi inclusă în clasamentul celor mai performante. Prin urmare, se poate observa o stabilitate a acestei proveniențe exprimată de Sr , dar o scădere a Ht indusă de transferul către un mediu limitativ din punct de vedere stațional.



Curcile verzi marchează cele mai ridicate performanțe ale proveniențelor; valorile medii ale experimentelor sunt marcate prin linii orizontale pentru Sr și linii verticale pentru Ht .

Figura 4.12. Evaluarea performanțelor de creștere în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024b).

4.1.7. Discuții

Performanțele de supraviețuire și de creștere ale proveniențelor pot fi considerate dovezi ale capacității de adaptare la condiții staționale specifice. Condițiile staționale au avut o influență semnificativă asupra stabilității proveniențelor de fag testate în cele patru culturi, stabilitatea fiind evaluată în baza performanțelor obținute pentru Sr . În condițiile staționale mai favorabile (optime) din culturile Cărbunari și Aleșd, stabilitatea proveniențelor a fost semnificativ mai ridicată față de cea înregistrată în culturile Săcele și Fântânele unde condițiile staționale sunt caracterizate de temperaturi mai scăzute (Săcele), respectiv temperaturi ridicate și precipitații scăzute (Fântânele). Prin urmare, a fost identificată o sensibilitate a proveniențelor de fag la interacțiunea cu temperaturi și precipitații mai scăzute, fapt confirmat și în alte studii de referință în cazul acestei specii (Leuschner & Ellenberg 2017; Peters 2013).

De asemenea, aceste remarci au fost indicate și de alte cercetări efectuate în culturile de fag din Europa, care au accentuat stabilitatea ridicată a proveniențelor în stațiuni favorabile acestei specii (Petkova et al. 2022; Von Wuehlisch et al. 2008). Pe lângă aceasta, influența semnificativă a condițiilor climatice asupra performanțelor proveniențelor de fag a fost raportată și de Chmura et al. (2024).

Numeroase studii efectuate în culturi comparative de fag au raportat existența unei variații ridicate, atât între locurile de testare, cât și la nivelul proveniențelor, cu privire la caracteristicile de creștere (Bogunović et al. 2020; Müller & Finkeldey 2016; Petkova et al. 2022; Stojnić et al. 2015a; Von Wuehlisch et al. 2008). Acest fapt este confirmat și de rezultatele obținute în cadrul prezentului studiu de cercetare, unde analiza variabilității *Ht* a evidențiat existența unei influențe semnificative a locului de testare, dar și un control genetic al acestei caracteristici. În cazul *Db*, a fost sesizată ca fiind semnificativă doar influența locului de testare, însă genotipul nu a prezentat un control asupra acestui caracter. Astfel, în optimul ecologic (Aleșd) proveniențele au înregistrat o performanță mai ridicată decât în zona de limită estică (Fântânele) pentru *Ht*, iar în condițiile de temperatură mai scăzută (Săcele) s-a observat o creștere mai bună în privința *Db* față de zona cu temperaturi mai ridicate (Cărbunari).

Caracteristicile morfologice ale tulpinii pot fi utilizate pentru studiul potențialului adaptativ al proveniențelor deoarece acestea sunt în strânsă legătură cu alți indicatori ai adaptabilității (Kembryté et al. 2022). În acest studiu, caracteristicile calitative evaluate (*Dr*, *Fk* și *Ct*) au fost utilizate pentru observarea tendințelor de adaptare manifestate de proveniențe.

În procesul de analiză a *Dr*, caracteristică ce determină calitatea lemnului (Ducci et al. 2012), s-a observat existența unei variații ridicate ce a fost determinată atât de specificul locului de testare, cât și de bagajul genetic al proveniențelor. Locurile de testare mai restrictive din punct de vedere stațional au contribuit la creșterea *Dr* și, prin urmare, la scăderea calității lemnului. Astfel, condițiile staționale din culturile Săcele și Fântânele au favorizat creșterea *Dr* și, totodată, au evidențiat o adaptare mai slabă a proveniențelor. Acest trend a fost observat și în cazul *Fk*, însă această caracteristică a rezultat a fi influențată semnificativ doar de locul de testare, deși este cunoscut faptul că există și un determinism genetic al înfurcării (Ducci et al. 2012). Totodată, condițiile staționale din culturile Cărbunari și Aleșd s-au dovedit a fi mai favorabile, deoarece a fost identificat un număr semnificativ mai mare de arbori fără înfurcire, iar proveniențele au avut o reacție de adaptare mai ridicată. *Ct* s-a dovedit a fi influențată atât de locul de testare, cât și de genotip, fiind astfel în acord cu rezultatele obținute de Del Rio et al. (2004). O prezență ridicată a arborilor cu defecte severe și un număr semnificativ mai scăzut de arbori cu tulpină dreaptă s-au înregistrat în culturile Săcele și Fântânele. Acest fapt confirmă adaptarea scăzută a proveniențelor în aceste experimente, care a determinat expunerea unui fenotip inferior din punct de vedere calitativ, rezultat confirmat și de alte studii (Horváth & Mátyás 2016; Mátyás et al. 2009b).

Evaluarea performanțelor a evidențiat stabilitatea ridicată a proveniențelor 95-Ge-44, 95-Ge-80, 98-Fr-01, 98-It-37 și 98-Bg-58, acestea fiind raportate și anterior de către Mihai (2009) ca fiind unele dintre cele mai bune proveniențe, remarcându-se astfel performanța constantă a proveniențelor după vârsta de 16 ani. Performanța ridicată a proveniențelor din Germania a fost accentuată și de alte cercetări efectuate în culturile instalate în această țară (Müller & Finkeldey 2016; Müller et al. 2020;

Thiel et al. 2014), însă Stojnić et al. (2015a) au observat o performanță scăzută a populațiilor germane în experimentele din zona de sud a Europei. Performanța ridicată a proveniențelor din Bulgaria a fost evidențiată și de Petkova et al. (2019) în culturile instalate în această țară. Tot aceeași autori remarcă superioritatea proveniențelor locale față de cele nemțești, însă această superioritate a fost contrară în experimentele din Germania (Thiel et al. 2014).

Mihai (2009) remarcă stabilitatea scăzută a proveniențelor 98-Fr-06, 98-OI-14 și 98-Dk-21, care a fost confirmată și în acest studiu. Performanța scăzută a provenienței 98-OI-14 a fost raportată și în culturile instalate în Olanda (Eilmann et al. 2014) și în Irlanda (Thompson 2007), confirmând astfel potențialul adaptativ scăzut al acestei populații de fag. O performanță scăzută în locurile de testare din România a fost observată și la proveniența de fag oriental 98-Bg-57. Această reacție a provenienței ar putea fi cauzată de unii factori limitativi, cum sunt temperaturile scăzute din timpul iernii, dar și de sezonul de vegetație mai scurt. Potențialul adaptativ scăzut al acestei varietăți de fag a fost observat și de Von Wuehlisch et al. (2008), în urma testării unei proveniențe din Turcia în mai multe stațiuni din Europa.

În privința *Dr*, proveniențele 95-Ge-66 și 98-SI-54 s-au remarcat prin cea mai bună performanță, însă 95-Ro-150 și 98-Fr-06 s-au situat la polul opus. Cu toate acestea, rezultate contrare au fost obținute în Suedia, unde proveniența din România (95-Ro-150) a fost în topul performanțelor, iar cea din Germania (95-Ge-66) s-a clasat printre cele mai slabe în legătură cu procentul nodurilor din lemn (Vaníček 2021). Proveniența 95-Ge-69 s-a remarcat printr-un număr mare de arbori fără înfurcire, dar cu o calitate redusă a tulpinii, iar 98-Lu-11 a fost una dintre proveniențele cu cea mai mare prezență a înfurcirilor, fapt consemnat și de Bergkvist (2019) în experimentul din Suedia, unde a prezentat cea mai ridicată predispoziție la înfurcire. De asemenea, acest autor evidențiază proveniența 98-Au-35 pentru o valoare ridicată a *Ct*, rezultat confirmat și în prezentul studiu.

Un alt aspect important de menționat este reacția provenienței autohtone, 95-Ro-150, care a înregistrat un nivel scăzut al *Sr*, *Fk* și *Ct* în ambele locuri de testare, performanța acesteia fiind depășită cu mult de proveniențele internaționale. Acest rezultat este confirmat și de un studiu anterior la nivelul acestor culturi (Mihai et al. 2008), dar și de Hofmann et al. (2015), care au evidențiat rezistența scăzută la îngheț a acestei proveniențe într-o cultură instalată în Germania, în cadrul aceleiași serii (95). Pe de altă parte, proveniența autohtonă din seria 98, 98-Ro-72, a obținut valori constante și peste mediile experimentelor, indicând o performanță bună. Această performanță a fost raportată și într-un studiu anterior efectuat în aceste culturi (Mihai et al. 2008), precum și într-un experiment din Irlanda (Thompson 2007). Cu toate acestea, în testele de proveniențe instalate în Bosnia și Herțegovina, Serbia și Croația, această proveniență nu a performat și, în plus, Konnert & Ruetz (2001) au punctat variația genetică redusă a acestei proveniențe.

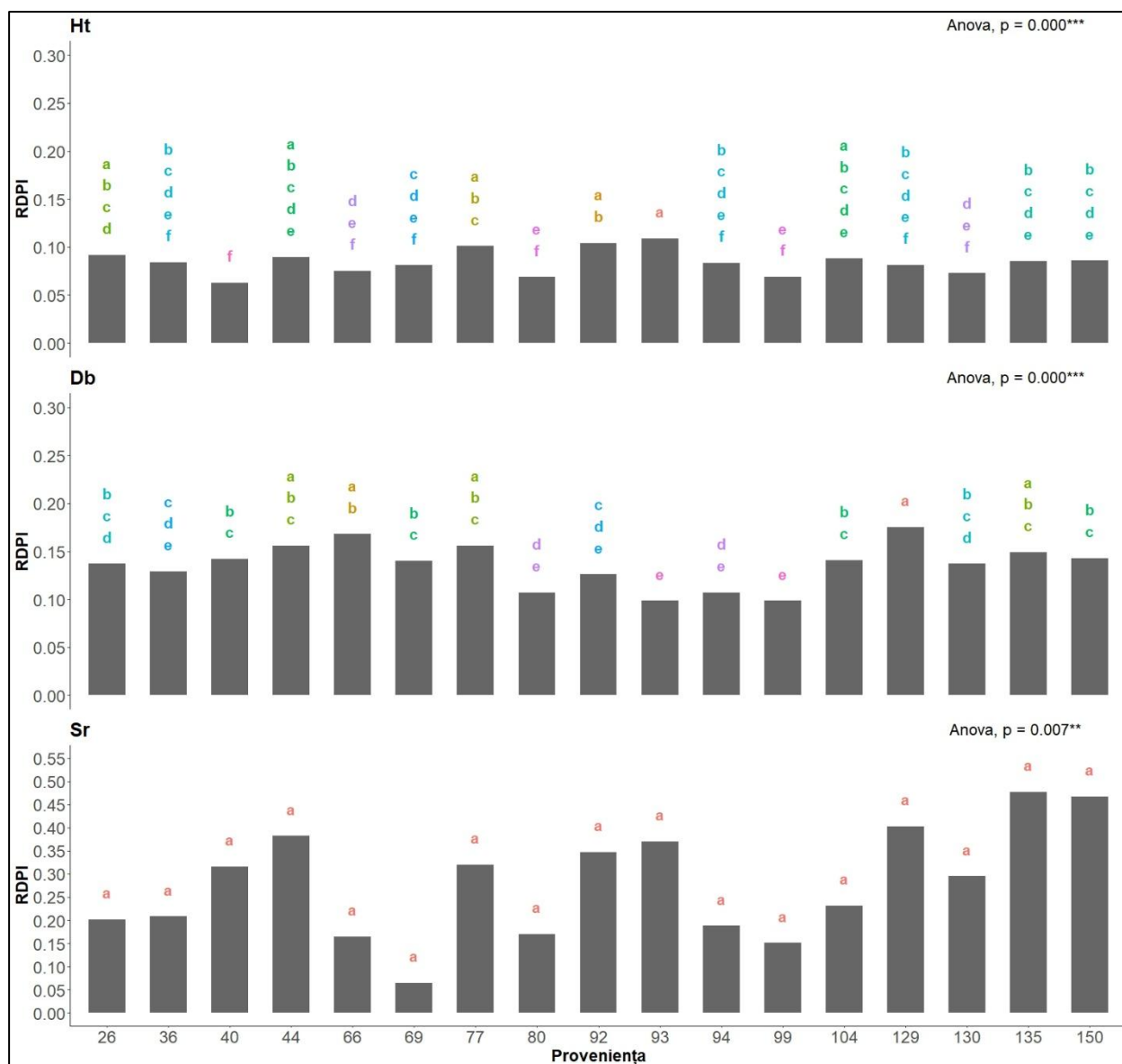
Luând în considerare schimbările de mediu tot mai intense, care au intensificat nevoia identificării unor populații cu potențial ridicat de creștere în condiții limitative (Dounavi et al. 2016; Knutzen et al. 2015; Nguyen et al. 2017; Rose et al. 2009), rezultatele obținute în acest studiu indică faptul că unele proveniențe ar deține această capacitate. Astfel, în condițiile limitative din cultura Fântânele,

proveniențele 98-Au-36, 98-Pl-39 și 98-Bg-58 au prezentat o performanță ridicată, iar proveniența 98-Be-13 s-a dovedit a fi mai performantă decât în optimul ecologic al speciei (cultura Aleșd), ceea ce indică existența unui potențial adaptativ ridicat al acestor populații, care trebuie studiat mai în detaliu.

Analiza rezultatelor obținute la nivel european în seriile de culturi a reliefat existența unei interacțiuni ridicate între genotip și locul de testare, precum și a potențialului adaptativ ridicat al anumitor proveniențe (Von Wuehlisch et al. 2008). Aceste remarci sunt susținute de rezultatele prezentului studiu, dar și de alte cercetări (Krajnc et al. 2022; Thiel et al. 2014). Luând în considerare aceste aspecte, precum și cele referitoare la reacțiile contrastante ale unor proveniențe care s-au dovedit a fi reprezentate de fenotipuri diferite în condiții staționale diverse (Enescu 1972), se observă clar nevoia testării proveniențelor în stațiuni cât mai variate, inclusiv cele din afara arealului, pentru a cuantifica mai precis potențialul adaptativ al fagului și, totodată, pentru a identifica populațiile eficiente și în condiții staționale restrictive (Benito-Garzon et al. 2013; Benito Garzón et al. 2019; Beșliu et al. 2022; Capdevielle-Vargas et al. 2015; Hewitt et al. 2011).

4.2. Plasticitatea fenotipică

Evaluarea plasticității fenotipice (P_f) în cadrul seriei 95 (Figura 4.13) a evidențiat existența unei variații semnificative între proveniențe, în special pentru caracteristicile H_t și Db , reliefând astfel diferențele dintre populațiile de fag cu privire la adaptarea la condiții staționale diverse. În general, valorile P_f au fost reduse. Pentru H_t , cel mai plastic răspuns a fost identificat la proveniența 95-Ge-93, iar cel mai scăzut nivel la proveniența 95-Ge-40. În cazul Db , s-a remarcat proveniența 95-Sk-129 pentru cea mai ridicată valoare a P_f și proveniențele 95-Ge-93 și 95-Ge-99 pentru valorile cele mai scăzute. La nivelul S_r , diferențierea a fost mai redusă între proveniențe, acestea fiind grupate într-o singură categorie. Cu toate acestea, se observă nivelul scăzut al P_f la proveniența 95-Ge-69 și cea mai mare valoare la proveniența 95-Sk-135. Dacă ne referim la media P_f pentru toate caracteristicile analizate, cele mai ridicate valori au fost înregistrate de proveniențele 95-Sk-129, 95-Sk-135 și de proveniența autohtonă, 95-Ro-150.



Literele poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă rezultatele testului Tukey HSD, iar grupurile omogene sunt marcate prin aceleași litere și culori; în partea dreaptă a diagramei este reprezentat rezultatul testului ANOVA (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.13. Evaluarea plasticității fenotipice în cadrul seriei 95.

La nivelul seriei 98 (Figura 4.14), gradul de variabilitate între proveniențe a fost ridicat pentru toate caracteristicile analizate, observându-se un trend similar cu cel din seria 95, în legătură cu diferențierea populațiilor de fag din Europa. Cel mai ridicat nivel de plasticitate l-au obținut proveniențele 98-EI-34 (pentru *Ht*), 98-Au-36 (pentru *Db*), 98-Fr-06 și 98-Dk-21 (pentru *Sr*). La polul opus, cele mai reduse valori ale *Pf* au înregistrat proveniențele 98-Au-35 (pentru *Ht*), 98-PI-40 (pentru *Db*) și 98-PI-43 (pentru *Sr*). Plasticitatea medie (pentru toate caracteristicile analizate) a avut cea mai ridicată valoare în cazul proveniențelor 98-Fr-01, 98-Fr-04, 98-Fr-06 și 98-Dk-21, iar cel mai redus nivel al *Pf* a fost înregistrat de proveniențele 98-PI-39, 98-PI-40, 98-PI-43 și 98-SI-53. Proveniența autohtonă, 98-Ro-72, a fost inclusă în grupul proveniențelor cu valori reduse ale *Pf* pentru *Sr*; însă pentru celelalte caracteristici valorile au fost grupate în jurul valorii mediei.



Literele poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă rezultatele testului Tukey HDS, iar grupurile omogene sunt marcate prin aceleași litere și culori; în partea dreaptă a diagramei este reprezentat rezultatul testului ANOVA (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.14. Evaluarea plasticității fenotipice în cadrul seriei 98, modificat după Besliu et al. (2024b).

4.2.1. Discuții

Simularea potențialului adaptativ este unul dintre cele mai notabile beneficii ale *Pf* deoarece poate identifica capacitatea diferitelor populații de arbori de a se adapta mai rapid la diverse condiții de mediu în comparație cu selecția naturală, care este un proces mai lent al adaptării (Crispo 2008). Prin urmare, evaluarea *Pf* ține de identificarea gradului de modificare a fenotipului la interacțiunea cu condiții staționale diferite (Bradshaw 1965; Bussotti et al. 2015).

Modul de evaluare a plasticității fagului poate viza simpla analiză a variabilității caracteristicilor de creștere între diferite condiții de mediu (Capdevielle-Vargas et al. 2015; Müller et al. 2020; Wortemann et al. 2011) sau poate fi cuantificat pe baza indicilor de plasticitate (Frank et al. 2017; Stojnić et al.

2015b), cum a fost determinată și în acest studiu. Evaluarea plasticității la nivelul celor două serii de culturi a fost considerată oportună datorită diferențelor semnificative dintre cele patru stațiuni, printre care se regăsesc și condiții limitative de vegetație pentru fag, favorizând astfel observarea tendințelor de adaptare a proveniențelor internaționale. Rezultatele obținute indică existența unei plasticități mai ridicate pentru *Sr* decât pentru caracteristicile de creștere (*Ht* și *Db*). Prin urmare, se poate spune că proveniențele au manifestat o reacție plastică la interacțiunea cu locurile de testare din regiunea carpatică a României, însă productivitatea acestora a fost redusă în zonele limitative, fapt ce consemnează prezența *Pf*, care determină reducerea performanței fenotipului în scopul adaptării (Benito Garzón et al. 2011; Lauteri et al. 2004). Rezultate similare au obținut și Stojnić et al. (2015b), care au observat că plasticitatea caracteristicilor anatomice ale frunzelor de fag a contribuit la adaptarea proveniențelor la condiții staționale severe. Pe lângă acestea, Frank et al. (2017) menționează că plasticitatea ridicată a puieților de fag, studiată la nivelul caracteristicilor de creștere, permite acestei specii să reziste și în condiții limitative de vegetație.

În acest studiu, pentru evaluarea *Pfs*-a utilizat indicele *RDPi*, care permite o abordare mai complexă din punct de vedere statistic față de alți indici de plasticitate utilizați în studiile amintite anterior. Prin urmare, acest indice (*RDPi*) este considerat a fi mai adecvat de utilizat în studiul plasticității la nivelul testelor de proveniență (Valladares et al. 2006). Rezultatele au evidențiat că proveniențele cu cea mai ridicată plasticitate medie au fost: 95-Sk-129, 95-Sk-135, 95-Ro-150, 98-Fr-01, 98-Fr-04, 98-Fr-06 și 98-Dk-21. Acest fapt indică existența unui potențial adaptativ mai ridicat la nivelul acestor proveniențe de fag. Însă, având în vedere complexitatea procesului de adaptare al speciilor forestiere, trebuie demarate studii mai complexe pentru certificarea potențialului adaptativ al fagului (Stojnić et al. 2013), iar acestea ar trebui concentrate în jurul separării plasticității adaptative de cea nonadaptativă (Ghalambor et al. 2007).

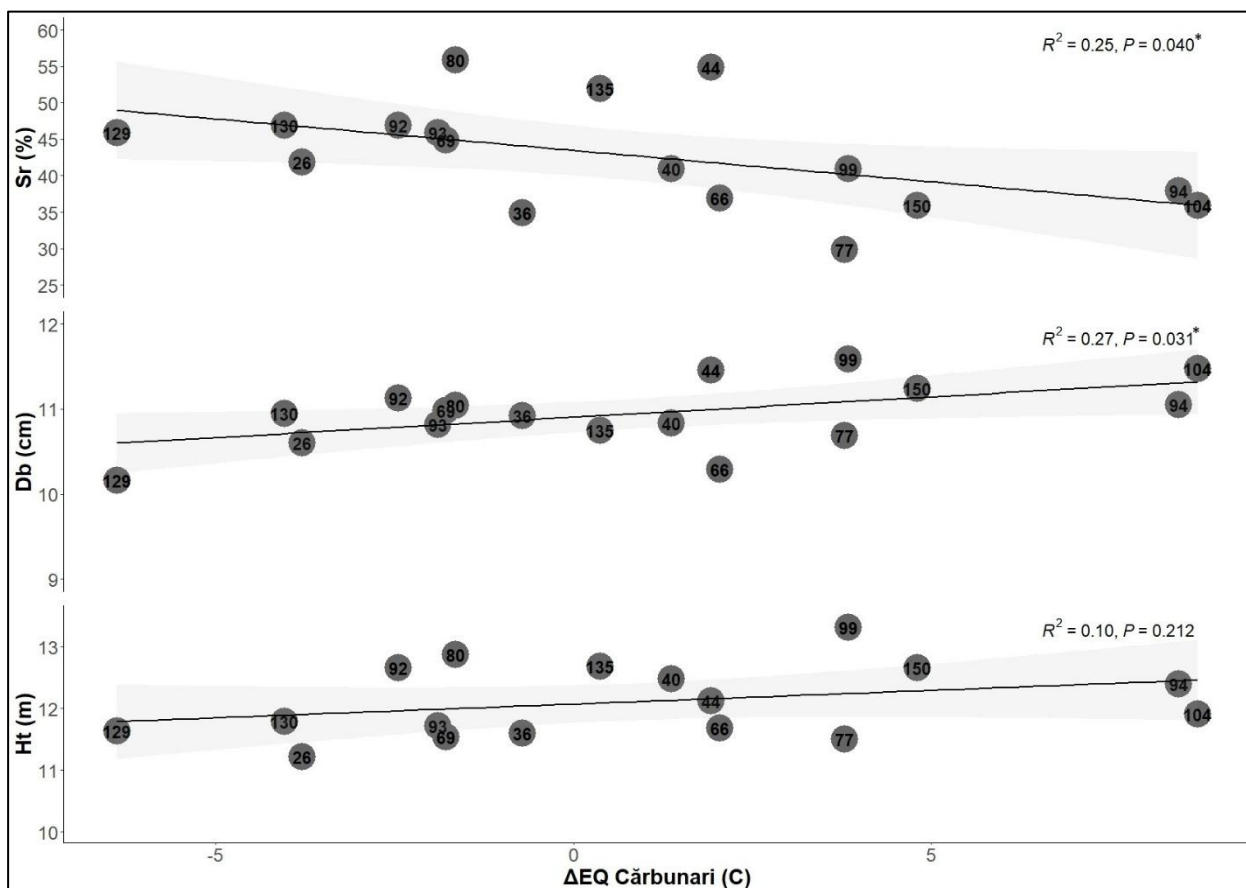
4.3. Analiza transferului proveniențelor

Analiza regresiei liniare la nivelul culturii Cărbunari (Figura 4.15) a evidențiat o corelație semnificativă ($p < 0,05^*$) în cazul *Sr* și *Db*, dar cu trenduri opuse. În privința *Sr* se observă că, odată cu creșterea distanțelor de transfer, scade stabilitatea proveniențelor în acest loc de testare. Astfel, abordarea potrivit căreia transferul proveniențelor din stațiuni diametral opuse poate produce scăderea stabilității se confirmă statistic în acest caz. În condițiile staționale din cultura Cărbunari s-a observat o scădere a stabilității pentru proveniențele transferate din zone cu temperaturi mai scăzute și precipitații mai ridicate (95-Ge-104, 95-Ge-94), dar o creștere a *Sr* pentru proveniențele transferate din condiții de mediu mai restrictive (95-Dk-26, 95-Sk-129 și 95-Sk-130). Acesta poate fi un rezultat al condițiilor climatice din cultura Cărbunari, caracterizate de o temperatură mai ridicată, care a favorizat adaptarea proveniențelor cu o predispoziție genetică pentru vegetarea în condiții staționale similare. De asemenea, parte din proveniențele cu origini climatice similare au înregistrat și cele mai ridicate performanțe (95-Ge-44, 95-Ge-80 și 95-Sk-135), dar acest fapt nu a fost confirmat pentru

proveniențele 95-Ge-36, 95-Ge-66, ceea ce evidențiază din nou reacția foarte divergentă existentă la nivelul populațiilor de fag din Europa.

În altă ordine de idei, creșterea distanțelor de transfer a influențat semnificativ și creșterea *Db*, trend observat și pentru *Ht*, dar pentru acesta din urmă fără semnificație statistică. Trendul opus identificat între *Sr* și *Db* poate fi explicat prin reducerea spațiului de creștere și, implicit, a competiției dintre arbori (generată de un nivel scăzut al *Sr*), care a favorizat creșterea *Db*.

Pentru transferul proveniențelor în cultura Săcele nu au fost identificate valori semnificative ale regresiei liniare, ceea ce evidențiază influența scăzută a distanțelor de transfer asupra caracteristicilor analizate în cadrul acestui experiment



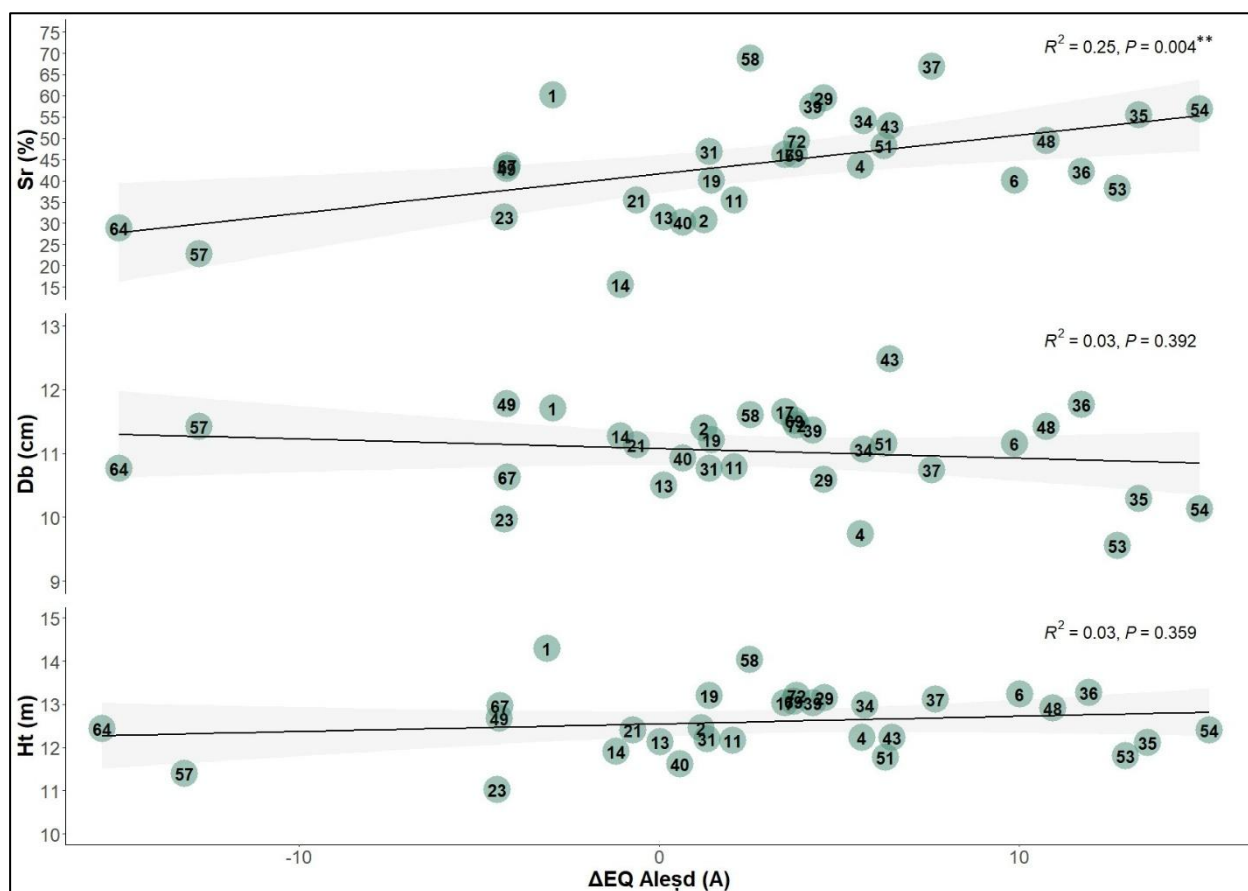
Proveniențele sunt reprezentate prin cercuri negre ce conțin indicativul numeric al acestora; în partea dreaptă a diagramei sunt reprezentate rezultatul ecuației de regresie (*R*) și nivelul semnificației statistice (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.15. Analiza transferului la nivelul culturii Cărbunari , modificat după Besliu et al. (2024c).

Influența semnificativă a distanțelor ecologice asupra *Sr* a fost observată și la nivelul culturii Aleșd (Figura 4.16). Proveniențele transferate din stațiuni mai reci și mai umede au avut o stabilitate mai ridicată față de cele transferate din zone mai aride. Prin urmare, condițiile optime s-au dovedit a fi mai favorabile pentru proveniențele din stațiuni mai reci și chiar pentru cele din zona alpină (98-Au-35, 98-Au-36, 98-It-37). Populațiile transferate din condiții staționale opuse au avut o reacție contrastantă în cultura Aleșd. Astfel, proveniența transferată din cel mai cald mediu (98-Ch-64) a înregistrat o valoare

a *Sr* cu 28% mai mică față de proveniența originală din cel mai rece mediu (98-SI-54). Proveniențele transferate din condiții climatice similare cu cele de testare au manifestat reacții variate. Unele s-au dovedit a fi neadaptate (98-OI-14, 98-Lu-11, 98-Be-13), însă altele (98-Fr-01 și 98-Bg-58) au fost încadrate în topul performanțelor în această cultură. Pentru caracteristicile de creștere (*Ht* și *Db*) nu a fost observată o influență directă a distanțelor de transfer, indicând o reacție constantă a proveniențelor.

În cazul culturii Fântânele (Figura 4.18), nu au fost identificate influențe semnificative ale distanțelor de transfer asupra caracteristicilor analizate. Cu toate acestea, în cazul *Sr* rezultatul influenței a fost foarte aproape de a fi semnificativ, ceea ce indică menținerea trendului observat în cultura Aleșd.



Proveniențele sunt reprezentate prin cercuri verzi ce conțin indicativul numeric al acestora; în partea dreaptă a diagramei sunt reprezentate rezultatul ecuației de regresie (*R*) și nivelul semnificației statistice (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.16. Analiza transferului la nivelul culturii Aleșd.

4.3.1. Discuții

Răspunsul fenotipic la interacțiunea cu diferite locuri de testare se consideră a fi condiționat nu doar de potențialul adaptativ al proveniențelor, ci și de magnitudinea și direcția transferului (Mátyás et al. 2009b). Prin urmare, analiza transferului proveniențelor în locuri diferite sub raport climatic poate fi considerată o simulare a migrației asistate (König 2005; Sansilvestri et al. 2015), proces prin intermediul căruia se urmărește creșterea stabilității și productivității arboretelor (Gray et al. 2011;

Leech et al. 2011), dar și păstrarea serviciilor ecosistemice oferite de pădure (Pedlar et al. 2012). În acest sens, transferul asistat al proveniențelor este considerat un proces complex, care include studii precise cu privire la sensibilitatea climatică și performanța proveniențelor în culturi comparative (Mátyás 2021).

În prezentul studiu, testarea efectului transferului în cazul proveniențelor internaționale de fag a fost efectuată prin aplicarea conceptului distanțelor ecologice de transfer (Mátyás 2021; Mátyás et al. 2009a; Mátyás et al. 2009b; Mátyás & Yeatman 1992). Această tehnică presupune utilizarea indicelui *Ellenberg quotient* pentru caracterizarea climatului locului de testare, precum și cel al locului de origine. Indicele *Ellenberg quotient* este considerat a fi un indicator potrivit al favorabilității staționale pentru fag (Czúcz et al. 2011) și a fost utilizat și în alte studii care au vizat testarea rezilienței acestei specii (Budeanu et al. 2016; Dujka & Kusbach 2023).

Evaluarea efectului general al transferului proveniențelor internaționale de fag în locurile de testare din România a evidențiat existența a două tipuri de răspuns. Astfel, lipsa unei influențe a distanțelor de transfer asupra caracteristicilor analizate a fost asimilată cu o reacție similară a proveniențelor și, prin urmare, o adaptare bună la condițiile staționale ale locurilor de testare din cadrul seriei 95. Rezultate similare au fost obținute și de Petkova et al. (2019), care au studiat impactul transferului în culturile de fag din Bulgaria și au reliefat inexistența unei legături semnificative între supraviețuire, înălțime și distanțele de transfer. Totuși, în analiza seriei 98 s-a observat că stabilitatea proveniențelor a fost semnificativ influențată de magnitudinea și direcția transferului. În acest sens, a fost indicată creșterea stabilității proveniențelor în raport cu majorarea distanțelor de transfer dinspre stațiuni mai reci și umede spre cele mai calde și uscate, ceea ce scoate în evidență capacitatea populațiilor ce vegetează în stațiuni mai reci și, implicit, de la altitudini mai ridicate, de a performa și în stațiuni mai calde. Acest aspect a fost menționat și de Liepe et al. (2024) în studiul proveniențelor de fag testate în trei culturi din Germania. Totodată, Chmura et al. (2024) au observat o influență pozitivă asupra creșterii în diametru în cazul transferului către locuri de testare cu ierni mai blânde.

La nivelul celor patru culturi, o influență semnificativă a transferului a fost observată în cultura Cărbunari, unde supraviețuirea proveniențelor a fost influențată de creșterea distanțelor de transfer. Prin urmare, transferul proveniențelor din stațiuni mai reci în locul de testare în care temperaturile sunt mai ridicate (Cărbunari) a afectat semnificativ supraviețuirea, însă în cazul proveniențelor transferate din stațiuni mai calde valorile *Sr* au crescut. Acest trend al influenței distanțelor de transfer a fost identificat și în cadrul unui studiu efectuat în două culturi comparative din Slovacia și Cehia la nivelul caracteristicilor morfologice ale frunzelor (Petrík et al. 2020). În plus, autorii menționează reacția bună de adaptare a proveniențelor la condițiile locurilor de testare. Un aspect important de menționat este sensibilitatea proveniențelor la schimbarea temperaturii, fapt ce a fost observat între cele două locuri de testare din seria 95. Astfel, dacă la nivelul culturii Săcele, caracterizată de o temperatură mai scăzută, nu au fost sesizate influențe semnificative ale transferului, în cazul culturii Cărbunari, unde temperaturile sunt mai ridicate cu 2,4 °C, influențele au fost semnificative pentru *Sr* și *Db*. Prin urmare,

precipitațiile fiind echivalente între cele două experimente, factorul care a produs această schimbare este considerat a fi temperatura.

În cazul culturii Aleșd, creșterea distanțelor de transfer este cea care a influențat pozitiv stabilitatea proveniențelor, indicând o performanță mai bună a proveniențelor transferate din zone mai reci și mai umede, trend observat și în stațiunea limitativă din cultura Fântânele, dar nesemnificativ statistic. Acclimatizarea proveniențelor de fag la stațiuni mai calde decât cele de origine a fost observată și de Petrik et al. (2022). Prin urmare, adaptarea proveniențelor este condiționată mai mult de criterii ecologice, decât geografice, indicând nevoia unei abordări bazate pe macroclimat în definirea regulilor de transfer al materialelor de bază (Mátyás et al. 2009a; Mátyás et al. 2009b).

Proveniențele testate în toate cele patru culturi au manifestat diferite reacții la transfer. Parte din proveniențele transferate din condiții similare au avut o performanță foarte bună, ceea ce evidențiază necesitatea transferului proveniențelor către stațiuni echivalente din punct de vedere climatic (Konnert et al. 2015). Pe de altă parte, reacția asemănătoare a proveniențelor transferate din stațiuni total opuse, precum și diferențele mari dintre proveniențele ce au origini climatice foarte apropiate indică existența unei variații ridicate a receptivității climatice între populațiile de fag din Europa (Gömöry et al. 2010; Konnert & Ruetz 2001; Stojnić et al. 2015a; Stojnić et al. 2016; Vettori et al. 2004). Declinul populațiilor locale de fag previzionat de Chakraborty et al. (2024) pentru viitor, precum și performanța populațiilor alpine, sunt confirmate și la nivelul acestui studiu. Proveniențele autohtone de fag au fost depășite semnificativ în performanță de cele internaționale, iar proveniențele alpine au avut o reacție de adaptare bună, chiar și în cele mai grele condiții.

Nevoia testării potențialului adaptativ al fagului și în stațiuni limitative, proces susținut de Benito Garzón et al. (2019), este confirmată și de rezultatele obținute în acest studiu, deoarece reacția bună de adaptare a proveniențelor și în condițiile limitative (cultura Fântânele) indică necesitatea explorării exigențelor acestei specii și confirmarea potențialului de adaptare prin teste de proveniență instalate în condiții limitative de vegetație. Adaptarea proveniențelor chiar și în condiții limitative scoate în evidență potențialul adaptativ ridicat al speciei *F. sylvatica* (Kramer et al. 2017; Roibu et al. 2022) și indică o posibilă reacție de stabilitate la schimbările de mediu preconizate (Gárate-Escamilla et al. 2019; Meier & Leuschner 2008; Stojnić et al. 2015b).

4.4. Testarea modelului Funcției Universale de Răspuns

4.4.1. Modelarea creșterii în înălțime pentru perioada actuală

În elaborarea *Funcției Universale de Răspuns (URF)* pentru perioada actuală și având ca variabilă de răspuns înălțimea normalizată (Hn), s-au utilizat 500 de arbori de decizie pentru antrenarea modelului și la fiecare diviziune (split) a fost luată în considerare o subgrupă de trei variabile. Modelul explică aproximativ jumătate din variația variabilei dependente (Hn) pe baza predictorilor selectați, ceea ce indică faptul că performanța modelului a fost una moderată. Principalul factor care a determinat

performanța moderată a modelului este numărul foarte redus de locuri de testare (patru), precum și diferențierea redusă a acestora sub raportul condițiilor staționale.

Analiza importanței variabilelor utilizate ca predictorii a scos în evidență rolul decisiv al climatului de origine al proveniențelor în explicarea variabilității înălțimii arborilor. Analizând predictorii climatici, cea mai ridicată influență a fost identificată pentru temperatura maximă din timpul verii (*prov_ Tmax_sm*), corespunzătoare locului de origine, pe când indicele anual de ariditate (*site_AHM*), corespunzător locului de testare, a înregistrat cea mai scăzută implicare în variația variabilei dependente. Pe de altă parte, vârsta arborilor a fost identificată ca fiind predictorul cu cea mai scăzută influență asupra înălțimii arborilor, ceea ce subliniază faptul că aceasta deține un rol secundar în adaptarea climatică a speciei.

Reprezentarea grafică a creșterii în înălțime a fagului la nivelul României (Figura 4.17) scoate în evidență zonele favorabile precum și cele mai puțin favorabile acestei specii. Prin urmare, se observă un potențial ridicat de creștere (galben) în zonele carpatice și subcarpatice, precum și în partea centrală a Transilvaniei și a Podișului Moldovei. De asemenea, o concentrare mai mare a creșterilor ridicate a fost identificată în zona Carpaților Occidentali. În aceste stațiuni, marcate prin culoarea galben, este indicată o creștere estimată (*He*) de peste 70%. Astfel, dacă în aceste zone ar fi efectuate regenerări, utilizând material de reproducere din proveniențele incluse în model, la atingerea vârstei de 20 de ani, creșterea în înălțime a arboretelor instalate ar atinge aproximativ 70% din creșterea actuală. La popul opus, în sudul țării, parte din zona vestică și estică, precum și în zonele montane înalte sunt estimate creșteri foarte reduse.

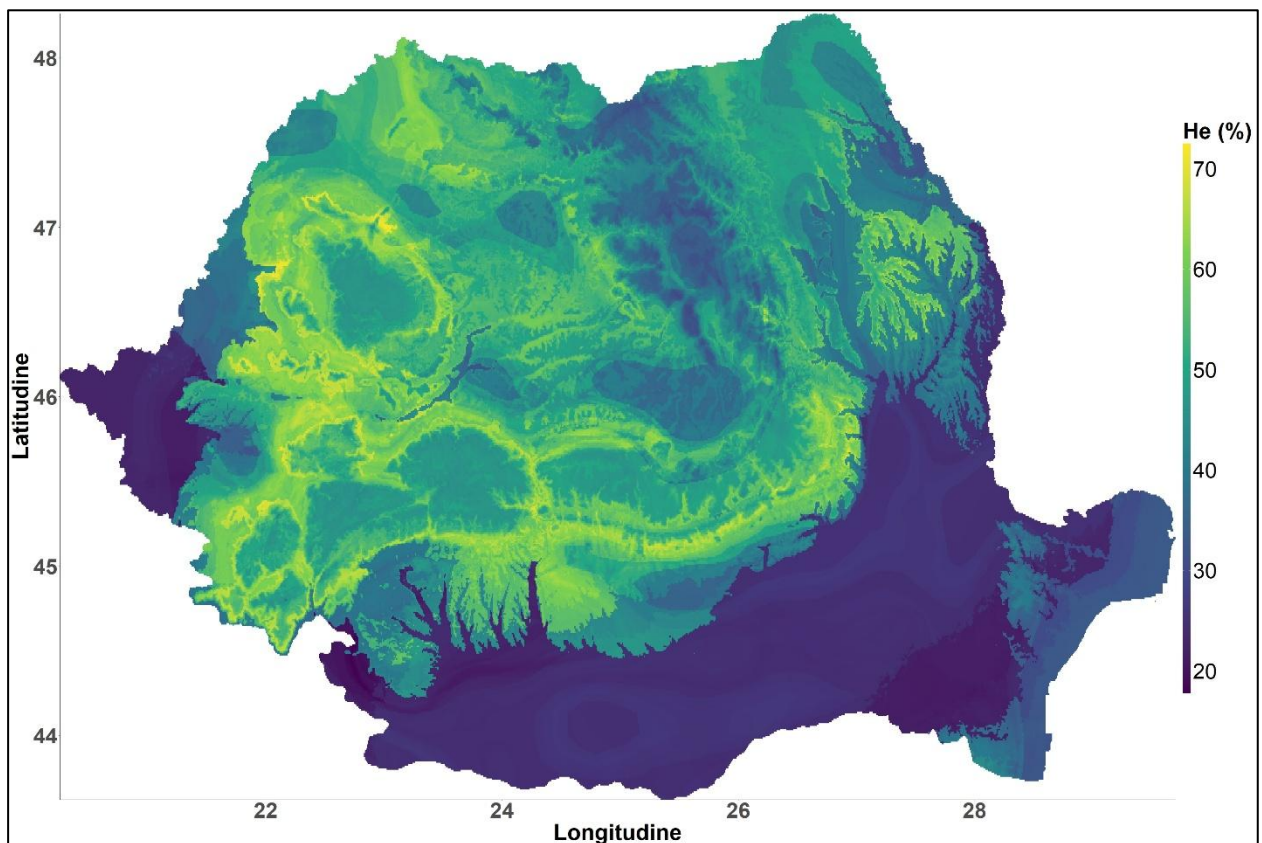
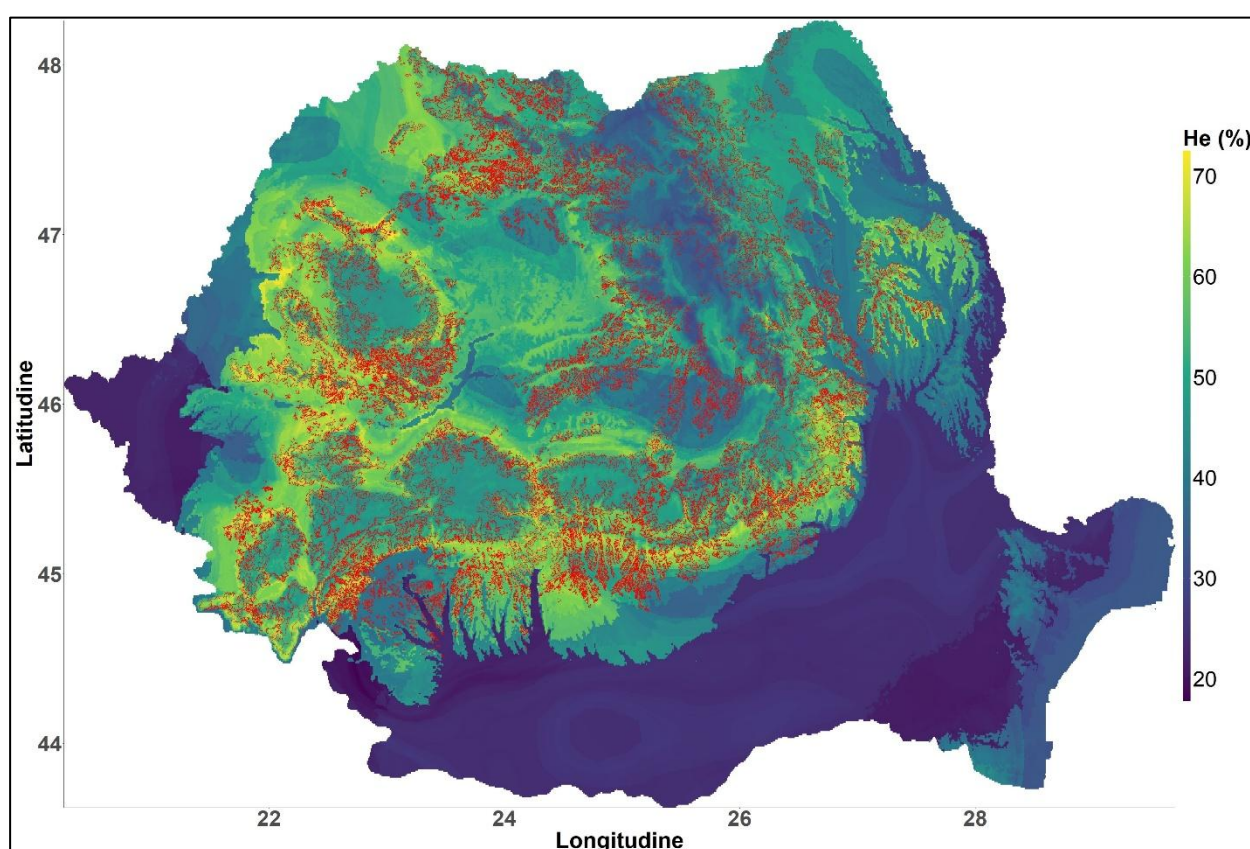


Figura 4.17. Modelul distribuției actuale a speciei *F. sylvatica* în România.

Suprapunerea distribuției actuale a fagului în România peste modelul *URF* (Figura 4.18) evidențiază anumite aspecte importante. Unul dintre acestea este precizia modelului care reușește să delimiteze cu o acuratețe bună zonele favorabile de cele nefavorabile, cum este cazul zonei din Podișul Moldovei sau celei din sudul Carpaților Meridionali. Cu toate acestea, apar și zone în care specia nu este prezentă, iar cerințele ecologice ale acesteia nu ar putea fi satisfăcute, cum este zona de nord-est a țării. În altă ordine de idei, această reprezentare grafică scoate în evidență și potențiale stațiuni în care specia ar putea vegeta, în cazul menținerii unui trend similar al condițiilor climatice. Stațiunile cu potențial de susținere a unor creșteri ridicate sunt cu precădere situate în jurul formațiunilor montane, în zona subcarpatică precum și în zona de deal. De asemenea, porțiuni din Podișul Transilvaniei sunt indicate ca posibile zone în care fagul ar putea vegeta.



Distribuția speciei F. sylvatica în România este reprezentată prin culoarea roșie (Doniță et al. 2008).

Figura 4.18. Analiza comparativă între distribuția actuală a speciei și rezultatele modelului pentru perioada actuală.

4.4.2. Modelarea creșterii în înălțime în diferite scenarii climatice

Pe baza modelului *URF* generat pentru perioada actuală, a fost elaborat modelul de distribuție a fagului în două scenarii climatice RCP 4,5 și 8,5, separat pentru intervale specifice de timp. În cadrul acestui model s-au utilizat doar predictorii climatici specifici locului de testare, însă variabilitatea explicată a fost una semnificativ mai scăzută, având o medie de 4,70% și variind în funcție de datele climatice

specifice fiecărei perioade, respectiv ale fiecărui scenariu. Această performanță redusă a modelului se datorează limitărilor privitoare la datele utilizate, prezentate pe larg în secțiunea precedentă, și îndeosebi utilizării exclusive a predictorilor climatici aferenți locului de testare, care au o pondere scăzută în explicarea varianței H_n .

Reprezentarea grafică a distribuției obținute pe baza modelului, pentru perioada 2021-2040 (Figura 4.19), corespunzătoare scenariului RCP 4.5, evidențiază o restrângere semnificativă a creșterilor estimate (He) ale fagului, diferențele față de creșterile maxime obținute pentru perioada actuală (2011-2020) fiind de aproximativ 20%. La nivelul României se observă o scădere accentuată a creșterilor în zonele exterioare lanțului Carpatic și, în același timp, un transfer al acestor creșteri către zonele mai înalte ale Munților Carpați. Prognoza pentru arboretele din zona de est și cele din zona subcarpatică afișează o reducere semnificativă a creșterilor datorată în principal modificării bonității stațiunilor, care nu vor mai putea susține o creștere satisfăcătoare a fagului. În ceea ce privește arboretele din zona montană, pentru acestea este prevăzută o ascensiune către zone mai înalte, iar o mare parte din stațiunile de la altitudini ridicate, care nu sunt favorabile fagului în prezent, vor deveni posibile zone de migrație. De asemenea, se observă un declin al arboretelor marginale din zonele cu altitudini scăzute, al căror viitor este incert pe baza acestei prognoze. De menționat este rapiditatea cu care schimbările de mediu vor acționa asupra acestei specii, dat fiind orizontul apropiat al acestor reduceri ale creșterilor.

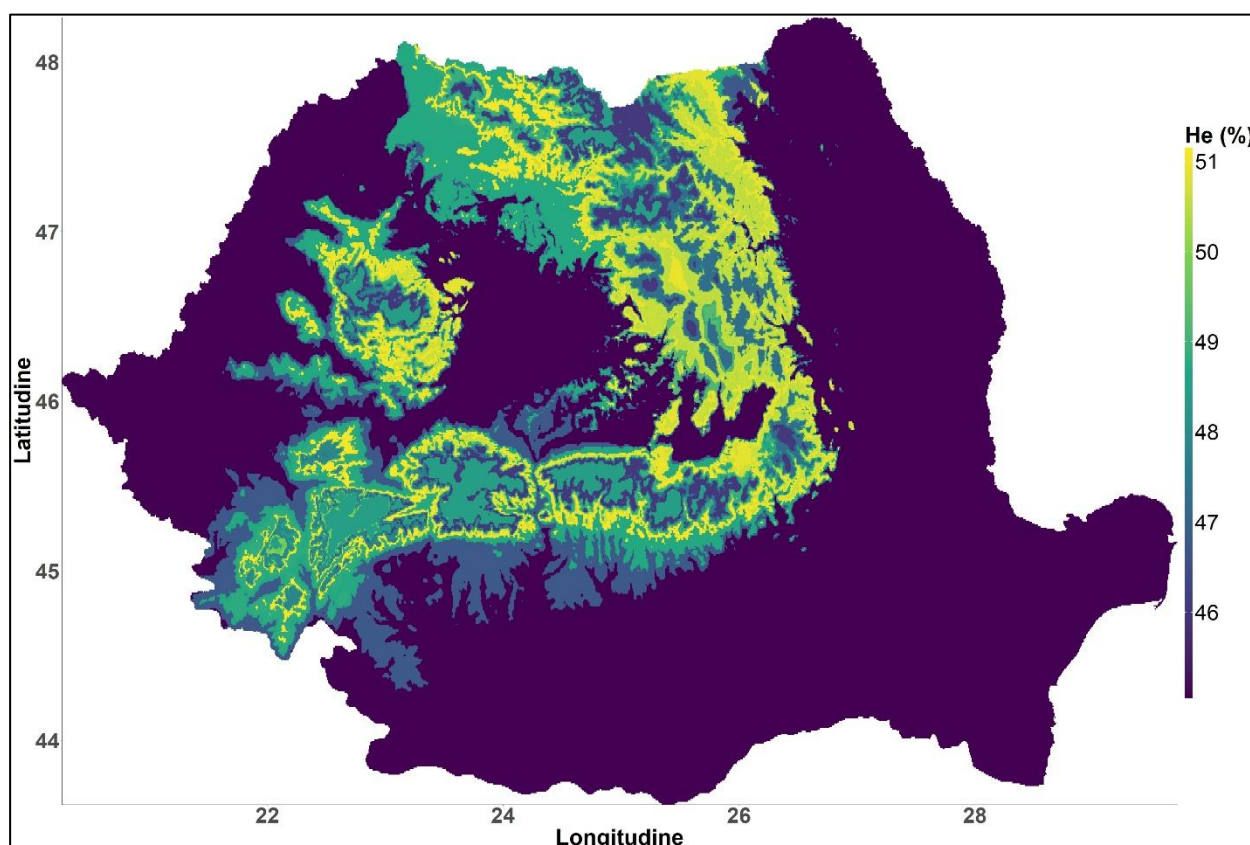


Figura 4.19. Modelul distribuției speciei *F. sylvatica* în România în contextul RCP 4.5, perioada 2021-2040.

Ultima perioadă analizată din scenariul climatic RCP 4.5 prevede o nouă reducere a creșterilor potențiale ale fagului în România. Reprezentarea grafică surprinde o reducere a creșterilor din zona montană înaltă din toate diviziunile Carpaților. Cu toate acestea, în Carpații Orientali se identifică cele mai întinse suprafețe cu creșteri mai intense, comparativ cu celelalte zone montane ale țării. Pe lângă acestea, se observă o oarecare restrângere a creșterilor și în zona montană joasă a arealului speciei, dar, în aceeași măsură, o creștere a favorabilității stațiunilor montane de la altitudini ridicate, cum este cazul Carpaților Meridionali și al nordului Carpaților Orientali (Figura 4.20).

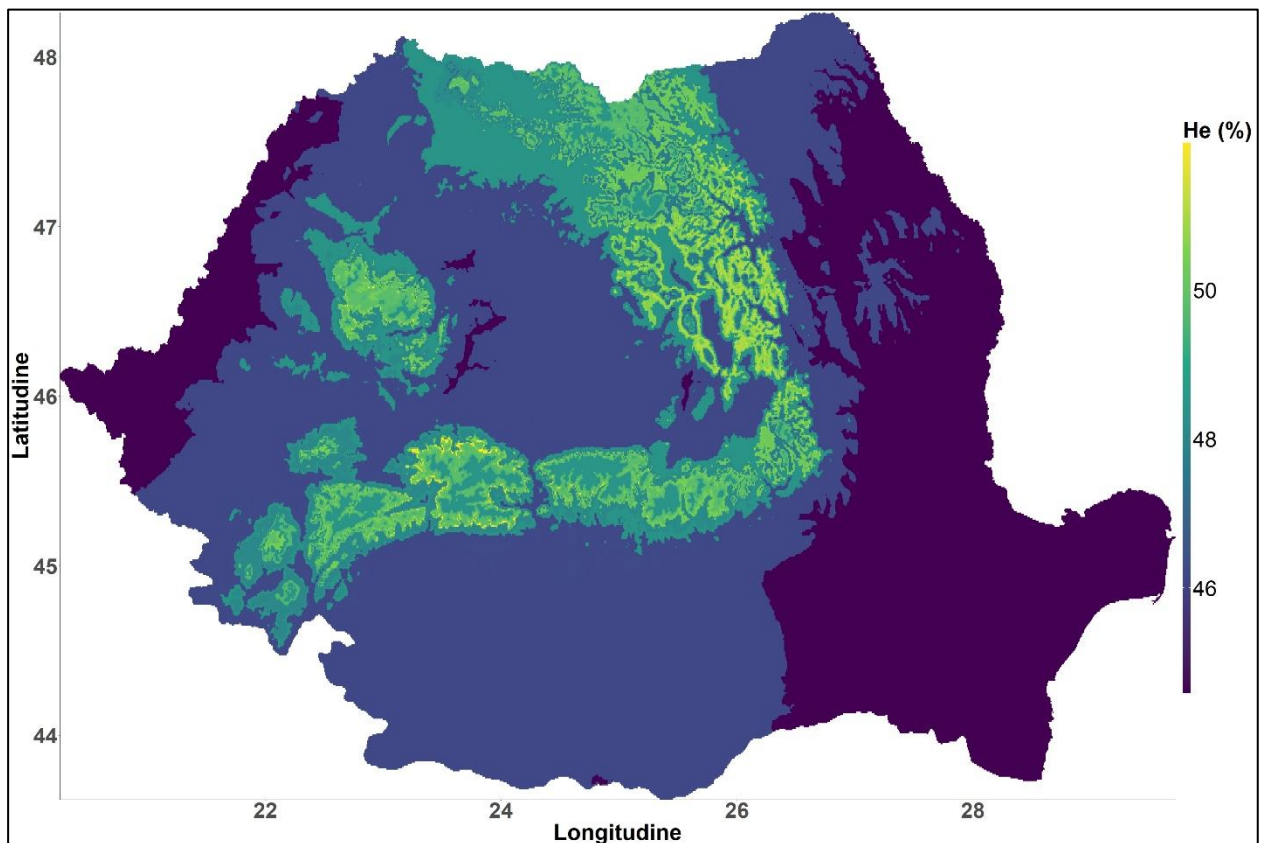


Figura 4.20. Modelul distribuției speciei *F. sylvatica* în România în contextul RCP 4.5, perioada 2081-2100.

Prima perioadă analizată din scenariul climatic RCP 8.5 indică reducerea creșterilor cu 20% față de distribuția actuală a creșterilor (Figura 4.21). Se constată o reducere a înălțimii similară cu perioada corespondentă din scenariul RCP 4.5, însă cele mai intense creșteri de această dată sunt la altitudini mai ridicate. Dacă în scenariul RCP 4.5 erau indicate creșteri ridicate și în anumite puncte din estul Carpaților Orientali, în acest caz, acestea sunt reprezentate prin creșteri mai reduse. Cu privire la zonele montane, se observă o ascensiune mai pregnantă către altitudini mai ridicate, precum și o concentrare a celor mai întinse suprafețe, cu creșteri mai intense, în zona Carpaților Orientali. Prin urmare, diviziunile Carpaților Meridionali și Occidentali sunt prevăzute cu un regres al creșterilor pentru specia *F. sylvatica*. Creșterile din zona de sud a arealului, precum și cele din zona de est, se îngustează drastic, iar în zona subcarpatică și de deal sunt prevăzute scăderi semnificative ale înălțimii arborilor.

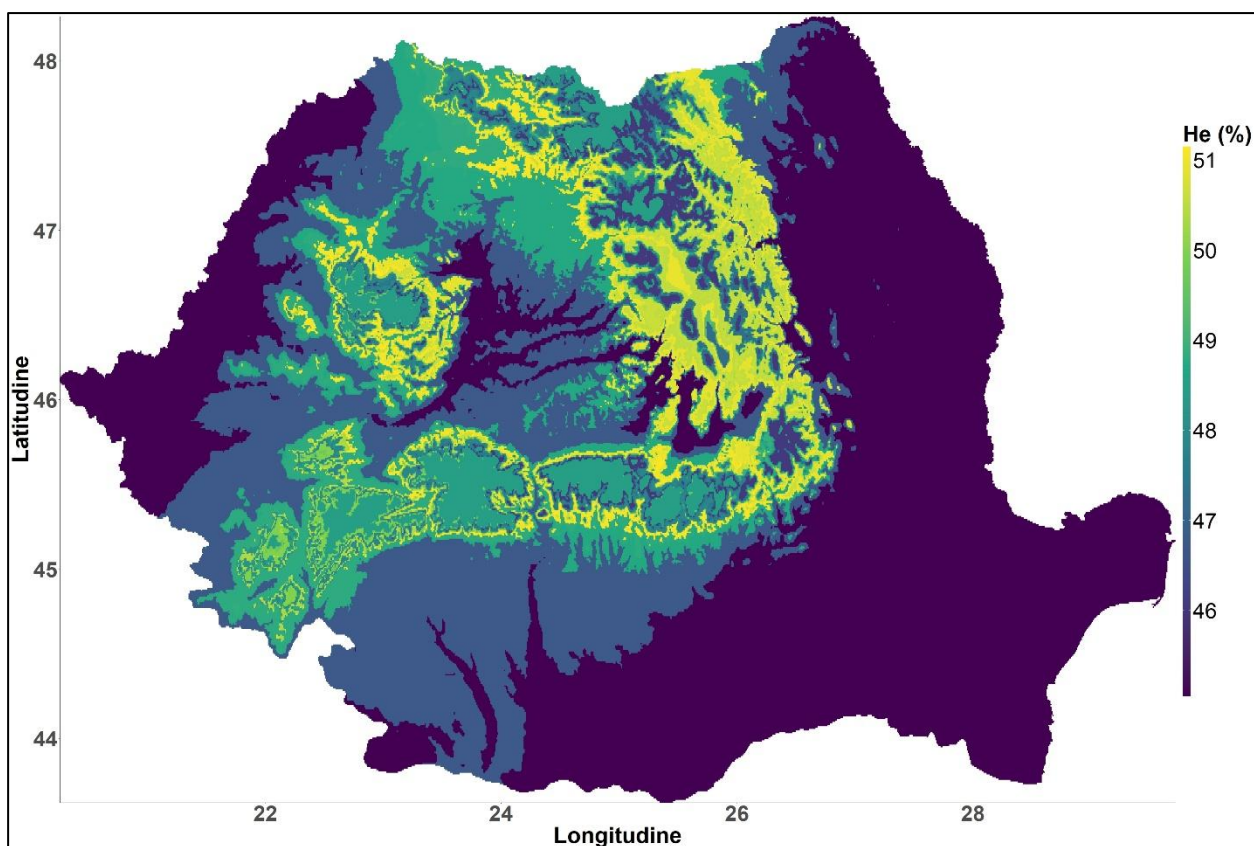


Figura 4.21. Modelul distribuției speciei *F. sylvatica* în România în contextul RCP 8.5, perioada 2021-2040.

Pentru ultima perioadă a scenariului RCP 8.5, cu orizontul în anul 2100 (Figura 4.22), este prognozată o reducere extremă a zonelor cu creșteri din arealul fagului. Această perioadă este asimilată cu o intensificare a fragmentării stațiunilor montane favorabile creșterii fagului, care va condiționa restrângerea speciei doar în puține zone cu altitudini ridicate. Dacă în perioada precedentă creșterile cele mai însemnate erau atribuite diviziunii estice a Carpaților, în cazul de față, creșterile sunt foarte restrânse în această parte a Carpaților (Munții Ceahlău și Rodnei), dar apar și în zonele cu altitudini ridicate din Carpații Meridionali (Munții Șureanu, Parâng, Lotrului), precum și izolat în Munții Apuseni. În ceea ce privește comparația cu perioada similară din scenariul RCP 4.5, se observă o scădere drastică a suprafețelor favorabile creșterii în înălțime, dar și o fragmentare foarte accentuată.

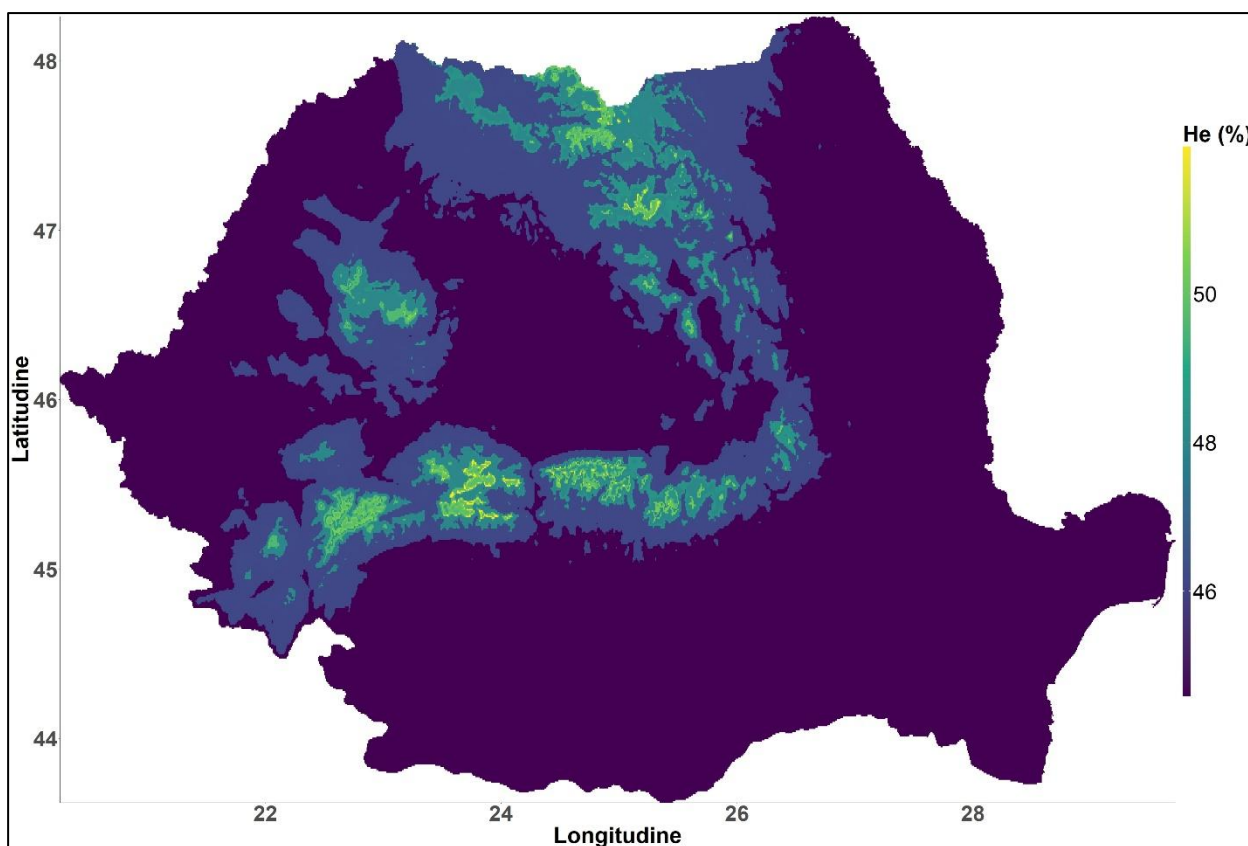


Figura 4.22. Modelul distribuției speciei *F. sylvatica* în România în contextul RCP 8.5, perioada 2081-2100.

4.4.3. Discuții

Rezultatele obținute pentru distribuția creșterilor estimate de model (He) la nivelul României asimilează potențialul cel mai ridicat de creștere cu zonele montane, subcarpatice și de deal, corespunzător, în cea mai mare parte, arealului natural actual al speciei (Beșliu et al. 2022; Doniță et al. 2008; Marin et al. 2020; Milesco et al. 1967; Șofletea & Curtu 2008). Creșteri moderate și slabe au fost identificate în regiunile extracarpătice, în zonele de la limita arealului, precum și în zonele montane înalte, mai puțin favorabile speciei (Beșliu et al. 2022; Șofletea & Curtu 2008). De menționat potențialul creșterilor maxime, de aproximativ 70% din creșterile actuale, care ar putea fi obținute în viitoarele arborete de fag, până la atingerea vârstei de 20 de ani, în contextul menținerii condițiilor climatice actuale (perioada 2011-2020). Prin urmare, este indicată o scădere a creșterilor acestei specii în decursul timpului, fapt atenționat de Martinez del Castillo et al. (2022) într-un studiu de referință, ce subliniază trendul semnificativ descrescător al creșterilor arboretelor de fag (inclusiv cele din România) din perioada 1995-2016, determinat de creșterea temperaturilor. Această scădere a creșterii estimate este susținută și de creșterea temperaturilor din ultimul deceniu (2011-2020), care au depășit pragul de 1 °C, comparativ cu perioada 1850-1900 (IPCC 2023).

În altă ordine de idei, teritoriile marcate de model prin creșteri susținute în înălțime (de exemplu , centrul Podișului Transilvaniei sau partea nord-vestică a țării), în care fagul nu este prezent sau apare

în arborete izolate, pot fi considerate zone în care fagul a vegetat în trecut, deoarece suprafețe întinse ocupate de această specie au fost confirmate în România (Drăcea 2018), ulterior acestea fiind diminuate datorită presiunii antropice. Din dorința extinderii suprafețelor agricole și a comunităților (Urșanu et al. 2024), a nevoii de material lemnos (Reinhardt-Imjela et al. 2018) sau datorită introducerii altor specii mai valoroase (în special rășinoase) (Bouriaud et al. 2016; Knapp & Fichtner 2011; Tudoran & Zotta 2020), arboretele naturale au pierdut suprafețe însemnate. De asemenea, în aceste zone este posibil ca fagul să nu fi rezistat datorită competiției intense cu alte specii forestiere (Fărcaș et al. 2013). În același timp, în anumite situații (cum este cazul nord-estului țării), modelul supraestimează creșterile, evidențiind totodată anumite limitări generate în principal de natura datelor utilizate.

Modelul utilizat în predicții a înregistrat o performanță scăzută datorită predictorilor climatici aferenți locului de testare, care au o influență foarte redusă în explicarea variabilității Hn , ceea ce face ca această analiză să fie considerată de natură exploratorie. Însă, cu toate că aceste rezultate sunt limitate, ele se aliniază într-o mare măsură cu studiile care au urmărit aceleași obiective. Astfel, creșterile scăzute din exteriorul arcului carpatic, prognozate pentru ambele scenarii climatice, dar cu intensitate net superioară în cazul RCP 8.5, urmează aceeași direcție cu studiile care indică o sensibilitate ridicată a fagului, care va contribui la o eliminare treptată sau o fragmentare a populațiilor care vegetează la limita inferioară a arealului speciei (Dolar et al. 2023; Gessler et al. 2024; Jump et al. 2006a; Jump et al. 2006b; Roibu et al. 2022; Sánchez-Gómez & Aranda 2024). Concomitent cu acest fenomen, rezultatele prezentului studiu indică un viitor proces de migrație al speciei către zonele cu altitudini mai ridicate din Munții Carpați, fapt confirmat și de alte cercetări care prognozează o ascensiune către altitudini mai ridicate unde condițiile climatice vor putea susține creșterea speciilor forestiere (Fuchs et al. 2025; Noce et al. 2023; Pauli et al. 2012; Pavlović et al. 2019). Aceste observații au fost făcute și în cercetările din România cu privire la fag, unde s-a identificat o sensibilitate ridicată la secetă a populațiilor marginale și au fost previzionate creșteri scăzute ale acestora (Chira et al. 2003; Klesse et al. 2024; Leifsson et al. 2024). De asemenea, a fost identificată o vulnerabilitate a arboretelor de fag la schimbările climatice, caracterizate de intensificarea perioadelor de secetă, determinând astfel o migrație altitudinală a fagului (Barnoiaea 2017; Budeanu et al. 2016; Kermavnar et al. 2023). În perspectiva acestor schimbări drastice ale condițiilor climatice, Kasper et al. (2022) indică o viitoare substituție a fagului din zona Carpaților Occidentali cu alte specii mai reziliente la secetă, cum sunt cele din genul *Quercus*. Această concluzie este susținută de rezultatele prezentei cercetări, care indică o posibilă reducere a creșterilor fagului din această zonă și o concentrare a acestora în zona Carpaților Orientali.

Limitările rezultatelor obținute decurg în principal din constrângerile bazei de date, dar și din modelul utilizat. Astfel, datorită faptului că acest model consideră ca variabilă dependentă doar înălțimea arborilor, iar în cazul variabilelor de mediu nu sunt incluse date referitoare la sol sau alte aspecte caracteristice stațiunii, rezultatele sunt limitate. Aceste limitări ale modelării sunt recunoscute și în alte cercetări, care identifică complexitatea ecosistemelor forestiere ca fiind unul dintre principalele impedimente, generate de dificultatea cuantificării tuturor proceselor naturale de la nivelul acestor

ecosisteme și propun dezvoltarea unor metode integrate de studiu (Anderson-Teixeira et al. 2022; Boukhris et al. 2025).

Luând în considerare: (a) distribuția foarte extinsă a speciei *F. sylvatica* în Europa (Bohn & Gollub 2007; Leuschner & Ellenberg 2017), unde (b) vegetează în condiții diverse de mediu (Magri 2008; Von Wuehlisch 2008), (c) deține populații care prezintă particularități genetice (Ciocîrlan et al. 2017; Sánchez-Gómez & Aranda 2024; Șofletea & Curtu 2008), (d) prezintă o plasticitate fenotipică ridicată (Besliu et al. 2024b; Capdevielle-Vargas et al. 2015; Frank et al. 2017; Gárate-Escamilla et al. 2019; Vitasse et al. 2010), (e) anumite proveniențe s-au remarcat prin reziliență sporită (Dounavi et al. 2016; Meier & Leuschner 2008; Stojnić et al. 2021; Thiel et al. 2014), și (f) poate vegeta foarte bine în amestecuri cu alte specii forestiere (Pretzsch et al. 2020; Vanhellemont et al. 2019; Vannoppen et al. 2020) se poate considera că prognozele, în contextul schimbărilor climatice, ar putea fi mai optimiste. Însă, rapiditatea și gradul de intensitate al acestor modificări de mediu (Aubin et al. 2018; Boisvert-Marsh & de Blois 2021) trag un semnal de alarmă și reclamă intervenția specialiștilor în vederea implementării tehnicilor cunoscute a fi eficiente în atenuarea, pe cât posibil, a efectelor negative. Prin urmare, această metodă de modelare (*URA*) poate fi utilizată ca o tehnică de prevenție a anumitor dezechilibre ce pot fi produse de schimbările climatice, deoarece combină efectele mediului cu cele genetice, asigurând predicții ale performanței proveniențelor. Totodată, metoda permite identificarea viitoarelor zone de migrație a speciilor, dar și proveniențele optime pentru vegetarea în condiții specifice și, de asemenea, poate fi utilizată pentru selecția speciilor care ar trebui introduse în viitoarele cicluri de producție (Jump et al. 2006b; Wang et al. 2010), fiind astfel baza procesului de migrație asistată (Chakraborty et al. 2024).

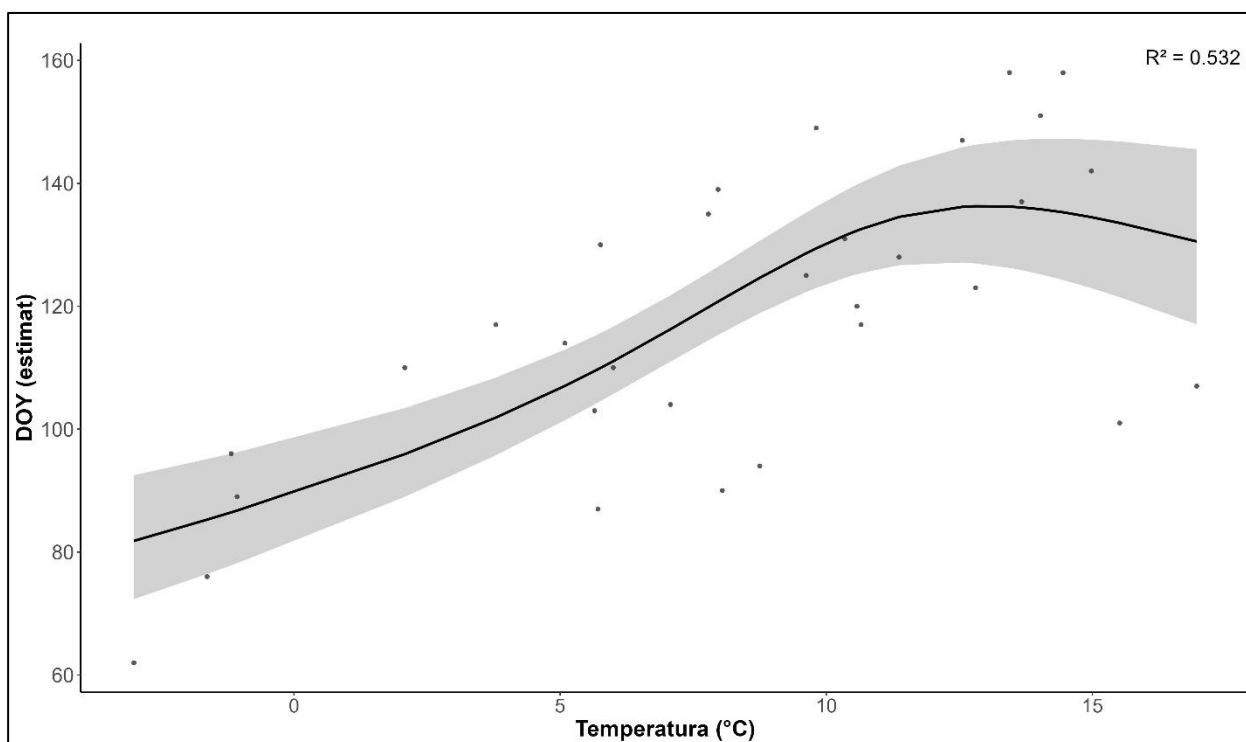
4.5. Analiza proceselor fenologice

4.5.1. Înfrunzirea

Analizele la nivelul înfrunzirii (fenologiei de primăvară) au remarcat existența variațiilor în cazul tuturor surselor testate, însă cu particularități la nivelul stadiilor fenologice. Cele mai însemnate variații au fost obținute la nivelul factorului „anul”, diferențele dintre cei trei ani analizați fiind foarte semnificative ($p < 0,0001^{****}$) în cazul tuturor stadiilor fenologice, indicând influența ridicată a variațiilor anuale ale condițiilor staționale asupra proceselor fenologice de primăvară. În privința repetițiilor, diferențe foarte semnificative ($p < 0,0001^{****}$) au fost identificate pentru clasele doi și trei, respectiv la nivelul ultimelor două stadii (șase și șapte). Cea mai slabă diferențiere a fost observată la nivelul proveniențelor, care au prezentat diferențe semnificative ($p < 0,01^{**}$) doar în cazul stadiului trei (asimilat cu intrarea propriu-zisă în vegetație) și slab semnificative ($p < 0,05^*$) în cazul stadiilor cinci și șase (asimilate cu stadiile de formare a frunzei).

Modelul aplicat a scos în evidență existența unei relații nonliniar între cele două variabile, care indică faptul că temperatura influențează puternic înfrunzirea fagului (Figura 4.23). Rezultatele arată că 53% din varianța *DOY* este explicată de temperatură. În același timp, s-a observat faptul că temperatura nu

are un efect constant asupra *DOY*, deoarece în anumite intervale (5–10 °C) o creștere mică a acesteia produce schimbări mai rapide în procesele de înfrunzire. Astfel, se constată faptul că după depășirea pragului de 5 °C proveniențele încep activitatea fiziologică. Practic, modelul indică faptul că stadiile de înfrunzire debutează mai devreme atunci când temperaturile din perioada primăverii sunt mai ridicate, dar aceste modificări nu sunt constante. Prin urmare, în anii cu un debut al înfrunzirii mai rapid, creșterea temperaturii nu mai accelerează la fel de mult acest proces, poate chiar să întârzie ușor unele stadii, comparativ cu anii în care înfrunzirea începe mai târziu, indicând faptul că procesele fenologice de primăvară au o durată constantă. În medie, stadiile de înfrunzire avansează cu 2,6 zile la fiecare +1 °C. Sensibilitatea cea mai ridicată s-a observat în ecartul de temperaturi de 5–10 °C, unde, după trecerea pragului de 5 °C, fazele înfrunzirii avansează cu aproximativ cinci zile și, aproximativ trei zile după atingerea pragului de 10 °C, la fiecare +1 °C. Pe de altă parte, acest avans este mic la temperaturi mai scăzute sau mai ridicate. Spre exemplu, la temperaturi de 15 °C avansul scade sub o zi, ceea ce sugerează faptul că fazele de final ale înfrunzirii (clasele șase și șapte), care apar la început de vară, nu sunt atât de dependente de temperatură cum sunt cele de început (clasele trei și patru), iar factorii care condiționează aceste procese pot fi precipitațiile, intensitatea luminii etc.



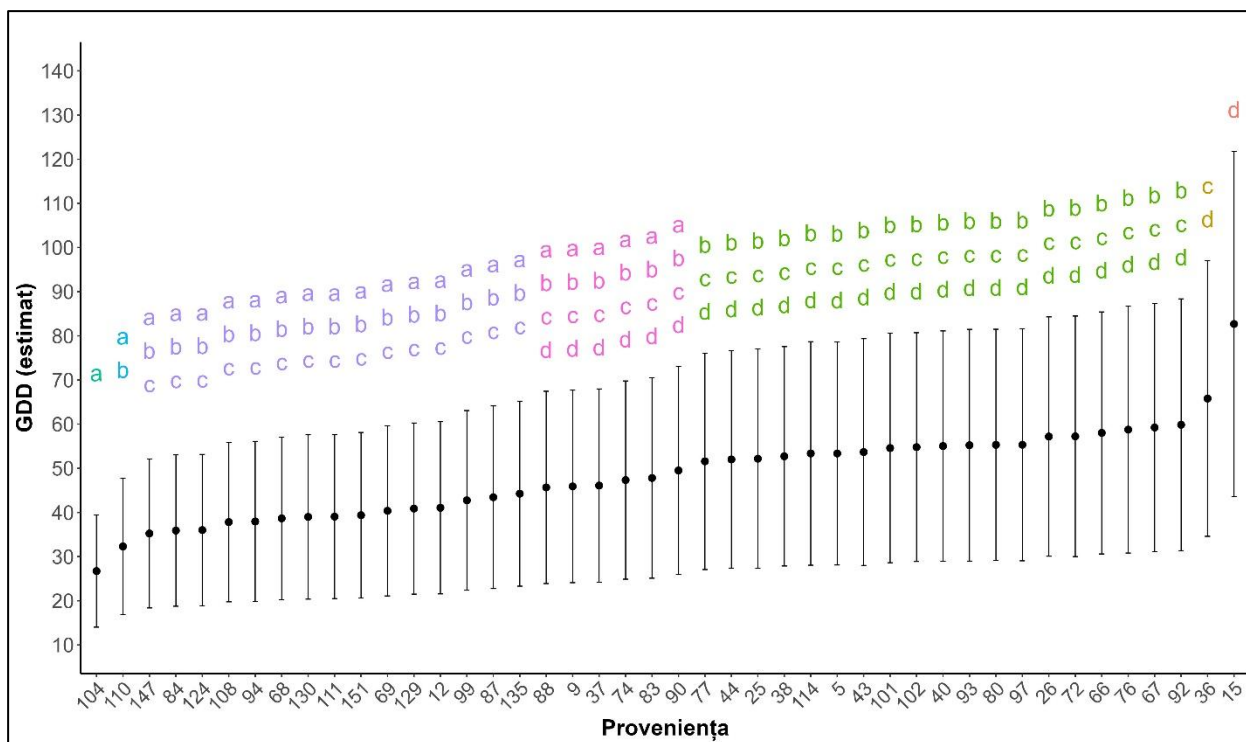
În partea dreaptă a diagramei este reprezentat rezultatul variabilității explicate de model ($R^2 > 0,5$ - semnificație ridicată)

Figura 4.23. Interacțiunea dintre ziua anului (DOY) și temperatura.

Pentru analiza condițiilor de temperatură necesare proveniențelor în vederea debutului procesului de înfrunzire, a fost aplicat un model nonliniar, în care a fost testată variația proveniențelor în funcție de cumulul *GDD*, în calculul căruia temperatura de bază a fost setată la 5 °C. Ecartul *GDD*, în care proveniențele testate intră în vegetație, este cuprins între 27 și 83 *GDD*, ceea ce indică existența unor diferențe semnificative între proveniențe. Prin urmare, estimarea intrării în vegetație diferă între cea

mai precoce și cea mai tardivă proveniență cu aproximativ 11 zile, în care temperatura medie este de 10 °C (56 GDD). În medie, intrarea în vegetație are loc la atingerea pragului cerințelor termice (GDD) de 53 de unități, la nivelul căruia începe deschiderea mugurilor pentru 50% dintre proveniențe. Acest rezultat expus în *DOY* anticipează o intrare în vegetație în jurul datei de 23 aprilie.

Potrivit rezultatelor obținute (Figura 4.24), cea mai precoce proveniență este 95-Ge-104, urmată de 95-Ch-110, ambele originare din partea centrală a Europei. La popul opus, cea mai tardivă proveniență este 95-Fr-15, din estul Franței, respectiv 95-Ge-36, transferată din nordul Germaniei. Proveniența de referință pentru deschiderea mugurilor este 95-Sp-05, originară din Spania, care necesită un prag de 53 GDD pentru acest stadiu fenologic, asimilat în același timp cu pragul mediu de intrare în vegetație. Celelalte proveniențe au fost asociate în trei grupuri. Din grupul mai precoce (proveniențele 95-Ro-147 - 95-Sk-135) fac parte și cele două proveniențe românești, originare din Sovata (95-Ro-151) și Remeți (95-Ro-147), care au avut o reacție similară în privința intrării în vegetație. Majoritatea proveniențelor au fost transferate din Germania, însă nu a fost identificat un trend specific în legătură cu intrarea în vegetație.



Punctele negre reprezintă media GDD. Liniile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard, iar literele poziționate deasupra acestor bare reprezintă rezultatele obținute în urma aplicării metodei Holm la nivelul valorii *p* obținute din model. Grupurile omogene sunt marcate prin aceleași litere și culori;

Figura 4.24. Influența factorului grade-zile de creștere (GDD) asupra momentului de intrare în vegetație (muguri deschiși) a proveniențelor.

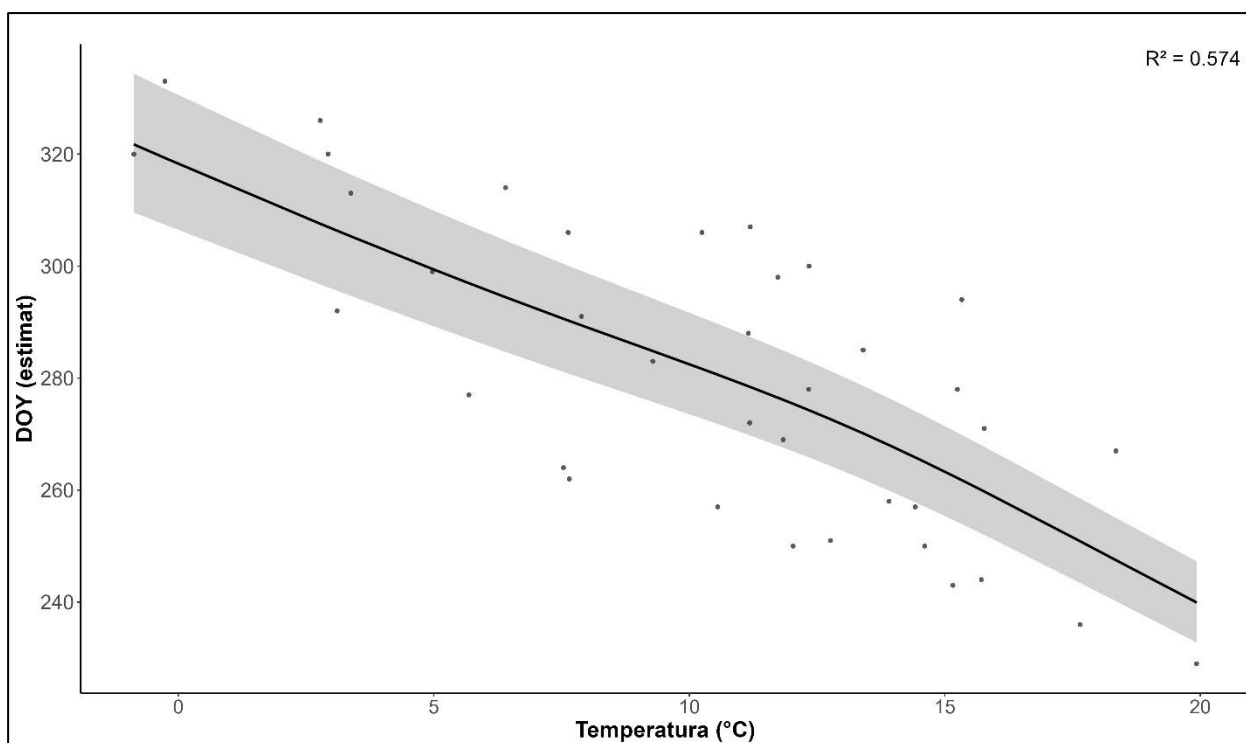
Privind în ansamblu, diferențierea la nivelul proveniențelor a fost mai intensă în prima parte a procesului de înfrunzire (clasele doi și trei), asimilată și cu un decalaj multianual care a crescut chiar până la nivelul clasei cinci, urmând o descreștere rapidă spre finalul înfrunzirii. Așadar, se constată o omogenizare a

reacției proveniențelor la finalul fenologiei de primăvară, în procesul căreia temperatura nu mai este factorul principal. Prin urmare, departajarea corectă la nivelul proveniențelor poate fi realizată doar la nivelul stadiului muguri deschiși (clasa trei), fiind și un punct cheie, care marchează intrarea în vegetație a fagului, și indicând, în același timp, nivelul de adaptare al proveniențelor la condițiile locale de mediu.

4.5.2. Senescența

Procesele corespunzătoare senescenței au prezentat variații ridicate pentru toate sursele testate și la nivelul tuturor stadiilor, cu excepția provenienței, în cazul clasei a cincea. Anul a fost identificat ca având cea mai ridicată variație ($p < 0,0001^{****}$), care a fost constantă ca semnificație în cazul tuturor stadiilor, evidențiind influența pregnantă a condițiilor climatice anuale, ale căror variații conduc la decalarea senescenței. La nivelul repetiției, diferențele au fost semnificative pentru toate stadiile, însă pentru stadiul de îngălbenire 5% s-a înregistrat o variație scăzută ($p < 0,05^*$), indicând o mai slabă diferențiere în debutul senescenței față de celelalte stadii ale acestui proces. În privința provenienței, diferențele au fost foarte semnificative ($p < 0,0001^{****}$) pentru primele patru stadii, ceea ce indică existența unei variații ridicate între proveniențele testate. În cazul ultimului stadiu (port de iarnă), diferențierea dintre proveniențe nu a fost semnificativă, indicând omogenizarea reacției proveniențelor, ceea ce sugerează o posibilă influență a altor factori de mediu în atingerea acestei clase, nu doar a temperaturii.

Analiza interacțiunii dintre *DOY* și temperatură a reliefat existența aceluiași trend nonliniar pentru senescență, similar celui obținut pentru înfrunzire (Figura 4.25). Modelul aplicat explică peste 57% din variația *DOY*, ceea ce se traduce prin semnificație ridicată, în timp ce restul variației poate fi atribuită altor factori de mediu, care nu au fost analizați în acest studiu. Prin urmare, temperatura este principalul factor ce condiționează procesele corespunzătoare senescenței în cazul proveniențelor de fag testate în cultura Săcele, dar evoluția acestui proces nu este liniară în relație cu scăderea temperaturii, indicând anumite decalaje ale procesului la temperaturi intermediare (ecartul 10-15 °C). De asemenea, influența anului a fost semnificativă ($p=0,001^{***}$), cu o corelație negativă între aceștia (-0,62), indicând faptul că, în anii în care senescența începe mai rapid, sensibilitatea față de temperatură este mai redusă, dar sensibilitatea față de temperatură este mai ridicată în cazul anilor în care senescența este mai târzie. În medie, senescența avansează cu aproximativ patru zile calendaristice (*DOY*) la fiecare -1 °C înregistrat, iar trendul nonliniar sugerează că avansul este puțin mai ridicat în ecartul temperaturilor 10–15 °C, corespunzător stadiului asimilat cu debutul senescenței (îngălbenire 50%).



În partea dreaptă a diagramei este reprezentat rezultatul variabilității explicate de model ($R^2 > 0,5$ - semnificație ridicată)

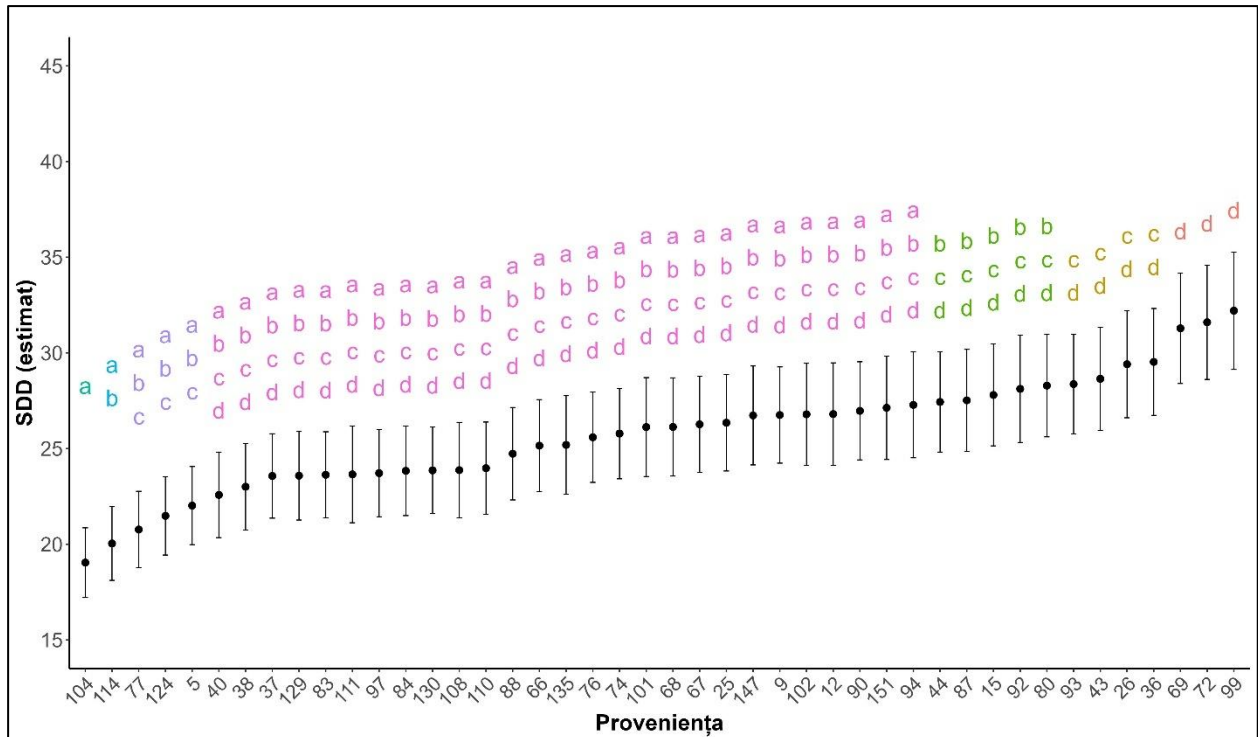
Figura 4.25. Interacțiunea dintre ziua anului (DOY) și temperatură.

Stadiul definitoriu al senescentei este considerat debutul acesteia, care marchează ieșirea din vegetație. În cadrul acestui studiu, momentul ieșirii din vegetație a fost asimilat cu stadiul îngălbenire 50% (clasa a treia), fapt pentru care analizele la nivel de proveniență s-au concentrat pe acesta.

În vederea identificării cerințelor termice necesare fiecărei proveniențe pentru debutul senescentei, a fost utilizat un model nonliniar bazat pe influența SDD (zile grade de senescentă). Pentru calculul SDD, temperatura de bază a fost setată la 15 °C. Astfel, s-a observat că SDD este un indicator stabil al senescentei; variațiile anuale sunt mai mici comparativ cu variațiile generate de proveniență, evidențind astfel o importanță mai mare a diferențierii genetice în definirea necesarului termic al populațiilor de fag testate în cultura Săcele. În medie, debutul senescentei are loc după acumularea a 26 de SDD, valoare ce s-a dovedit stabilă între anii analizați, ceea ce se traduce prin aproximativ cinci zile calendaristice în care temperatura medie scade la nivelul de 10 °C sau în jur de 26 de zile cu temperaturi medii de 15 °C. Acest moment este estimat pentru ziua 265 (DOY), adică data de 21 septembrie, la nivelul căreia senescenta debutează la jumătate dintre proveniențele testate. Ecartul SDD, în care are loc debutul senescentei la proveniențele testate, este cuprins între 19 și 32 SDD, ceea ce înseamnă că cea mai tardivă proveniență necesită cu 68% mai multă forțare termică (răcire) decât cea mai precoce. Acest lucru evidențiază o diferență de aproximativ trei zile cu temperaturi de 10 °C.

La nivelul culturii Săcele (Figura 4.26) s-a identificat proveniența 95-Ge-104 ca fiind cea mai precoce, urmată de proveniența poloneză 95-PI-114, la o diferență mică (doar +1 SDD). De cealaltă parte, cele mai tardive proveniențe au fost 95-Ge-99 și 95-Ge-72, originare din sudul și centrul Germaniei. Proveniențele de referință, ale căror debut în senescentă este identificat cu media experimentului (26

SDD), sunt 95-Ge-101 și 95-Ge-68, din sudul și centrul Germaniei. Majoritatea proveniențelor aparțin grupului din centru (95-Ge-40 și 95-Ge-94), poziționat în jurul proveniențelor de referință. Din acest grup fac parte și proveniențele românești originare din Sovata (95-Ro-151) și Remeți (95-Ro-147), care necesită un cumul de 27 *SDD* pentru debutul senescentei.



Punctele negre reprezintă media SDD. Liniile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard, iar literele poziționate deasupra acestor bare reprezintă rezultatele obținute în urma aplicării metodei Holm la nivelul valorii p obținute din model. Grupurile omogene sunt marcate prin aceleași litere și culori.

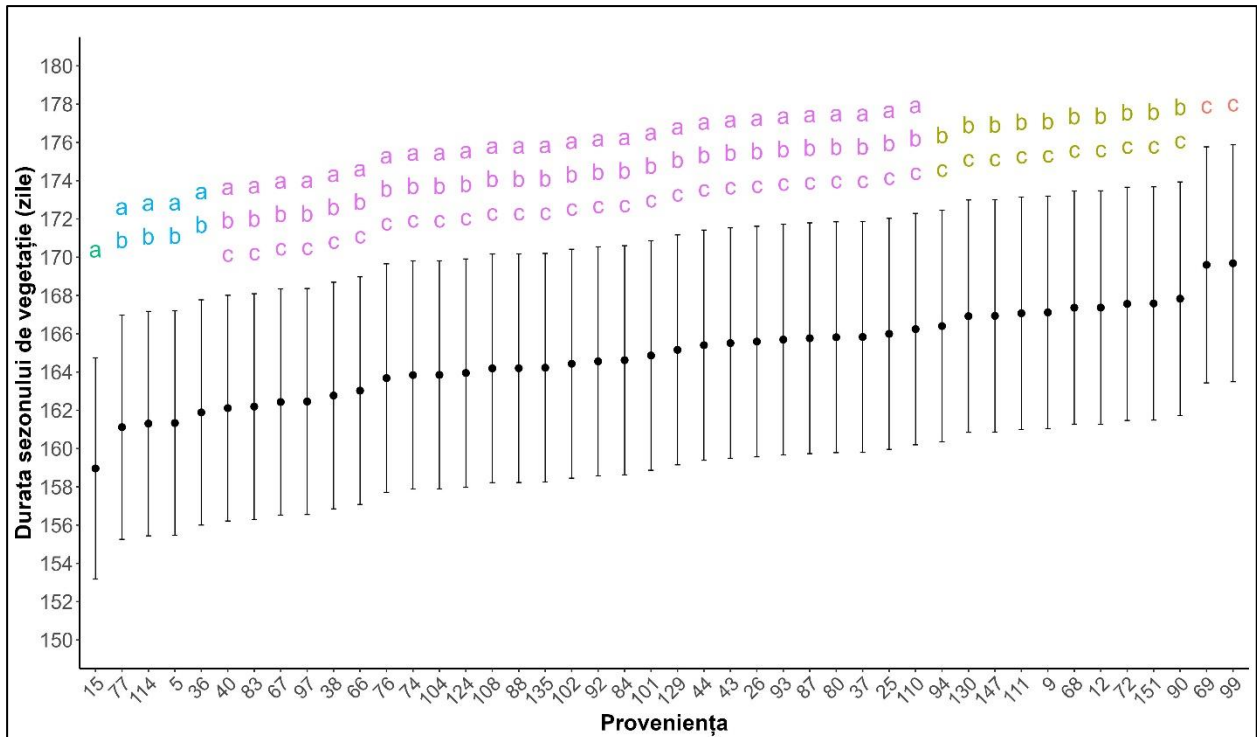
Figura 4.26. Influența factorului grade-zile de senescentă (*SDD*) asupra momentului de ieșire din vegetație (îngălbenire 50%) a proveniențelor.

4.5.3. Durata sezonului de vegetație

În vederea obținerii valorilor pentru sezonul de vegetație, s-a efectuat diferența dintre ziua (DOY) care marchează momentul pornirii în vegetație (muguri deschiși) și ziua ieșirii din vegetație (îngălbenire 50%) pentru fiecare arbore analizat. Ulterior, analiza datelor s-a efectuat prin aplicarea modelului nonliniar.

Potrivit rezultatelor obținute, media sezonului de vegetație însumează 162 de zile, aceasta fiind influențată de variațiile anuale, dar mai ales de efectul provenienței, vizibil la nivelul fiecărui an. Diferențele dintre lungimea sezonului de vegetație însumează 12 zile calendaristice (Figura 4.27). Aceste diferențe sunt mai vizibile între grupurile aflate la extreme. Cel mai scurt sezon de vegetație a fost identificat la proveniența franceză 95-Fr-15, care a înregistrat un sezon de vegetație mai redus cu aproximativ trei zile față de medie. Proveniențele germane 95-Ge-69 și 95-Ge-99 au înregistrat cel mai lung sezon de vegetație, cu mai mult de opt zile peste media experimentului. În mod similar analizelor asupra intrării și ieșirii din vegetație, și în acest caz există un grup majoritar de proveniențe

al căror sezon de vegetație este similar ca lungime (95-Ge-40 - 95-Ch-110). Proveniențele autohtone (95-Ro-147 și 95-Ro-151) s-au poziționat în grupul (95-Ge-94 - 95-Ge-90), adică al celor cu sezon de vegetație semnificativ mai lung (aproximativ șase zile mai lung decât media), apropiat de proveniențele cu cel mai lung sezon de vegetație.



Punctele negre reprezintă media sezonului de vegetație. Liniile negre poziționate deasupra barelor diagramei reprezintă valorile erorii standard, iar literele poziționate deasupra acestor bare reprezintă rezultatele obținute în urma aplicării metodei Holm la nivelul valorii p obținute din model. Grupurile omogene sunt marcate prin aceleași litere și culori.

Figura 4.27. Durata sezonului de vegetație la nivelul proveniențelor testate.

4.5.4. Discuții

Procesele fenologice de primăvară (înfrunzire) și toamnă (senescentă) sunt considerate a fi parte a factorilor determinați ai distribuției speciilor forestiere și implicit ai productivității acestora (Chuine 2010; Chuine & Beaubien 2001), iar temperatura este cunoscută a fi principalul factor stațional care condiționează aceste procese (Chuine & Cour 1999). Dat fiind trendul actual al schimbărilor de mediu, care afectează durata sezonului de vegetație (Corona et al. 2010), speciile forestiere sunt forțate să se adapteze noilor condiții prin reglarea activității fiziologice (Aitken et al. 2008; Badeck et al. 2004; Ciocîrlan et al. 2022). Prin urmare, cercetările în această direcție au o deosebită importanță deoarece pot evidenția cerințele diferitelor populații de arbori cu privire la perioada de vegetație, absolut necesare în procesele de migrație asistată sau de identificare și promovare a proveniențelor cu potențial adaptativ ridicat (Vitasse et al. 2009a).

Analizele efectuate în cadrul prezentului studiu au urmărit cuantificarea influențelor condițiilor staționale asupra proveniențelor de fag testate în cultura Săcele, respectiv identificarea diferențelor la

nivelul proveniențelor cu privire la momentul debutului înfrunzirii, al senescentei și, implicit, al duratei sezonului de vegetație. În aceste interpretări, temperatura a fost factorul utilizat pentru determinarea tendințelor fenologice ale proveniențelor, fiind, în general, factorul principal de mediu utilizat în numeroase studii fenologice la nivelul speciei *F. sylvatica* (Ciocîrlan et al. 2024; Ciocîrlan et al. 2022; Kramer et al. 2017; Vitasse et al. 2010; Vitasse et al. 2009a).

Testarea variabilității a evidențiat existența unor diferențe anuale ridicate atât pentru înfrunzire, cât și pentru senescentă, ceea ce indică influența directă a variațiilor temperaturilor anuale asupra proceselor fenologice ale fagului, fapt cunoscut și prezentat la nivel general în studiile de referință (Badeck et al. 2004; Chuine & Cour 1999; Delpierre et al. 2016; Vitasse et al. 2009a). Un alt factor cu o implicare foarte semnificativă a fost repetiția, justificând astfel condiționările produse de variațiile micromediului asupra proceselor fenologice. Această implicație a micromediului în diferențierea reacției proveniențelor a fost observată și de Besliu et al. (2022) la nivelul unei culturi comparative de molid. Un alt factor, deosebit de important în aceste analize, a fost proveniența. În acest caz, s-au observat diferențe semnificative la nivelul stadiilor de debut ale înfrunzirii și senescentei, indicând existența controlului genetic asupra proceselor fenologice, confirmate și de alte studii similare în culturile de proveniențe de fag (Gömöry & Paule 2011; Robson et al. 2013). Prin urmare, selectarea unor proveniențe adaptate la condițiile locale de vegetație este fezabilă și, în același timp, necesară (Von Wuehlich et al. 1995). Cu toate acestea, efectul provenienței a fost mai scăzut comparativ cu cel al anului sau al repetiției, ceea ce poate fi considerat un indiciu al influenței mai decisive a condițiilor locului de testare față de originea genetică în procesele fenologice ale proveniențelor. Această concluzie a fost reiterată anterior de Schueler & Liesebach (2015), care au analizat procesele fenologice ale proveniențelor internaționale de fag instalate în două culturi din Germania și Austria, în aceeași serie din care face parte și cultura Săcele.

Modelul aplicat în cazul fenologiei a identificat un efect nonliniar al temperaturii asupra stadiilor fenologice, ceea ce explică faptul că, la temperaturi mai ridicate, debutul fenologic este mai rapid, dar, în același timp, durata întregului proces poate fi încetinită, ajungând astfel să fie constantă între anii cu debut fenologic precoce sau tardiv. De asemenea, ritmul de avans al fenologiei a fost de 2,6 zile la fiecare +1 °C, cu o sensibilitate mai mare în ecartul de temperaturi de 5–10 °C, iar pentru fazele corespunzătoare definirii formei finale a frunzei, temperatura nu a fost factorul principal care a condiționat acest proces. Aceste rezultate sunt susținute de concluziile desprinse și în alte cercetări care au punctat influența temperaturii în decalajul fenologiei și efectul nonliniar al acesteia, dar și influența altor factori precum fotoperioada în procesele fenologice (Bigler & Vitasse 2019; Menzel et al. 2006; Vitasse & Basler 2013). Avansul fenologiei este considerat a fi în medie între două și trei zile la fiecare +1 °C (Jochner et al. 2016; Vitasse et al. 2009b), rezultatele obținute fiind, așadar, în acord cu aceste valori.

Temperatura medie pentru momentul deschiderii mugurilor înregistrată în cei trei ani de observații a fost de 10 °C. Necesarul termic pentru intrarea în vegetație a 50% din proveniențele de fag analizate a fost în medie de 53 *GDD*, echivalentul a aproximativ 10,5 zile cu temperaturi medii de 10 °C, iar

diferențele dintre proveniența cea mai precoce și cea mai tardivă au însumat 11 zile. Pragul termic la care fagul din zona carpatică a României pornește în vegetație este considerat a fi 10 °C (Popescu & Șofletea 2020), iar necesarul termic determinat de Ciocîrlan et al. (2022), într-un studiu al fenologiei fagului în zona limitrofă a culturii Săcele, a fost de 60 GDD, acumulate cu șapte zile înaintea momentului intrării în vegetație, rezultat foarte apropiat de cel obținut în prezentul studiu. De asemenea, Ciocîrlan et al. (2024) remarcă existența unui decalaj de 15 zile între populațiile de fag analizate, ceea ce este similar cu decalajul identificat pentru proveniențele aflate la extreme în cultura Săcele, susținând astfel diferențierea largă dintre proveniențe, care este comparabilă cu diferența dintre populațiile situate la limitele altitudinale ale distribuției speciei.

Proveniențele selectate pentru cea mai precoce intrare în vegetație și, implicit, pentru sensibilitate termică mai ridicată au fost 95-Ge-104 și 95-Ch-110, originare din partea centrală a Europei. Selecția pentru cele mai tardive proveniențe, ce necesită o forțare termică (încălzire) mai intensă și pentru o perioadă mai lungă, a cuprins proveniențele 95-Fr-15 și 95-Ge-36, transferate din estul Franței și nordul Germaniei. Similar acestor rezultate, Horváth (2016) a inclus proveniențele de fag din centrul Europei în categoria celor cu pornire în vegetație mai rapidă. Reacția tardivă a unei proveniențe franceze a fost evidențiată și într-un studiu efectuat pe baza datelor privind pornirea în vegetație, într-o cultură de proveniențe internaționale de fag din Croația (Jazbec et al. 2007).

Trendul nonlinear al temperaturii a fost identificat și în cazul senescentei, iar efectul acesteia a fost și de această dată foarte semnificativ, indicând avansarea senescentei odată cu scăderea temperaturii. De asemenea, s-a observat că în anii în care senescenta începe mai rapid, sensibilitatea față de temperatură este mai redusă, dar această sensibilitate este mai ridicată în cazul anilor în care senescenta este mai târzie. Ritmul de avans al senescentei a fost în medie de patru zile la fiecare -1 °C înregistrat, cu un avans mai rapid în ecartul temperaturilor de 10–15 °C. Studiile referitoare la senescenta acestei specii au punctat, de asemenea, condiționarea acestui proces de temperatură, care este principalul factor ce produce decalaje multianuale de până la șase zile la fiecare -1 °C (Ciocîrlan et al. 2022; Fu et al. 2018; Vitasse et al. 2011).

În decursul anilor de observații, temperatura medie corespunzătoare clasei trei de senescentă (îngălbenire 50%) a fost de 11 °C, iar necesarul termic pentru declanșarea procesului a însumat 26 SDD, ceea ce reprezintă o răcire a temperaturii medii până la 10 °C timp de aproximativ cinci zile. Decalajul observat între cea mai precoce și cea mai tardivă proveniență a fost de 10 zile, iar necesarul de răcire a însumat 13 SDD, ceea ce înseamnă că cea mai tardivă proveniență necesită cu 68% mai multă forțare termică (răcire) decât cea mai precoce.

Analizele efectuate au permis identificarea proveniențelor cu o sensibilitate mai ridicată la scăderea temperaturii. Acestea au fost 95-Ge-104 și 95-Pl-114, originare din sud-estul Germaniei și Poloniei, care au prezentat cel mai rapid debut al senescentei. Proveniența 95-Ge-104 a fost identificată ca fiind cea mai precoce atât pentru intrarea în vegetație (deschiderea mugurilor), cât și pentru finalul sezonului de vegetație (îngălbenire 50%), ceea ce indică sensibilitatea climatică ridicată a acesteia. La popul opus, proveniențele 95-Ge-99 și 95-Ge-72 transferate din sudul și centrul Germaniei au manifestat o nevoie

mai ridicată de forțare termică (răcire), fiind astfel selectate pentru cel mai tardiv debut al ieșirii din vegetație. În urma testării senescenței într-o cultură de proveniențe de fag din Polonia, Chmura & Rozkowski (2002) au observat că proveniențele din estul și sudul țării au un debut al senescenței mai rapid decât celelalte proveniențe testate, iar Petkova et al. (2017) au identificat faptul că o proveniență din sudul Germaniei, testată într-o cultură comparativă din Bulgaria, a înregistrat cel mai rapid început al îngălbenirii frunzelor. Aceste concluzii susțin selecția provenienței germane și a celei poloneze, din cultura Săcele, pentru reacția precoce la ieșirea din vegetație.

În urma identificării proveniențelor cu reacții diferite în privința intrării și ieșirii din vegetație, se recomandă o atenție sporită la utilizarea acestora pentru introducerea în lucrările de regenerare artificială, deoarece pot fi afectate de înghețurile târzii și timpurii (Chmura & Rozkowski 2002; Gömöry & Paule 2011; Robson et al. 2011). Astfel, transferul materialului forestier de reproducere trebuie efectuat numai după o identificare corectă a proveniențelor care se încadrează în regimul termic local (Konnert et al. 2015).

Sezonul de vegetație a avut în medie o durată de 162 de zile, cu o diferență între proveniențele situate la extreme de 12 zile. Similar, Bigler & Vitasse (2019) au identificat o medie a sezonului de vegetație de aproximativ 149 de zile cu o variație de 12 zile în timpul celor 26 de ani analizați. Proveniența franceză 95-Fr-15 a înregistrat cel mai scurt sezon de vegetație, cu o durată mai mică cu trei zile față de medie, aceasta fiind selectată și pentru cea mai târzie intrare în vegetație. Un sezon de vegetație mai lung cu opt zile față de medie au obținut proveniențele germane 95-Ge-69 și 95-Ge-99, fiind incluse în grupul proveniențelor cu cea mai lungă perioadă de vegetație. Aceste proveniențe au fost incluse în topul celor mai performante proveniențe pentru caracteristicile de creștere din cultura Săcele (Besliu et al. 2024c), confirmându-se astfel influența pozitivă a duratei perioadei de creștere asupra performanțelor de creștere ale proveniențelor de fag (Gömöry & Paule 2011; Prislán et al. 2019).

4.6. Analiza anatomică a lemnului

4.6.1. Evaluarea creșterilor

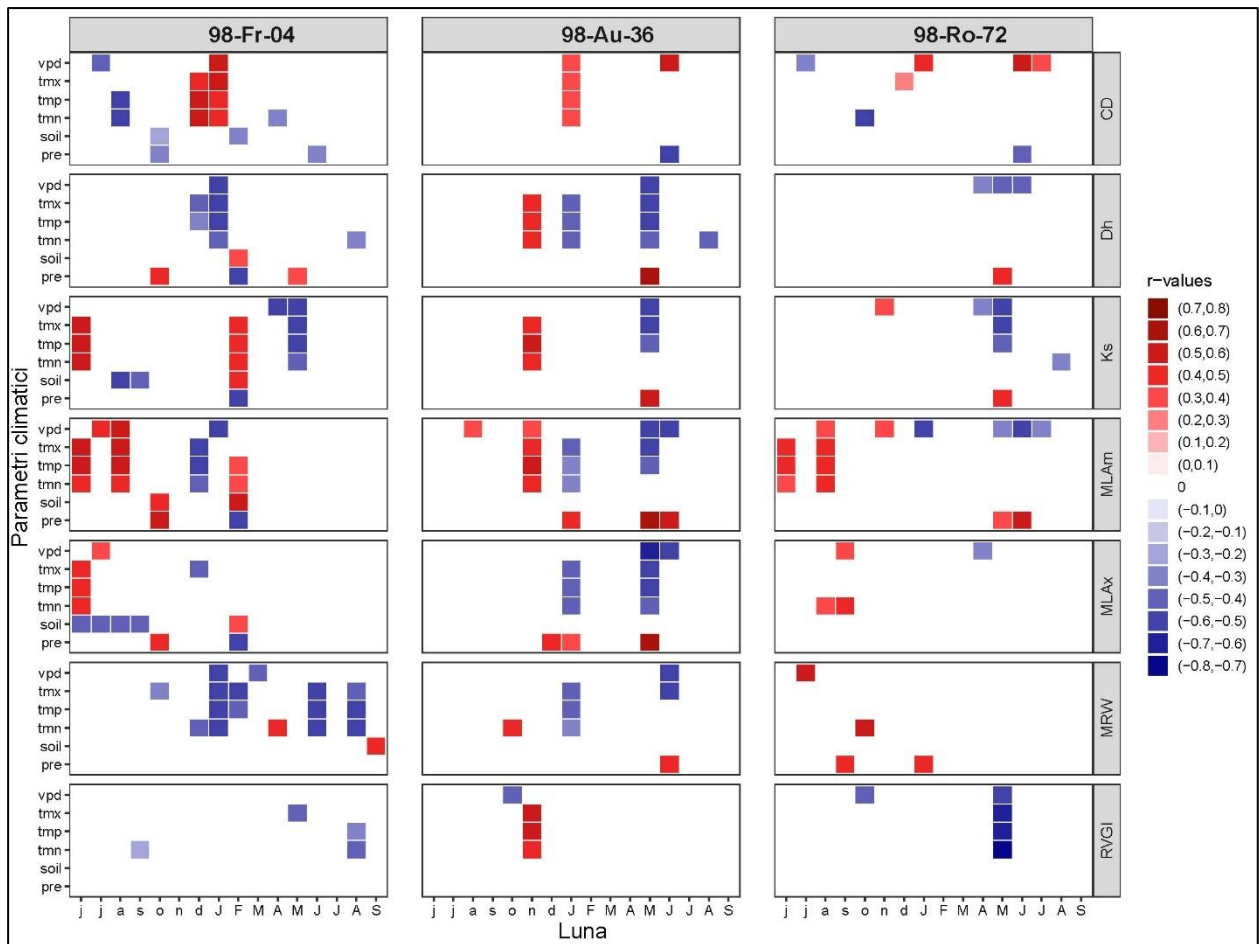
Variațiile creșterii medii (*MRW*) sunt influențate într-o proporție de peste 56% de către efectul anului. Acest fapt indică, în principal, impactul decisiv al variațiilor climatice interanuale asupra creșterilor. Variațiile generate de arborii din cadrul proveniențelor însumează aproximativ 9% din varianța totală. Prin urmare, în cadrul aceleiași proveniențe există o oarecare diferențiere în raport cu creșterea. Însă repetiția nu are niciun efect asupra creșterilor, ceea ce indică o omogenitate ridicată a condițiilor de micromediu din cultura Fântânele. În cazul ariei medii a lumenului (*MLA*), nivelul de variație diferă de cel al *MRW*. De această dată, variația la nivelul arborilor este mult mai ridicată, indicând o constanță a dimensiunii lumenului între ani, ce sugerează și un control genetic poligenic asupra acestui caracter anatomic al lemnului, manifestat în interiorul proveniențelor. Cu toate acestea, aproape 45% din variație este explicată de an, evidențiind interdependența lumenului față de variațiile climatice. Repetiția nu contribuie, nici de această dată, la variațiile lumenului, susținând totodată omogenitatea condițiilor

staționale. De menționat este valoarea reziduală mai scăzută a variației, ceea ce indică o acoperire mai bună a modelului față de cel aplicat în cazul *MRW*.

Analiza *MRW* pentru perioada de testare indică o reacție similară a celor trei proveniențe. Proveniențele au fost organizate în același grup, ceea ce indică faptul că diferențele nu sunt semnificative din punct de vedere statistic. În privința *MLA*, rezultatele sunt similare cu cele obținute pentru *MRW*. Cu toate acestea, diferențierea între proveniențele 98-Ro-72 și 98-Fr-04 se apropie de pragul de semnificație ($p = 0,057$), indicând o reacție diferită în cazul dimensiunii lumenului.

4.6.2. Relația dintre climat și parametrii anatomici

Din analiza corelațiilor dintre climă și parametri anatomici (Figura 4.28), s-a identificat un răspuns divers al proveniențelor, care indică strategii diferite de reacție, iar creșterea (*MRW*) s-a dovedit a fi mai puțin sensibilă la variațiile climatului, în comparație cu ceilalți parametri. De asemenea, indicele de grupare a vaselor (*RVG*) nu a manifestat o relație clară în raport cu climatul. Proveniența 98-Fr-04 este influențată în principal de climatul din sezonul de vegetație precedent (iunie-octombrie), dar și de începutul sezonului de vegetație din anul curent (martie-mai). În ansamblu, corelațiile strânse cu *vpd* și temperaturile din anul precedent (atât negative, cât și pozitive) indică existența unei sensibilități la stresul hidric și atmosferic din anul trecut. Astfel, în cazul unui an precedent secetos, activitatea anatomică din anul curent este influențată negativ, indiferent de condițiile din anul curent, datorită unei strategii conservative, bazate pe memorie, care presupune o reducere bruscă a dimensiunii vaselor și a conductanței hidraulice. În cazul provenienței alpine (98-Au-36), relația climat-parametri anatomici nu a evidențiat o reacție influențată de clima din anul precedent. Reacția provenienței este determinată exclusiv de climatul din anul curent, la nivelul căruia s-au identificat corelații cu *pre*, *vpd* și temperaturile. Prin urmare, strategia este una bazată pe creșteri și dimensiuni ale vaselor constante în timp, fără un control generat de extremele climatice, ceea ce asigură o continuitate a performanței indiferent de condițiile climatice. Proveniența autohtonă (98-Ro-72) se remarcă prin influențe ale climatului atât din anul precedent, cât și din anul curent. Climatul din sezonul de vegetație precedent (iunie-octombrie) influențează parametrii anatomici (*MLAm*, *MLAx*), prin urmare, condiționează formarea xilemului, dar nu foarte vizibil creșterea (*MRW*). Această influență este controlată de temperaturi și *vpd*, care setează o reacție pentru următorul an. De asemenea, pentru *vpd*, temperaturi și *pre* au fost identificate corelații cu parametrii anatomici și la nivelul anului curent. Astfel, un sezon de vegetație anterior mai cald (nu limitativ hidric) influențează producerea unor vase mai mari în anul curent. Prin urmare, această proveniență utilizează resursele acumulate anterior pentru a dezvolta un sistem hidraulic mai eficient în anul curent, dar reacția acesteia nu depinde doar de memorie, ci și de o reglare a activității fiziologice determinată de condițiile climatice din anul în curs.

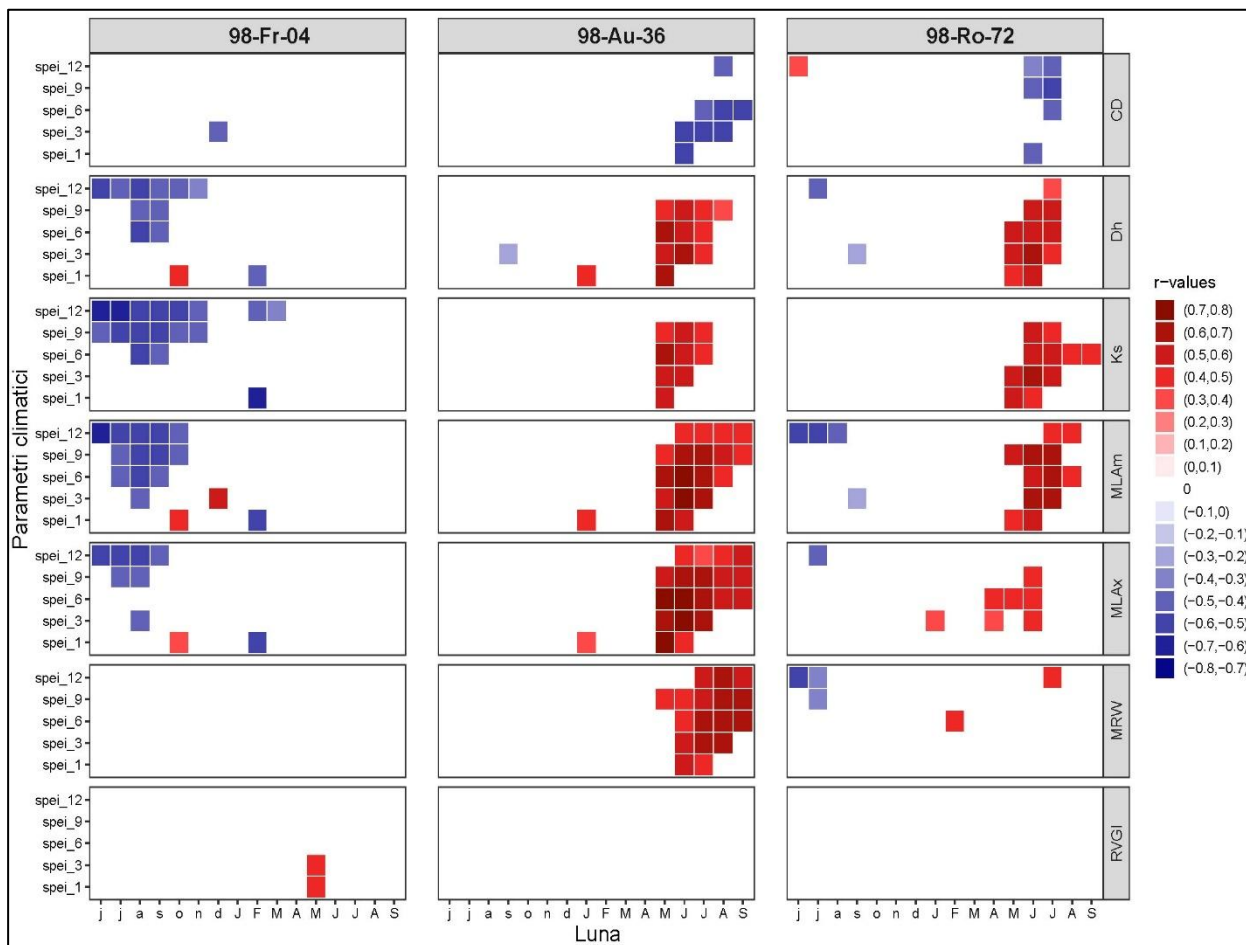


r – valoarea corelației dintre parametri anatomici: CD – Densitatea celulelor; Dh – Media diametrului hidraulic; Ks – Conductanța hidraulică; MLAm – Media minimă a ariei lumenului; MLAx – Media maximă a ariei lumenului; MRW – Media creșterilor anuale; RVGI – Indicele de grupare a vaselor; și parametri climatici: vpd – Deficitul de presiune a vaporilor de apă; tmx – Temperatura maximă; tmp – Temperatura medie; tmin – Temperatura minimă; soil – Indicele de umiditate a solului; pre – Precipitațiile medii. Lunile anului sunt notate cu litere mici pentru anul precedent și majuscule pentru anul curent.

Figura 4.28. Corelațiile dintre climat și parametri anatomici.

Analiza relației dintre *SPEI* și parametri anatomici (Figura 4.29) reliefează mai concret comportamentul proveniențelor sub acțiunea secetei sau a anilor cu precipitații mai ridicate. Proveniența originară din Franța (98-Fr-04) prezintă corelații negative, cu precădere între *SPEI* 6-12 și parametrii definitorii ai xilemului (Dh, Ks, MLA), doar pentru anul precedent. Prin urmare, se confirmă strategia acestei proveniențe de a reacționa prin reducerea bruscă a dimensiunii vaselor și a conductivității hidraulice la stresul hidric din anul precedent. Pentru anul curent, lipsa corelațiilor indică evitarea unui răspuns în timp real și, mai concret, reacția este generată de semnalul înregistrat în anul precedent. În cazul provenienței 98-Au-36, absența corelațiilor cu anul precedent arată lipsa efectului memoriei climatice asupra reacției din anul curent. Prin urmare, reacția acestei proveniențe este condiționată exclusiv de anul curent, la nivelul căruia au fost identificate corelații pozitive puternice pentru parametrii xilemului (Dh, Ks, MLAm, MLAx), dar și pentru creștere, fiind singura proveniență cu corelații la nivelul creșterilor. În cazul provenienței 98-Ro-72, analiza corelațiilor cu indicele *SPEI* indică un semnal climatic atât din anul precedent, cât și din cel curent. Corelații negative din anul precedent indică o reducere a dimensiunilor vaselor și a creșterilor, coroborată cu o pornire prudentă în anul următor. În schimb,

corelații pozitive din anul curent susțin faptul că atunci când semnalul climatic este favorabil, proveniența răspunde prin creșterea activității fiziologice.

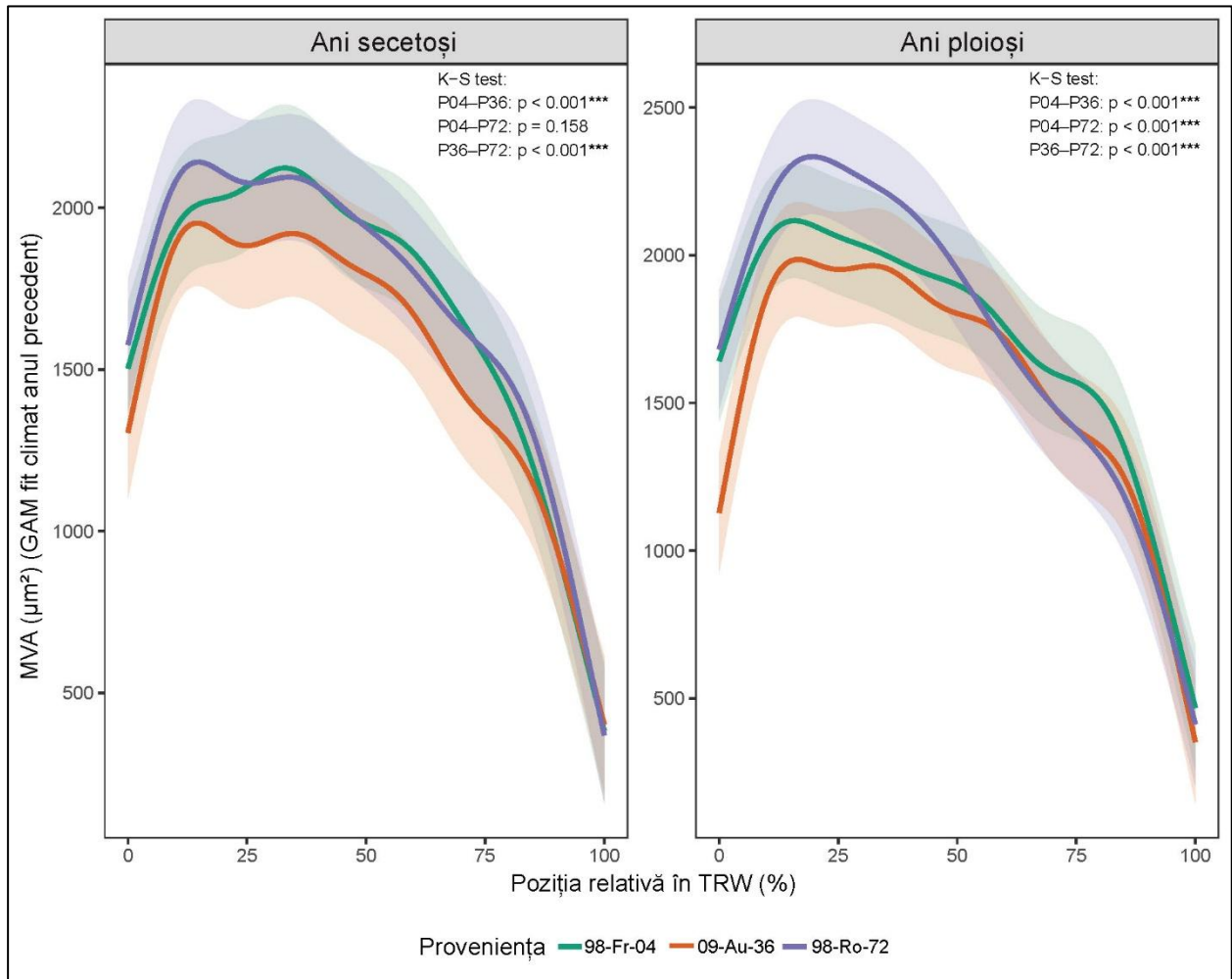


r – valoarea corelației dintre parametri anatomici: CD – Densitatea celulelor; Dh – Media diametrului hidraulic; Ks – Conductanța hidraulică; MLAm – Media minimă a ariei lumenului; MLAx – Media maximă a ariei lumenului; MRW – Media creșterilor anuale; RVGI – Indicele de grupare a vaselor; și parametri climatici: Spei 1-12 – Indicele standardizat de evapotranspirație. Lunile anului sunt notate cu litere mici pentru anul precedent și majuscule pentru anul curent.

Figura 4.29. Corelațiile dintre indicele standardizat de evapotranspirație și parametri anatomici.

Evaluarea anilor precedenți, separat pentru anii identificați ca fiind secetoși (2003, 2007, 2015), respectiv pentru cei cu precipitații abundente (2005, 2010, 2014), indică modul de răspuns al proveniențelor în aceste situații și cum influențează semnalul climatic din anul precedent media ariei vaselor (*MVA*). Anii precedenți ploioși determină o creștere a dimensiunii vaselor la începutul sezonului de vegetație următor, în sectoarele corespunzătoare lemnului timpuriu de la nivelul inelelor, iar anii secetoși reduc potențialul de formare a vaselor (Figura 4.30). Proveniențele au o reacție diferită, în special în anii ploioși, confirmând din nou modul de răspuns dictat genetic. După un an secetos, proveniența 98-Fr-04 menține un nivel ridicat al *MVA*, având chiar un vârf de creștere în lemnul timpuriu mai ridicat decât în anii ploioși. Prin urmare, receptivitatea climatică a acestei proveniențe este scăzută, având un comportament inert față de condițiile climatice. Proveniența 98-Au-36 adoptă strategia identificată anterior, caracterizată de o constanță a creșterilor independentă de condițiile climatice. Astfel, după ani precedenți secetoși, reduce ușor dimensiunea vaselor în lemnul timpuriu, iar

după anii ploioși intensifică relativ dimensiunile vaselor, dar startul este mai prudent față de celelalte proveniențe, indiferent de clima din anul precedent. Proveniența autohtonă prezintă cele mai mari valori ale *MVA* în sectoarele corespunzătoare lemnului timpuriu, atât în urma unor ani precedenți ploioși, cât și a unor ani secetoși. După un an precedent mai bogat în precipitații, aceasta formează vase mai mari, utilizând resursele cumulate, iar după un an secetos, diminuează ușor vasele, dar nu reduce foarte mult activitatea fiziologică.

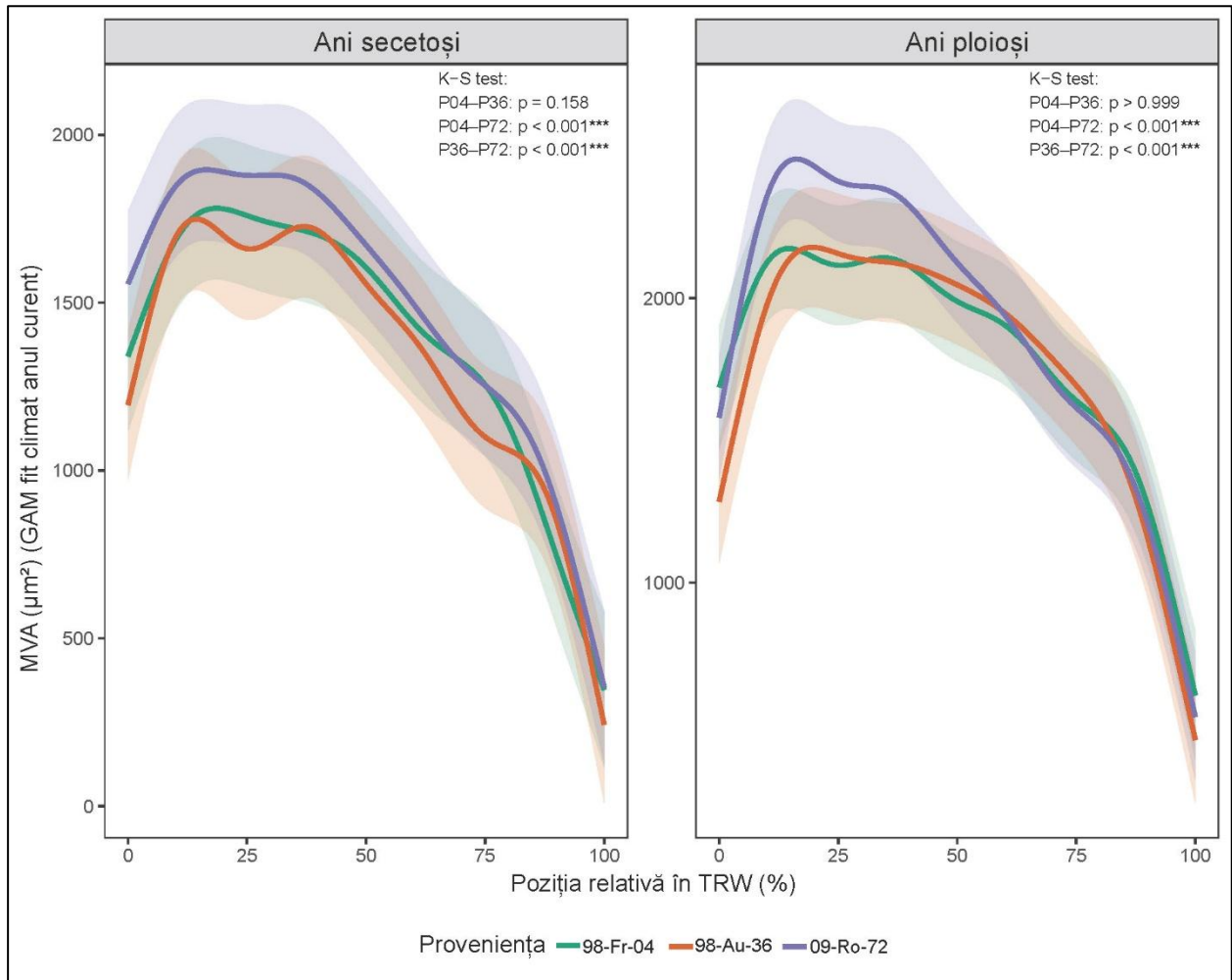


MVA – Media ariei vaselor; *TRW* – Lățimea inelului anual de creștere; *KS* – Testul Kolmogorov-Smirnov (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.30. Rezultatul modelului pentru influența climatului anului precedent asupra mediei ariei vaselor la nivelul sectoarelor inelului anual.

Răspunsul în timp real al proveniențelor la variațiile climatice poate fi observat în decursul anului curent (Figura 4.31). Efectul unui an curent secetos se reflectă în reducerea *MVA* în lemnul timpuriu și într-o tranziție relativ mai abruptă către lemnul târziu, pe când în anii cu precipitații abundente dimensiunile vaselor sunt mai mari, cu precădere în zona sectoarelor corespunzătoare lemnului timpuriu. La nivelul proveniențelor, diferențele apar între proveniența autohtonă și cele internaționale, care urmează un trend similar. Proveniența franceză și cea alpină prezintă o reducere a *MVA* în anii secetoși, mai vizibilă la cea alpină. În anii ploioși, ambele intensifică creșterile *MVA*, dar cu o oarecare superioritate a

provenienței alpine. În altă ordine de idei, proveniența românească se identifică printr-un răspuns diferit față de cele două proveniențe internaționale, având valori semnificativ mai ridicate atât în anii secetoși, cât și în cei ploioși. Trendul observat la nivelul inelului anual indică creșteri intense în prima parte a sezonului, zona de lemn timpuriu, urmate de o reducere treptată a dimensiunilor vaselor, pe măsură ce intervin constrângerile climatice. În anii secetoși, această proveniență reduce dimensiunea vaselor în lemnul timpuriu, dar nu la un nivel foarte scăzut, menținând funcționalitatea. În anii favorabili, profită de resurse și produce vase mari, intensificând astfel conductivitatea hidraulică.



MVA – Media ariei vaselor; TRW – Lățimea inelului anual de creștere; KS – Testul Kolmogorov-Smirnov (* pentru $p < 0,05$; ** pentru $p < 0,01$; *** pentru $p < 0,001$).

Figura 4.31. Rezultatul modelului pentru influența climatului anului curent asupra mediei ariei vaselor la nivelul sectoarelor inelului anual.

4.6.3. Discuții

Analiza anatomică a lemnului oferă posibilitatea observării în detaliu a potențialului adaptativ al speciilor de arbori prin identificarea cu precizie a mecanismelor care condiționează creșterea arborilor și a raportului dintre aceasta și condițiile staționale (von Arx et al. 2016). Caracteristicile anatomice sunt influențate în principal de climat (Gennaretti et al. 2022), dar și de genotip (Nabais et al. 2018), evidențiind astfel posibilitatea identificării unor populații cu mecanisme de adaptare mai eficiente

(Hajek et al. 2016) și, mai important, poate explica performanța diferitelor populații și mecanismele fiziologice utilizate pentru supraviețuire (Fontes et al. 2022).

În acest studiu au fost analizate la nivel anatomic trei proveniențe testate în cultura Fântânele. Experimentul este amplasat la limita arealului natural al fagului, ceea ce oferă posibilitatea observării reacției proveniențelor la condiții de vegetație limitative, deoarece în aceste zone, speciile forestiere sunt considerate a fi mai sensibile la schimbările de mediu (Gennaretti et al. 2022).

Proveniențele analizate au prezentat un nivel similar al creșterilor radiale, precum și valori apropiate în cazul ariei lumenului, neexistând o departajare semnificativă între acestea. Rezultate similare au fost identificate și într-un studiu efectuat de Stojnic et al. (2013) la nivelul unei culturi comparative instalate în Serbia, în condiții staționale asemănătoare cu cele din cultura Fântânele. Autorii menționează că proveniențele au manifestat o reacție similară indiferent dacă stațiunea din care au fost transferate a fost mai umedă, subliniind potențialul acestora de a se adapta și la condiții de secetă. Acest rezultat a fost validat și în cazul de față, unde proveniența alpină (98-Au-36) a avut creșteri nediferențiate în raport cu celelalte. Trenduri similare ale creșterilor la nivelul locurilor de testare au fost observate și de Unterholzner et al. (2024); ei au concluzionat influența mai pregnantă a condițiilor locale de mediu asupra creșterilor, față de bagajul genetic al proveniențelor de fag, concluzie evidențiată și într-un alt studiu efectuat într-o cultură comparativă din Olanda (Eilmann et al. 2014). Prin urmare, în condițiile staționale de la limita estică a arealului natural al fagului, creșterea proveniențelor ajunge să fie similară, fără diferențe notabile, iar acest fenomen este determinat de constrângerile climatice ale locului de testare, care influențează creșterile și acoperă efectul genotipului.

În zonele de limită, unde creșterile radiale sunt dictate de condițiile de mediu (Unterholzner et al. 2024), studiul lemnului la nivel anatomic poate reliefa mai eficient reacția fiziologică a proveniențelor, deoarece trăsăturile anatomice sunt mult mai sensibile la fluctuațiile de mediu și pot explica concret legătura dintre climat și performanța arborilor (Choat et al. 2012; Rita et al. 2022). În consecință, studiul relației dintre climat și parametrii anatomici este necesar pentru identificarea strategiilor adaptative adoptate de diferite populații pentru a le asigura supraviețuirea și creșterea chiar și în condiții limitative (Fontes et al. 2022; Johnson et al. 2018).

Parametrii anatomici analizați la nivelul celor trei proveniențe nu au prezentat o diferențiere evidentă la nivelul datelor brute, fapt întâlnit la fag în condiții de limită (Arnič et al. 2021; Gričar et al. 2024), însă analiza relației cu climatul, utilizând metoda eficace de separare a inelului anual pe segmente (Huang et al. 2025), a scos în evidență diferite strategii adoptate de proveniențe pentru a diminua efectele negative ale mediului (Oladi et al. 2014), strategii influențate de genotip și la nivelul cărora se poate realiza o departajare între proveniențe.

Proveniența franceză (98-Fr-04), transferată din vestul arealului speciei, din zona influențelor climatice atlantice, care a înregistrat cea mai scăzută performanță în cultura Fântânele, dar a fost identificată ca având un comportament plastic la nivelul celor două culturi instalate în seria 98, s-a dovedit a avea o reacție fiziologică bazată pe memorie climatică, lipsită de un potențial adaptativ manifestat în timp real.

Comportamentul acestei proveniențe este dictat în mare măsură de memoria climatică (Kannenberget al. 2020), fiind astfel inertă față de fluctuațiile mediului din timpul sezonului de vegetație. Ea funcționează în principal pe baza semnalului climatic primit în anul precedent și a amprentei lăsate de secetele anterioare, care creează un efect consecutiv pentru anii următori (Rukh et al. 2023), iar reacțiile la fluctuațiile mediului din anul curent sunt slabe și fragmentate. Răspunsul acestei populații se concretizează prin reducerea bruscă a dimensiunii vaselor și, implicit, a nivelului conductanței hidraulice în urma unui an precedent secetos (Gleason et al. 2016), care se accentuează și mai mult în anii curenți secetoși, fapt ce conduce la apariția fenomenului de caviație, principalul determinant al mortalității (Choat et al. 2012). Prin urmare, proveniența este una cu un potențial adaptativ redus și cu sensibilitate accentuată la variațiile climatice ridicate din zona de limită a arealului (Klisz et al. 2019), ceea ce o face vulnerabilă în cazul unor perioade nefavorabile prelungite și, mai ales, în fața schimbărilor climatice prognozate (Aitken et al. 2008; Lee et al. 2023). Pe lângă acestea, plasticitatea identificată în cazul caracteristicilor biometrice s-a dovedit a fi de fapt o plasticitate neadaptativă la nivel anatomic (Ghalambor et al. 2007), datorită presiunii mediului, care depășește potențialul adaptativ al acestei proveniențe (Chevin et al. 2010), nefiind vorba de o plasticitate adaptivă care presupune o reducere a creșterii bazată pe constrângerile mediului, ca un prim pas în procesul de adaptare (Bradshaw 1965; Bradshaw 2006; Bussotti et al. 2015).

Proveniența transferată din Alpii austrieci (98-Au-36), din zona de limită altitudinală a fagului, care a prezentat cea mai ridicată performanță pentru supraviețuire și înălțime, s-a dovedit a avea o reacție echilibrată și stabilă în timp la nivel anatomic. Răspunsul acestei populații este unul determinat exclusiv de variațiile climatice din anul curent, evitând reacții la extreme. Practic, în anii secetoși își reduce ușor activitatea fiziologică, dar nu o blochează, iar în anii favorabili nu intensifică foarte mult creșterile, menținând astfel o constanță la nivel hidraulic. Acest comportament a fost identificat și de Miranda et al. (2022) într-un studiu efectuat în populații de fag la nivelul unui gradient altitudinal în Munții Apenini. Autorii remarcă faptul că populațiile de altitudine au manifestat o plasticitate mai redusă la nivelul caracteristicilor anatomice și o activitate hidraulică mai precaută, nediferențiată între ani, deci influențată doar de clima din sezonul de vegetație curent și fără reacții evidente la extremele climatice din sezonul de vegetație. De asemenea, dimensiunile vaselor s-au dovedit a fi influențate atât de temperatură, cât și de precipitații, fapt observat și în studiul curent. Această stabilitate în activitatea de la nivelul xilemului asigură o performanță bună în timp și o adaptare eficientă la condiții grele de vegetație. Acest comportament al populației alpine indică o adaptare la condițiile de origine, unde sezonul de vegetație este scurt și unde apare deshidratarea din timpul iernii, similară secetei, care limitează circulația apei de la nivelul rădăcinilor spre tulpină (Charrier et al. 2021). Acest comportament de diminuare a efectelor negative ale climei extreme printr-un management hidraulic eficient a fost observat la proveniențele alpine dintr-un studiu efectuat într-o cultură comparativă instalată în condiții optime pentru fag în Slovenia (Mrak et al. 2024). De asemenea, reacția de adaptare a proveniențelor de fag transferate din zona Munților Alpi în condiții de mediu restrictive, de la limita arealului speciei, a fost observată și în alte studii (Gömöry 2009; Mátyás et al. 2009a; Mátyás et al. 2009b). Astfel, aceste populații dețin un potențial adaptativ ridicat, care le permite să vegeteze chiar și în condiții de secetă,

dar mai ales în condițiile restrictive de la altitudini mari, confirmându-se astfel prognozele obținute în acest studiu și în altele, potrivit cărora fagul va câștiga teren în zonele montane înalte (Fuchs et al. 2025; Noce et al. 2023), dar și potențialul speciilor forestiere de a vegeta în afara limitelor de areal (Griesbauer et al. 2025).

Proveniența autohtonă, transferată din vestul României, care nu a avut cea mai înaltă performanță, dar a fost aproape de a fi inclusă în topul celor mai bune proveniențe din cultura Fântânele, a prezentat o reacție plastică de ajustare anatomică activă în funcție de semnalul transmis de mediu. Răspunsul acesteia la variațiile condițiilor staționale s-a dovedit a fi unul combinat, utilizând semnalul climatic din anul precedent pentru a regla intensitatea pornirii în vegetație din anul curent, însă în timpul sezonului de vegetație reglajul anatomic este determinat în timp real de climatul sezonier, care are cea mai ridicată influență. Aceasta a prezentat vase semnificativ mai mari față de celelalte două proveniențe, iar creșterile cele mai însemnate au fost sesizate în timpul primăverii, reducând activitatea hidraulică în timpul verii, ceea ce indică existența unui mecanism de reglare anatomică utilizat în scopul evitării efectelor negative ale secetei, identificat și în zona de limită sudică a fagului (Prigoliti et al. 2023). După un an precedent favorabil, proveniența formează vase mai mari în lemnul timpuriu, iar după unul secetos diminuează ușor dimensiunea vaselor fără a reduce foarte mult activitatea hidraulică, ceea ce indică un reglaj hidraulic activ (Arnič et al. 2021; Olano et al. 2022). Astfel, strategia acestei proveniențe, care presupune utilizarea ambelor tipuri de semnale climatice, se dovedește a fi eficientă pentru zona de la limita estică a arealului, unde cele mai mari probleme apar în timpul verii, datorită stresului atmosferic (Roibu et al. 2022), iar creșterea arboretelor de fag este direct influențată de secetă (Budeanu et al. 2016). Însă, cu toate acestea, strategia adoptată de această proveniență nu a asigurat cea mai mare performanță la nivel fenotipic până la vârsta de aproximativ 30 de ani, clasament ce se poate schimba între proveniențe odată cu înaintarea în vârstă (Colangelo et al. 2017; Krajnc et al. 2023), dar susține eficient persistența speciei în aceste condiții de vegetație (Roibu et al. 2017). Reacția de adaptare eficientă la condiții de secetă a proveniențelor de fag transferate din România a fost raportată și de Unterholzner et al. (2025), într-un studiu efectuat în trei culturi din aceleași serii cu cele ce fac obiectul prezentei cercetări. Astfel, două dintre cele trei proveniențe românești testate au fost selectate ca având abilitatea de a rezista eficient în condiții de stres hidric prin reducerea dimensiunii vaselor și prin reglaj hidraulic. În același sens, o proveniență din Bulgaria, testată într-o cultură internațională de fag din Olanda, s-a remarcat prin cel mai eficient sistem hidraulic, care adoptă o strategie similară cu proveniența autohtonă din prezentul studiu, de a nu reduce drastic dimensiunile vaselor și de a continua activitatea la nivel anatomic (Eilmann et al. 2014).

CAPITOLUL 5: CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

5.1. Concluzii

5.1.1. Concluzii desprinse din analiza supraviețuirii și a caracteristicilor biometrice

- Analiza bazată pe supraviețuire și caracteristicile biometrice a evidențiat faptul că proveniențele internaționale de fag au manifestat, în general, o reacție de adaptare pozitivă la condițiile de testare din România, după 24 de ani (seria 1998), respectiv 27 de ani (seria 1995) de testare. Proveniențele internaționale s-au dovedit a fi mai performante decât cele autohtone.
- Diferențele dintre condițiile staționale ale culturilor comparative au influențat semnificativ potențialul adaptativ al proveniențelor. Astfel, stațiunea în care temperatura medie anuală a fost mai scăzută, respectiv cea de la limita arealului speciei, a influențat în mod negativ proveniențele, care au reacționat prin reducerea performanțelor și, implicit, îngustarea potențialului adaptativ.
- Variațiile identificate în răspunsul proveniențelor indică existența unui potențial adaptativ controlat genetic, evidențiind astfel posibilitatea aplicării transferului asistat, însă în acest proces trebuie prioritizată relația dintre performanța proveniențelor și condițiile staționale, astfel asigurându-se succesul procesului de transfer.

5.1.2. Concluzii desprinse din analiza plasticității fenotipice

- Valoarea plasticității a fost mai ridicată pentru supraviețuire față de celelalte caracteristici analizate (înălțime și diametru), sugerând o sensibilitate mai ridicată a indicelui de plasticitate la nivelul supraviețuirii și, prin urmare, o legătură mai strânsă între aceasta și adaptabilitate.
- Proveniențele testate au manifestat o reacție plastică la interacțiunea cu locurile de testare din România, dar performanțele biometrice ale acestora au fost reduse în zonele limitative, fapt ce consemnează acțiunea plasticității fenotipice, care determină reducerea performanței fenotipului în scopul adaptării la nivelul de favorabilitate al mediului.
- Luând în considerare complexitatea procesului de adaptare a speciilor de arbori, pentru departajarea proveniențelor în privința plasticității sunt necesare studii mai complexe care să includă și parametri corespunzători proceselor interne ale arborilor, iar nivelul plasticității globale să poată fi separat în cele două categorii de plasticitate: adaptativă și nonadaptativă.

5.1.3. Concluzii desprinse din analiza transferului proveniențelor

- Funcțiile de transfer aplicate la nivelul seriei 95 au scos în evidență sensibilitatea proveniențelor la creșterea temperaturii, care a influențat în mod pozitiv supraviețuirea și creșterea în diametru, iar la nivelul seriei 98 s-a remarcat faptul că adaptarea proveniențelor

este condiționată mai mult de criterii ce țin de ecologia speciei decât de originea geografică a provenienței.

- O parte dintre proveniențele transferate din stațiuni similare cu cele ale locurilor de testare a avut o performanță foarte bună, dar reacția asemănătoare a proveniențelor transferate din stațiuni total opuse, precum și diferențele mari dintre proveniențele ce au origini climatice foarte apropiate indică existența unei variații ridicate a sensibilității climatice între populațiile de fag din Europa. Prin urmare, se reconfirmă necesitatea testării la scară largă a proveniențelor de fag și transferul acestora doar către stațiuni similare celor în care au performat.

5.1.4. Concluzii desprinse din modelarea înălțimii la nivelul României

- Distribuția actuală a creșterii în înălțime la nivelul României, în urma aplicării *Modelului Funcției Universale de Răspuns*, asimilează potențialul cel mai ridicat de creștere cu zonele montane, subcarpatice și de deal, corespunzător în cea mai mare parte arealului natural actual al speciei, iar creșteri moderate și slabe au fost identificate în regiunile extracarpătice, în zonele de la limita arealului, precum și în zonele montane înalte mai puțin favorabile speciei în contextul climatic actual.
- Potențialul creșterilor maxime, prognozate la aproximativ 70% din creșterile actuale, care ar putea fi obținute în viitoarele arborete de fag până la atingerea vârstei de 20 de ani, în contextul menținerii condițiilor climatice actuale (2011-2020), indică o scădere a creșterilor fagului în decursul timpului, datorită impactului schimbărilor climatice, care influențează scăderea favorabilității staționale.
- Creșterile scăzute din exteriorul arcului carpatic, prognozate pentru ambele scenarii climatice, dar cu intensitate net superioară în cazul RCP 8.5, urmează aceeași direcție cu studiile care indică o sensibilitate ridicată a fagului, care va contribui la o eliminare treptată sau o fragmentare a populațiilor ce vegetează la limita inferioară a arealului speciei. Concomitent cu acest fenomen, modelul sugerează un viitor proces de migrație a speciei către zonele cu altitudini mai ridicate din Munții Carpați.

5.1.5. Concluzii desprinse din analiza fenologiei

- Procesele fenologice au evidențiat existența unor variații anuale ridicate la nivelul proveniențelor testate în cultura Săcele, generate în principal de fluctuațiile temperaturii aerului. Proveniența a avut un rol semnificativ la nivelul stadiilor de debut, indicând existența controlului genetic asupra acestor procese. Cu toate acestea, efectul provenienței a fost mai scăzut comparativ cu cel al anului de observație sau al repetiției, ceea ce poate fi considerat un indiciu al influenței mai decisive a condițiilor locului de testare față de zestrea genetică în procesele fenologice ale proveniențelor.
- Efectul nonliniar al temperaturii asupra stadiilor fenologice explică faptul că la temperaturi mai ridicate debutul fenologic este mai rapid, dar în același timp durata întregului proces poate fi încetinită, ajungând astfel să fie constantă între anii cu debut fenologic precoce sau tardiv. De

asemenea, ritmul de avans al înfrunzirii a fost de 2,6 zile la fiecare +1 °C. Variațiile fazelor corespunzătoare definirii formei finale a frunzei nu au putut fi explicate de temperatură.

- Senescența a fost explicată de efectul nonlinear al temperaturii, care indică avansarea senescenței odată cu scăderea temperaturii. De asemenea, s-a observat că în anii în care senescența începe mai rapid, sensibilitatea față de temperatură este mai redusă, dar această sensibilitate este mai ridicată în cazul anilor în care senescența este mai târzie. Ritmul de avans al senescenței a fost în medie de patru zile la fiecare -1 °C.
- Sezonul de vegetație a avut în medie o durată de 162 de zile, cu o diferență între proveniențele situate la extreme de 12 zile. Proveniențele cu cea mai lungă perioadă de vegetație au fost cele incluse în topul celor mai performante proveniențe pentru caracteristicile de creștere din cultura Săcele, confirmându-se astfel influența pozitivă a duratei perioadei de creștere asupra performanțelor de creștere ale proveniențelor de fag.
- Datorită diferențelor privind exigențele legate de forțarea termică (încălzire și răcire) a proveniențelor, se recomandă o atenție sporită la utilizarea acestora pentru introducerea în lucrările de regenerare artificială, deoarece performanța acestora poate fi afectată de înghețurile târzii și timpurii.

5.1.6. Concluzii desprinse din analiza anatomică a lemnului

- Analiza anatomică a lemnului s-a dovedit a fi un instrument cu o eficacitate ridicată pentru cuantificarea în detaliu a potențialului adaptativ al proveniențelor de fag.
- Presiunea stațiunii limitative, din zona marginală a arealului fagului, induce omogenizarea creșterilor radiale ale proveniențelor, iar reacția adaptativă a acestora poate fi subestimată fără analiza capacității hidraulice.
- Strategiile fiziologice adoptate de proveniențe indică din nou necesitatea unor studii amănunțite înainte de transferul acestora. Cu toate acestea, potențialul adaptativ și productiv ridicat al provenienței alpine indică posibilitatea introducerii acesteia în România. Însă utilizarea resurselor genetice de fag din România, susținută de plasticitatea anatomică a provenienței autohtone, rămâne cea mai fezabilă soluție pentru menținerea stabilității arboretelor în cazul climatului actual.

5.2. Contribuții originale

- Testarea multidirecțională a potențialului adaptativ pentru numeroase proveniențe internaționale de fag la condițiile de mediu din România, la momentul atingerii unui punct reprezentativ al procesului de testare și anume jumătate din ciclul propus la instalare;
- Utilizarea caracteristicilor fenotipice cantitative și calitative în scopul determinării potențialului adaptativ al proveniențelor internaționale de fag testate în România;
- Utilizarea indicelui de plasticitate fenotipică în analiza comportării proveniențelor internaționale de fag testate în România;

- Testarea reacției proveniențelor internaționale de fag, utilizând metoda distanțelor ecologice de transfer, în diferite condiții de mediu reprezentative pentru făgetele din România;
- Evaluarea performanței proveniențelor de fag pe baza raportului dintre supraviețuire și înălțime;
- Modelarea exploratorie a creșterii în înălțime pentru proveniențele de fag, la nivelul României, utilizând *Modelul Funcției Universale de Răspuns*;
- Întocmirea de predicții a arealului fagului la nivelul României, pe baza reacției proveniențelor testate, în diferite scenarii climatice;
- Determinarea comportării fenologice a proveniențelor de fag, prin monitorizarea și modelarea proceselor fenologice;
- Evaluarea capacității de adaptare a proveniențelor de fag pe baza analizei anatomice a lemnului;
- Reintroducerea în circuitul cercetării internaționale a culturilor comparative de proveniențe internaționale de fag din România.

5.3. Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor cercetărilor desprinse din acest studiu a fost efectuată prin publicații în reviste cotate ISI, respectiv BDI și prin participări la conferințe și simpozioane naționale și internaționale. În total, au fost publicate trei articole WoS și două articole BDI, iar în ceea ce privește participarea la manifestări științifice, au fost înregistrate patru contribuții.

Articole publicate în jurnale cotate Web of Science (WoS):

- **Besliu, E.**; Curtu, A.L.; Apostol, E.N.; Budeanu, M. Using Adapted and Productive European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Provenances as Future Solutions for Sustainable Forest Management in Romania. *Land* 2024, 13, 183. <https://doi.org/10.3390/land13020183>. Nr. citări: 18.
- **Besliu, E.**, Curtu, A. L., Budeanu, M., Apostol, E. N., & Ciocîrlan, M. I. (2024). Exploring the effects of the assisted transfer of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances in the Romanian Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(3), 13968. <https://doi.org/10.15835/nbha52313968>. Nr. citări: 3.
- Ciocîrlan, M.I.C.; Ciocîrlan, E.; Chira, D.; Radu, G.R.; Păcurar, V.D.; **Beșliu, E.**; Zormpa, O.G.; Gailing, O.; Curtu, A.L. Large Differences in Bud Burst and Senescence between Low- and High-Altitude European Beech Populations along an Altitudinal Transect in the South-Eastern Carpathians. *Forests* 2024, 15, 468. <https://doi.org/10.3390/f15030468>. Nr. citări: 4.

Articole publicate în jurnale indexate în baze de date internaționale (BDI):

- **Beșliu, E.**, Curtu, A. L., Apostol, E. N., & Budeanu, M. (2022). *Fagus sylvatica* L. genetic resources in Romania: a review. *Revista de Silvicultură și Cinegetică*, 27(51).

- **Besliu, E.,** Budeanu, M., & Curtu, A. L. (2024). Analyzing the Adaptive Reaction of European Beech Provenances from the Perspective of Quality Traits. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 1-20.

Lucrări științifice prezentate la conferințe naționale și internaționale:

- **Besliu, E.** (2022). Testarea variabilității genetice a fagului în culturi comparative de proveniențe internaționale. Sesiunea națională a doctoranzilor în silvicultură, 7 Decembrie 2022, Suceava, România.
- **Besliu, E.;** Curtu, A.L.; Apostol, E.N.; Budeanu, M. (2023). Phenotypic variability and plasticity of European beech (*Fagus sylvatica*) provenances tested in Romania. "Forest science for people and societal challenges". The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 Octombrie 2023, București, România.
- **Besliu, E.,** Curtu, A. L., Apostol, E. N., Budeanu, M. (2023). Growth performances and transfer analyses of European beech (*Fagus sylvatica*) in two common garden experiments from Romania. Second EVOLTREE Conference 2023 – "Resilient forest for the future", 12-15 Septembrie 2023, Brașov, România.
- **Besliu, E.,** Curtu, A. L., Budeanu, M. (2024). Analysing the adaptive reaction of European beech provenances from the perspective of quality traits. 11TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOREST AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 17-18 Octombrie 2024, Brașov, România.

5.4. Direcții viitoare de cercetare

Viitoarele cercetări vor fi orientate cu precădere asupra aprofundării capacității de adaptare a speciei *F. sylvatica* în România. În acest sens, se va urmări:

- Extinderea rețelei de testare a fagului în culturi comparative pe teritoriul României;
- Instalarea unei livezi semincere pentru specia fag;
- Replicarea analizei anatomice a lemnului și în celelalte culturi internaționale de fag din România;
- Îmbunătățirea modelului Funcției Universale de Răspuns, la nivelul țării, prin includerea datelor din alte culturi comparative de fag;
- Testarea practicilor de migrație asistată a speciei.

Pe lângă acestea, se va urmări extinderea analizelor și în cazul altor specii de arbori, inițializarea unor noi metode de modelare a capacității de adaptare a speciilor de arbori, precum și integrarea noilor tehnologii în studiul culturilor comparative.

CAPITOLUL 6: BIBLIOGRAFIE

1. Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. and Hegewisch, K.C. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, **5** (1), 170191, <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>.
2. Aitken, S.N. and Whitlock, M.C. 2013. Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, **44**, 367-388, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135747>.
3. Aitken, S.N., Yeaman, S., Holliday, J.A., Wang, T. and Curtis-McLane, S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications*, **1** (1), 95-111, <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>.
4. Alberto, F.J., Aitken, S.N., Alía, R., González-Martínez, S.C., Hänninen, H., Kremer, A. *et al.* 2013. Potential for evolutionary responses to climate change—evidence from tree populations. *Global change biology*, **19** (6), 1645-1661, <https://doi.org/10.1111/gcb.12181>Digital
5. Alfaro, R.I., Fady, B., Vendramin, G.G., Dawson, I.K., Fleming, R.A., Sáenz-Romero, C. *et al.* 2014. The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change. *Forest Ecology and Management*, **333**, 76-87, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006>.
6. Ameztegui, A. 2017 Plasticity: An R package to determine several plasticity indices. In *GitHub repository*.
7. Anderson-Teixeira, K.J., Herrmann, V., Rollinson, C.R., Gonzalez, B., Gonzalez-Akre, E.B., Pederson, N. *et al.* 2022. Joint effects of climate, tree size, and year on annual tree growth derived from tree-ring records of ten globally distributed forests. *Glob Chang Biol*, **28** (1), 245-266, <https://doi.org/10.1111/gcb.15934>.
8. Arnič, D., Gričar, J., Jevšenak, J., Božič, G., von Arx, G. and Prislan, P. 2021. Different Wood Anatomical and Growth Responses in European Beech (*Fagus sylvatica* L.) at Three Forest Sites in Slovenia. *Frontiers in Plant Science*, **12** <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.669229>.
9. Aubin, I., Boisvert-Marsh, L., Kebli, H., McKenney, D., Pedlar, J., Lawrence, K. *et al.* 2018. Tree vulnerability to climate change: Improving exposure-based assessments using traits as indicators of sensitivity. *Ecosphere*, **9** (2), e02108-e02108, <https://doi.org/10.1002/ecs2.2108>.
10. B4EST. 2024. B4EST - Climate Downscaling Tool (ClimateDT). <https://b4est.eu/>.
11. Badeck, F.-W., Bondeau, A., Böttcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J. *et al.* 2004. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, **162** (2), 295-309, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01059.x>.
12. Barnoaiea, I. 2017. *Using satellite image classification and digital terrain modelling to assess forest species distribution on mountain slopes—a case study in Varatec Forest District*. Paper presented at the Integrated Management of Environmental Resources, Suceava.
13. Benito-Garzon, M., Ha-Duong, M., Frascaria-Lacoste, N. and Fernandez-Manharres, F. 2013. Extreme climate variability should be considered in forestry-assisted migration. *BioScience*, **63** (5), 317-317, <https://doi.org/10.1525/bio.2013.63.5.20>.

14. Benito Garzón, M., Alía, R., Robson, T.M. and Zavala, M.A. 2011. Intra-specific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, **20** (5), 766-778, <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00646.x>.
15. Benito Garzón, M., Robson, T.M. and Hampe, A. 2019. Δ Trait SDMs: species distribution models that account for local adaptation and phenotypic plasticity. *New Phytologist*, **222** (4), 1757-1765, <https://doi.org/10.1111/nph.15716>.
16. Bergkvist, J. 2019. *Growth and timber quality evaluation of 33 European beech (Fagus sylvatica L.) provenances from a site in Southern Sweden*. Thesis. SLU, Southern Swedish Forest Research Centre.
17. Besliu, E., Budeanu, M., Apostol, E.N. and Radu, R.G. 2022. Microenvironment Impact on Survival Rate, Growth and Stability Traits, in a Half-Sib Test of Pendula and Pyramidalis Varieties of Norway Spruce. *Forests*, **13** (10), 1691-1691, <https://doi.org/10.3390/f13101691>.
18. Besliu, E., Budeanu, M. and Curtu, A.L. 2024a. Analyzing the Adaptive Reaction of European Beech Provenances from the Perspective of Quality Traits. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, **17** (2), 1-20.
19. Besliu, E., Curtu, A.L., Apostol, E.N. and Budeanu, M. 2024b. Using Adapted and Productive European Beech (*Fagus sylvatica* L.) Provenances as Future Solutions for Sustainable Forest Management in Romania. *Land*, **13** (2), 183-183, <https://doi.org/10.3390/land13020183>.
20. Besliu, E., Curtu, A.L., Budeanu, M., Apostol, E.N. and Ciocîrlan, M.I.C. 2024c. Exploring the effects of the assisted transfer of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances in the Romanian Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **52** (3), 1-19, <https://doi.org/10.15835/nbha52313968>.
21. Beşliu, E., Curtu, A.L., Apostol, E.N. and Budeanu, M. 2022. *Fagus sylvatica* L. genetic resources in Romania: a review. *Revista de Silvicultură și Cinegetică*, **27** (51).
22. Bigler, C. and Vitasse, Y. 2019. Daily Maximum Temperatures Induce Lagged Effects on Leaf Unfolding in Temperate Woody Species Across Large Elevational Gradients. *Frontiers in Plant Science*, **10**, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00398>.
23. Biriş, I.-A. 2014. Făgetele primare din România, o contribuție la Patrimoniul Mondial UNESCO. *Bucovina Forestieră*, **14** (1), 77-85.
24. Bogunović, S., Bogdan, S., Lanščak, M., Čelepirović, N. and Ivanković, M. 2020. Use of a common garden experiment in selecting adapted beech provenances for artificial stand restoration. *South-east European forestry: SEEFOR*, **11** (1), 1-10, <https://doi.org/10.15177/see-for.20-07>.
25. Bohn, U. and Gollub, G. 2007. *Buchenwälder als natürliche Vegetation in Europa*, 391-397 p.
26. Boisvert-Marsh, L., Royer-Tardif, S., Nolet, P., Doyon, F. and Aubin, I. 2020. Using a trait-based approach to compare tree species sensitivity to climate change stressors in eastern Canada and inform adaptation practices. *Forests*, **11** (9), 989-989, <https://doi.org/10.3390/f11090989>.
27. Boisvert-Marsh, L. and de Blois, S. 2021. Unravelling potential northward migration pathways for tree species under climate change. *Journal of Biogeography*, **48** (5), 1088-1100, <https://doi.org/10.1111/jbi.14060>.
28. Bolte, A., Czajkowski, T. and Kompa, T. 2007. The north-eastern distribution range of European beech - A review. *Forestry*, **80**, 413-429, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm028>.

29. Booth, T.H., Nix, H.A., Hutchinson, M.F. and Jovanic, T. 1988. Niche analysis and tree species introduction. *Forest Ecology and Management*, **23** (1), 47-59, [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(88\)90013-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(88)90013-8).
30. Booy, G., Hendriks, R.J.J., Smulders, M.J.M., Van Groenendael, J.M. and Vosman, B. 2000. Genetic diversity and the survival of populations. *Plant biology*, **2** (04), 379-395, <https://doi.org/10.1055/s-2000-5958>.
31. Boukhris, I., Marano, G., Dalmonech, D., Valentini, R. and Collalti, A. 2025. Modeling Forest Growth Under Current and Future Climate. *Current Forestry Reports*, **11** (1), 17, <https://doi.org/10.1007/s40725-025-00249-5>.
32. Bouriaud, O., Marin, G., Bouriaud, L., Hessenmöller, D. and Schulze, E.-D. 2016. Romanian legal management rules limit wood production in Norway spruce and beech forests. *Forest ecosystems*, **3**, 1-11, <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0079-2>.
33. Bradshaw, A.D. 1965. Evolutionary Significance of Phenotypic Plasticity in Plants. In *Advances in Genetics*. E.W. Caspari and J.M. Thoday (eds.), Academic Press, pp. 115-155.
34. Bradshaw, A.D. 2006. Unravelling phenotypic plasticity—why should we bother? *New Phytologist*, **170** (4), 644-648, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01761.x>.
35. Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, **45** (1), 5-32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
36. Brooks, M.E., Kristensen, K., Van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A. *et al.* 2017. glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal*, **9** (2).
37. Budeanu, M., Petritan, A.M., Popescu, F., Vasile, D. and Tudose, N.C. 2016. The Resistance of European Beech (*Fagus sylvatica*) from the Eastern Natural Limit of Species to Climate Change. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **44** (2), 625-633, <https://doi.org/10.15835/nbha44210262>.
38. Bunn, A.G. 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, **26** (2), 115-124, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>.
39. Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V. and Brüggemann, W. 2015. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany*, **111**, 91-113, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>.
40. Capdevielle-Vargas, R., Estrella, N. and Menzel, A. 2015. Multiple-year assessment of phenological plasticity within a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in southern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, **211-212**, 13-22, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.019>.
41. Case, T.J., Holt, R.D., McPeck, M.A. and Keitt, T.H. 2005. The community context of species' borders: ecological and evolutionary perspectives. *Oikos*, **108** (1), 28-46, <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13148.x>.
42. Chakraborty, D., Ciceu, A., Ballian, D., Benito Garzón, M., Bolte, A., Bozic, G. *et al.* 2024. Assisted tree migration can preserve the European forest carbon sink under climate change. *Nature Climate Change*, **14** (8), 845-852, <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02080-5>.

43. Chakraborty, D., Dobor, L., Zolles, A., Hlásny, T. and Schueler, S. 2021. High-resolution gridded climate data for Europe based on bias-corrected EURO-CORDEX: The ECLIPS dataset. *Geoscience Data Journal*, **8** (2), 121-131, <https://doi.org/10.1002/gdj3.110>.
44. Charrier, G., Martin-StPaul, N., Damesin, C., Delpierre, N., Hänninen, H., Torres-Ruiz, J.M. *et al.* 2021. Interaction of drought and frost in tree ecophysiology: rethinking the timing of risks. *Annals of Forest Science*, **78** (2), 40, <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01052-5>.
45. Chevin, L.-M., Lande, R. and Mace, G.M. 2010. Adaptation, plasticity, and extinction in a changing environment: towards a predictive theory. *PLoS biology*, **8** (4), e1000357, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000357>.
46. Chira, D., Dănescu, F., Roșu, C., Chira, F., Mihalciuc, V., Surdu, A. *et al.* 2003. Some recent issues regarding the European beech decline in Romania. *Annale ICAS*, **46**, 167-176.
47. Chmura, D. and Rozkowski, R. 2002. Variability of beech provenances in spring and autumn phenology. *Silvae genetica*, **51** (2-3), 123-127.
48. Chmura, D.J., Banach, J., Kempf, M., Kowalczyk, J., Mohytych, V., Szeligowski, H. *et al.* 2024. Growth and productivity of European beech populations show plastic response to climatic transfer at the north-eastern border of the species range. *Forest Ecology and Management*, **565**, 122043, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122043>.
49. Choat, B., Jansen, S., Brodribb, T.J., Cochard, H., Delzon, S., Bhaskar, R. *et al.* 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, **491** (7426), 752-755, <https://doi.org/10.1038/nature11688>.
50. Chuine, I. 2010. Why does phenology drive species distribution? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365** (1555), 3149-3160, <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0142>.
51. Chuine, I. and Beaubien, E.G. 2001. Phenology is a major determinant of tree species range. *Ecology Letters*, **4** (5), 500-510, <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2001.00261.x>.
52. Chuine, I. and Cour, P. 1999. Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. *New Phytologist*, **143** (2), 339-349, <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00445.x>.
53. Ciocîrlan, M.C.I., Ciocîrlan, E., Radu, G.R., Chira, D., Gailing, O., Vîntor, C. *et al.* 2024. Exploring the association between adaptive and growth traits and within-individual genetic diversity in common beech (*Fagus sylvatica*). *Annals of Forest Research*, **67** (2), 151-166, <https://doi.org/10.15287/afr.2024.3855>.
54. Ciocîrlan, E., Sofletea, N., Ducci, F. and Curtu, A.L. 2017. Patterns of genetic diversity in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at the eastern margins of its distribution range. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, **10** (6), 916-916, <https://doi.org/10.3832/ifor2446-010>.
55. Ciocîrlan, E. and Șofletea, N. 2013. Genetic diversity of romanian populations of *Fagus sylvatica*-a review. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, **6** (1), 28-32.
56. Ciocîrlan, M.I.C., Ciocîrlan, E., Chira, D., Radu, G.R., Păcurar, V.D., Beșliu, E. *et al.* 2024. Large Differences in Bud Burst and Senescence between Low- and High-Altitude European Beech Populations along an Altitudinal Transect in the South-Eastern Carpathians. *Forests*, **15** (3), 468, <https://doi.org/10.3390/f15030468>.

57. Ciocîrlan, M.I.C., Curtu, A.L. and Radu, G.R. 2022. Predicting Leaf Phenology in Forest Tree Species Using UAVs and Satellite Images: A Case Study for European Beech (*Fagus sylvatica* L.). *Remote Sensing*, **14** (24), 6198, <https://doi.org/10.3390/rs14246198>.
58. Colangelo, M., Camarero, J.J., Borghetti, M., Gazol, A., Gentilesca, T. and Ripullone, F. 2017. Size Matters a Lot: Drought-Affected Italian Oaks Are Smaller and Show Lower Growth Prior to Tree Death. *Frontiers in Plant Science*, **8** <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00135>.
59. Conover, W.J. 1999. *Practical nonparametric statistics*. John Wiley & Sons: New York.
60. Corona, C., Guiot, J., Edouard, J.L., Chalié, F., Büntgen, U., Nola, P. *et al.* 2010. Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Clim. Past*, **6** (3), 379-400, <https://doi.org/10.5194/cp-6-379-2010>.
61. Crăciunescu, V. 2009 România: seturi de date vectoriale generale. In *Geo-Spatial. org*.
62. Crispo, E. 2008. Modifying effects of phenotypic plasticity on interactions among natural selection, adaptation and gene flow. *Journal of evolutionary biology*, **21** (6), 1460-1469, <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2008.01592.x>.
63. Czúcz, B., Gálhidý, L. and Mátyás, C. 2010. Limiting climatic factors and potential future distribution of beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuscha) Liebl.) forests near their low altitude-xeric limit in Central Europe. *Annales of Forest Science*, **68** (1), 99-108.
64. Czúcz, B., Gálhidý, L. and Mátyás, C. 2011. Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science*, **68** (1), 99-108, <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0011-4>.
65. Del Rio, M., Bravo, F., Pando, V., Sanz, G. and de Grado, R.S. 2004. Influence of individual tree and stand attributes in stem straightness in *Pinus pinaster* Ait. stands. *Annals of forest science*, **61** (2), 141-148, <https://doi.org/10.1051/forest:2004005>.
66. Delpierre, N., Vitasse, Y., Chuine, I., Guillemot, J., Bazot, S., Rutishauser, T. *et al.* 2016. Temperate and boreal forest tree phenology: from organ-scale processes to terrestrial ecosystem models. *Annals of Forest Science*, **73** (1), 5-25, <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0477-6>.
67. Denk, T., Grimm, G., Stožger, K.S.g., Langer, M. and Hemleben, V. 2002. The evolutionary history of *Fagus* in western Eurasia: Evidence from genes, morphology and the fossil record. *Plant Syst. Evol*, **232**, 213-236, <https://doi.org/10.1007/s006060200044>.
68. Denk, T., Grimm, G.W. and Hemleben, V. 2005. Patterns of molecular and morphological differentiation in *Fagus* (Fagaceae): Phylogenetic implications. *American Journal of Botany*, **92** (6), 1006-1016, <https://doi.org/10.3732/ajb.92.6.1006>.
69. Dolar, N.Š., Castillo, E.M.d., Serrano-Notivoli, R., Arrillaga, M.d.L., Novak, K., Merela, M. *et al.* 2023. Spatial and temporal variation of *Fagus sylvatica* growth in marginal areas under progressive climate change. *Dendrochronologia*, **81**, 126135, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126135>.
70. Doniță, N., Bîndiu, C., Biriș, I.-A., Gancz, V., Apostol, J. and Marcu, C. 2008. *Harta pădurilor – pe unități ecosistemice. România (scara 1:500 000)*. Editura Silvică: București.
71. Dounavi, A., Netzer, F., Celepirovic, N., Ivanković, M., Burger, J., Figueroa, A.G. *et al.* 2016. Genetic and physiological differences of European beech provenances (*F. sylvatica* L.) exposed to

- drought stress. *Forest Ecology and Management*, **361**, 226-236, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.014>.
72. Drăcea, M.D. 2018. Considerațiuni asupra domeniului forestier al României. *Bucovina Forestiera*, **18** (1), 81-81, <https://doi.org/10.4316/bf.2018.008>.
 73. Drobyshev, I., Övergaard, R., Saygin, I., Niklasson, M., Hickler, T., Karlsson, M. *et al.* 2010. Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, **259** (11), 2160-2171, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.037>.
 74. Du Cros, E.T., Thiebaut, B. and Duval, H. 1988. Variability in beech: budding, height growth and tree form. *Annales des Sciences forestières*, **45** (4), 383-398.
 75. Ducci, F., De Cuyper, B., Pâques, L.E., Proietti, R. and Wolf, H. 2012. Reference protocols for assessment of trait and reference genotypes to be used as standards in international research projects. *Ed. CRA SEL–Arezzo, Italy*, p. 82-82.
 76. Dujka, P. and Kusbach, A. 2023. Assessment of the Ellenberg quotient as a practical tool for vertical vegetation zonation. *Journal of Forest Science*, **69** (7), 305, <https://doi.org/10.17221/133/2022-JFS>.
 77. Dunn, O.J. 1964. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, **6** (3), 241-252, <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>.
 78. Eilmann, B., Sterck, F., Wegner, L., de Vries, S.M., von Arx, G., Mohren, G.M. *et al.* 2014. Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree Physiol*, **34** (8), 882-893, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu069>.
 79. Ellenberg, H. 1988. *Vegetation ecology of central Europe*. Cambridge University Press.
 80. Enescu, V. 1972. *Ameliorarea arborilor*. Ceres: București.
 81. Enescu, V. and Ioniță, L. 2000. *Genetica populațiilor*, Ed. Bren: București, 466-466 p.
 82. Engel, M., Mette, T., Falk, W., Poschenrieder, W., Fridman, J. and Skudnik, M. 2023. Modelling Dominant Tree Heights of *Fagus sylvatica* L. Using Function-on-Scalar Regression Based on Forest Inventory Data. *Forests*, **14** (2), 304-304, <https://doi.org/10.3390/f14020304>.
 83. Fang, J. and Lechowicz, M.J. 2006. Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus* L.) species in the world. *Journal of Biogeography*, **33** (10), 1804-1819, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01533.x>.
 84. Fărcaș, S., Tan ău, I., Mîndrescu, M. and Hurdu, B. 2013. Holocene vegetation history in the Maramureș Mountains (Northern Romanian Carpathians). *Quaternary International*, **293**, 92-104, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.057>.
 85. Fiorani, F. and Schurr, U. 2013. Future scenarios for plant phenotyping. *Annual review of plant biology*, **64** (1), 267-291, <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137>.
 86. Fontes, C.G., Pinto-Ledezma, J., Jacobsen, A.L., Pratt, R.B. and Cavender-Bares, J. 2022. Adaptive variation among oaks in wood anatomical properties is shaped by climate of origin and shows limited plasticity across environments. *Functional Ecology*, **36** (2), 326-340, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13964>.
 87. Frank, A., Pluess, A.R., Howe, G.T., Sperisen, C. and Heiri, C. 2017. Quantitative genetic differentiation and phenotypic plasticity of European beech in a heterogeneous landscape:

- Indications for past climate adaptation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **26**, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2017.02.001>.
88. Fu, Y.H., Piao, S., Delpierre, N., Hao, F., Hänninen, H., Liu, Y. *et al.* 2018. Larger temperature response of autumn leaf senescence than spring leaf-out phenology. *Global Change Biology*, **24** (5), 2159-2168, <https://doi.org/10.1111/gcb.14021>.
 89. Fuchs, Z., Vacek, Z., Vacek, S., Černý, J., Cukor, J., Šimůnek, V. *et al.* 2025. Growth Responses of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) and Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) Along an Elevation Gradient Under Global Climate Change. *Forests*, **16** (4), 655, <https://doi.org/10.3390/f16040655>.
 90. Gárate-Escamilla, H., Hampe, A., Vizcaíno-Palomar, N., Robson, T.M. and Benito Garzón, M. 2019. Range-wide variation in local adaptation and phenotypic plasticity of fitness-related traits in *Fagus sylvatica* and their implications under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, **28** (9), 1336-1350, <https://doi.org/10.1111/geb.12936>.
 91. Gärtner, H. and Nievergelt, D. 2010. The core-microtome: a new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. *Dendrochronologia*, **28** (2), 85-92, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.09.002>.
 92. Gärtner, H. and Schweingruber, F.H. 2013. *Microscopic preparation techniques for plant stem analysis*. Kessel Publishing House: Remagen, Germany.
 93. Gennaretti, F., Carrer, M., García-González, I., Rossi, S. and von Arx, G. 2022. Editorial: Quantitative wood anatomy to explore tree responses to global change. *Frontiers in Plant Science*, **13**, <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.998895>.
 94. Gessler, A., Wilhelm, M., Brun, P., Zimmermann, N. and Rigling, A. 2024. Zurück in die Zukunft– Ein neuer Blick auf die Perspektiven für die Buche nach 20 Jahren Forschung und weiter fortschreitendem Klimawandel. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, **193** (9-12), 206-224, <https://doi.org/10.23765/afjz000101>.
 95. Ghalambor, C.K., McKay, J.K., Carroll, S.P. and Reznick, D.N. 2007. Adaptive versus non-adaptive phenotypic plasticity and the potential for contemporary adaptation in new environments. *Functional ecology*, **21** (3), 394-407, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2007.01283.x>.
 96. Giesecke, T. and Brewer, S. 2018. Notes on the postglacial spread of abundant European tree taxa. *Vegetation History and Archaeobotany*, **27** (2), 337-349, <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0640-0>.
 97. Giesecke, T., Hickler, T., Kunkel, T., Sykes, M.T. and Bradshaw, R.H.W. 2006. ORIGINAL ARTICLE: Towards an understanding of the Holocene distribution of *Fagus sylvatica* L. *Journal of Biogeography*, **34** (1), 118-131, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01580.x>.
 98. Gleason, S.M., Westoby, M., Jansen, S., Choat, B., Hacke, U.G., Pratt, R.B. *et al.* 2016. Weak tradeoff between xylem safety and xylem-specific hydraulic efficiency across the world's woody plant species. *New Phytologist*, **209** (1), 123-136, <https://doi.org/10.1111/nph.13646>.
 99. Glick, P., Stein, B.A. and Edelson, N.A. 2011. Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment. National Wildlife Federation. Washington, D.C. , p. 168 p.
 100. Gömöry, D. 2009. Geographic patterns in the reactions of beech provenances to transfer. *Report for COST E52 meeting, Thessaloniki*. Greece.

101. Gömöry, D., Longauer, R., Paule, L., Krajmerová, D. and Schmidtová, J. 2010. Across-species patterns of genetic variation in forest trees of Central Europe. *Biodiversity and Conservation*, **19**, 2025-2038, <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9823-z>.
102. Gömöry, D. and Paule, L. 2011. Trade-off between height growth and spring flushing in common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Annals of Forest Science*, **68** (5), 975-984, <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0103-1>.
103. Gray, L.K., Gylander, T., Mbogga, M.S., Chen, P.-y. and Hamann, A. 2011. Assisted migration to address climate change: recommendations for aspen reforestation in western Canada. *Ecological applications*, **21** (5), 1591-1603, <https://doi.org/10.1890/10-1054.1>.
104. Gričar, J., Arnič, D., Krajnc, L., Prislán, P., Božič, G., Westergren, M. *et al.* 2024. Different patterns of inter-annual variability in mean vessel area and tree-ring widths of beech from provenance trials in Slovenia and Hungary. *Trees*, **38** (1), 179-195, <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02476-4>.
105. Griesbauer, H., O'Neill, G.A. and MacKenzie, W.H. 2025. High productivity of tree species planted outside their current geographic range indicates large regions of unrealized niche space. *Frontiers in Plant Science*, **16** <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1650428>.
106. Hajek, P., Kurjak, D., von Wühlisch, G., Delzon, S. and Schuldt, B. 2016. Intraspecific variation in wood anatomical, hydraulic, and foliar traits in ten European beech provenances differing in growth yield. *Frontiers in plant science*, **7**, 791-791, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00791>.
107. Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P. and Lister, D. 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, **7** (1), 109, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
108. Hewitt, N., Klenk, N., Smith, A.L., Bazely, D.R., Yan, N., Wood, S. *et al.* 2011. Taking stock of the assisted migration debate. *Biological Conservation*, **144** (11), 2560-2572, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.04.031>.
109. Holmes, R.L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*.
110. Holt, R.D., Keitt, T.H., Lewis, M.A., Maurer, B.A. and Taper, M.L. 2004. Theoretical models of species' borders: single species approaches. *Oikos*, **108** (1), 18-27, <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13147.x>.
111. Horváth, A. 2016. *Beech adaptation to climate change according to provenance trials in Europe*. Thesis. University of West Hungary Faculty of Forestry.
112. Horváth, A. and Mátyás, C. 2016. The decline of vitality caused by increasing drought in a beech provenance trial predicted by juvenile growth. *South-east European forestry: SEEFOR*, **7** (1), 21-28, <https://doi.org/10.15177/see-for.16-06>.
113. Huang, W., Lundqvist, S.O. and Thygesen, L.G. 2025. Effects of climate variability on secondary xylem formation and anatomy in *Fagus sylvatica* trees grown in Denmark. *Botany Letters*, **172** (1), 87-100, <https://doi.org/10.1080/23818107.2024.2426124>.
114. Ifn. 2024. Inventarul Forestier National Ciclul II.
115. IPCC. 2023 Summary for policymakers. IPCC Geneva, Switzerland, pp. 1-34.
116. Jazbec, A., Šegotić, K., Ivanković, M., Marjanović, H. and Perić, S. 2007. Ranking of European beech provenances in Croatia using statistical analysis and analytical hierarchy process.

- Forestry: An International Journal of Forest Research*, **80** (2), 151-162, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm007>.
117. Jevšenak, J. 2020. New features in the dendroTools R package: Bootstrapped and partial correlation coefficients for monthly and daily climate data. *Dendrochronologia*, **63**, 125753, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125753>.
 118. Jochner, S., Sparks, T.H., Laube, J. and Menzel, A. 2016. Can we detect a nonlinear response to temperature in European plant phenology? *International journal of biometeorology*, **60** (10), 1551-1561, <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1146-7>.
 119. Johnson, D.M., Domec, J.-C., Carter Berry, Z., Schwantes, A.M., McCulloh, K.A., Woodruff, D.R. *et al.* 2018. Co-occurring woody species have diverse hydraulic strategies and mortality rates during an extreme drought. *Plant, Cell & Environment*, **41** (3), 576-588, <https://doi.org/10.1111/pce.13121>.
 120. Johnston, M. 2009. Vulnerability of Canada's tree species to climate change and management options for adaptation: An overview for policy makers and practitioners. Canadian Council of Forest Ministers.
 121. Jump, A.S., Hunt, J.M., Martínez-Izquierdo, J.A. and Peñuelas, J. 2006a. Natural selection and climate change: Temperature-linked spatial and temporal trends in gene frequency in *Fagus sylvatica*. *Molecular Ecology*, **15** (11), 3469-3480, <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.03027.x>.
 122. Jump, A.S., Hunt, J.M. and Peñuelas, J. 2006b. Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, **12** (11), 2163-2174, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01250.x>.
 123. Jump, A.S., Marchant, R. and Penuelas, J. 2009. Environmental change and the option value of genetic diversity. *Trends Plant Sci*, **14** (1), 51-58, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.002>.
 124. Kannenberg, S.A., Schwalm, C.R. and Anderegg, W.R. 2020. Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology letters*, **23** (5), 891-901, <https://doi.org/10.1111/ele.13485>.
 125. Kasper, J., Leuschner, C., Walentowski, H., Petritan, A.M. and Weigel, R. 2022. Winners and losers of climate warming: Declining growth in *Fagus* and *Tilia* vs. stable growth in three *Quercus* species in the natural beech–oak forest ecotone (western Romania). *Forest Ecology and Management*, **506**, 119892-119892, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119892>.
 126. Keir, K.R., Bemmels, J.B. and Aitken, S.N. 2011. Low genetic diversity, moderate local adaptation, and phylogeographic insights in *Cornus nuttallii* (Cornaceae). *American Journal of Botany*, **98** (8), 1327-1336, <https://doi.org/10.3732/ajb.1000466>.
 127. Kembrytè, R., Danusevičius, D., Baliuckas, V. and Buchovska, J. 2022. Phenology is associated with genetic and stem morphotype variation in European beech (*Fagus sylvatica* L.) Stands. *Forests*, **13** (5), 664-664, <https://doi.org/10.3390/f13050664>.
 128. Kermavnar, J., Kutnar, L. and Marinšek, A. 2023. More losses than gains? Distribution models predict species-specific shifts in climatic suitability for European beech forest herbs under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, **6**, <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1236842>.

129. Klesse, S., Peters, Richard L., Alfaro-Sánchez, R., Badeau, V., Baittinger, C., Battipaglia, G. *et al.* 2024. No Future Growth Enhancement Expected at the Northern Edge for European Beech due to Continued Water Limitation. *Global Change Biology*, **30** (10), e17546, <https://doi.org/10.1111/gcb.17546>.
130. Klisz, M., Buras, A., Sass-Klaassen, U., Puchałka, R., Koprowski, M. and Ukalska, J. 2019. Limitations at the Limit? Diminishing of Genetic Effects in Norway Spruce Provenance Trials. *Frontiers in Plant Science*, **10**, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00306>.
131. Knapp, H.D. and Fichtner, A. 2011. *Beech forests*. Bundesamt für Naturschutz (BfN) Federal Agency for Nature Conservation: Bonn, Germany
132. Knutzen, F., Meier, I.C. and Leuschner, C. 2015. Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree Physiology*, **35** (9), 949-963, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv057>.
133. König, A.O. 2005. Provenance research: evaluating the spatial pattern of genetic variation. *Conservation and management of forest genetic resources in Europe*. Arbona Publishers, Zvolen, p. 275-333.
134. Konnert, M., Fady, B., Gömöry, D., A'hara, S., Wolter, F., Ducci, F. *et al.* 2015. Use and transfer of forest reproductive material in Europe in the context of climate change. *European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN)*, Bioversity International, Rome, Italy. .
135. Konnert, M. and Ruetz, W. 2001. Genetic variation of beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances in an international beech provenance trial. *Forest Genetics*, **8** (3), 173-184.
136. Krajnc, L., Gričar, J., Jevšenak, J., Hafner, P. and Brus, R. 2023. Tree rings, wood density and climate–growth relationships of four Douglas-fir provenances in sub-Mediterranean Slovenia. *Trees*, **37** (2), 449-465, <https://doi.org/10.1007/s00468-022-02362-5>.
137. Krajnc, L., Prislán, P., Božič, G., Westergren, M., Arnič, D., Mátyás, C. *et al.* 2022. A comparison of radial increment and wood density from beech provenance trials in Slovenia and Hungary. *European Journal of Forest Research*, **141** (3), 433-446, <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01449-5>.
138. Kramer, K., Ducouso, A., Gömöry, D., Hansen, J.K., Ionita, L., Liesebach, M. *et al.* 2017. Chilling and forcing requirements for foliage bud burst of European beech (*Fagus sylvatica* L.) differ between provenances and are phenotypically plastic. *Agricultural and Forest Meteorology*, **234**, 172-181, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.002>.
139. Kruskal, W.H. and Wallis, W.A. 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, **47** (260), 583-621, <https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>.
140. Kuznetsova, A., Brockhoff, P.B. and Christensen, R.H.B. 2017. ImerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, **82** (13), 1 - 26, <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>.
141. Lauteri, M., Pliura, A., Monteverdi, M.C., Brugnoli, E., Villani, F. and Eriksson, G. 2004. Genetic variation in carbon isotope discrimination in six European populations of *Castanea sativa* Mill. originating from contrasting localities. *Journal of evolutionary biology*, **17** (6), 1286-1296, <https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2004.00765.x>.

142. Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. *et al.* 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
143. Leech, S.M., Almuedo, P.L. and O'Neill, G. 2011. Assisted migration: adapting forest management to a changing climate. *Journal of Ecosystems and Management*, **12** (3), <https://doi.org/10.22230/jem.2011v12n3a91>.
144. Leifsson, C., Buras, A., Klesse, S., Baittinger, C., Bat-Enerel, B., Battipaglia, G. *et al.* 2024. Identifying drivers of non-stationary climate-growth relationships of European beech. *Science of The Total Environment*, **937**, 173321, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173321>.
145. Lenth, R. 2023 emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means_. R package version 1.8. 5 Ed.
146. Leuschner, C. 2020. Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)—A review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **47**, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2020.125576>.
147. Leuschner, C. and Ellenberg, H. 2017. *Ecology of Central European non-forest vegetation: coastal to alpine, natural to man-made habitats: vegetation ecology of Central Europe, Volume II*. Springer.
148. Leuschner, C., Meier, I.C. and Hertel, D. 2006. On the niche breadth of *Fagus sylvatica*: Soil nutrient status in 50 Central European beech stands on a broad range of bedrock types. *Annals of Forest Science*, **63** (4), 355-368, <https://doi.org/10.1051/forest:2006016>.
149. Liaw, A. and Wiener, M. 2002. Classification and regression by randomForest. *R news*, **2** (3), 18-22.
150. Liepe, K.J., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Kormann, J.M., Wolf, H. and Liesebach, M. 2024. Ecotypic variation in multiple traits of European beech: selection of suitable provenances based on performance and stability. *European Journal of Forest Research*, **143** (3), 831-845, <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01656-2>.
151. Liesebach, M. 2017, 2017/11//. *International beech provenance trial 1993/95 - site Schädtebek (Bu19-1)*. Paper presented at the German Russian Conference on Forest Genetics- Proceedings-Ahrensburg, 2017 November 21-23, Ahrensburg.
152. Magri, D. 2008. Patterns of post-glacial spread and the extent of glacial refugia of European beech (*Fagus sylvatica*). *Journal of Biogeography*, **35**, 450-463, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01803.x>.
153. Magri, D., Vendramin, G.G., Comps, B., Dupanloup, I., Geburek, T., Gömöry, D. *et al.* 2006. A new scenario for the Quaternary history of European beech populations: Palaeobotanical evidence and genetic consequences. *New Phytologist*, **171** (1), 199-221, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01740.x>.
154. Manchester, S.R. and Dillhoff, R.M. 2004. *Fagus* (Fagaceae) fruits, foliage, and pollen from the Middle Eocene of Pacific northwestern North America. *Canadian Journal of Botany*, **82** (10), 1509-1517, <https://doi.org/10.1139/b04-112>.

155. Manos, P.S., Zhou, Z.K. and Cannon, C.H. 2001. Systematics of Fagaceae: Phylogenetic tests of reproductive trait evolution. *International Journal of Plant Sciences*, **162** (6), 1361-1379, <https://doi.org/10.1086/322949>.
156. Marchi, M., Bucci, G., Iovieno, P. and Ray, D. 2024. ClimateDT: a global scale-free dynamic downscaling portal for historic and future climate data. *Environments*, **11** (4), 82-82, <https://doi.org/10.3390/environments11040082>.
157. Marin, G., Stribu, V.C., Abrudan, I.V. and Stribu, B.M. 2020. Regional Variability of the Romanian Main Tree Species Growth Using National Forest Inventory Increment Cores. *Forests*, **11** (4), 409, <https://doi.org/10.3390/f11040409>.
158. Martinez del Castillo, E., Zang, C.S., Buras, A., Hackett-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivoli, R. *et al.* 2022. Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology*, **5** (1), 163, <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3>.
159. Matisons, R., Šņepsts, G., Puriņa, L., Donis, J. and Jansons, Ā. 2018. Dominant height growth of European beech at the northeasternmost stands in Europe. *Silva Fennica*, **52** (1), <https://doi.org/10.14214/sf.7818>.
160. Mátyás, C. 1996. Climatic adaptation of trees: rediscovering provenance tests. *Euphytica*, **92**, 45-54, <https://doi.org/10.1007/BF00022827>.
161. Mátyás, C. 2021. Adaptive pattern of phenotypic plasticity and inherent growth reveal the potential for assisted transfer in sessile oak (*Quercus petraea* L.). *Forest Ecology and Management*, **482**, 118832-118832, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118832>.
162. Mátyás, C., Bozic, G., Gömöry, D., Ivankovic, M. and Rasztoivits, E. 2009a. Juvenile growth response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to sudden change of climatic environment in SE European trials. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, **2** (6), 213-213, <https://doi.org/10.3832/ifor0519-002>.
163. Mátyás, C., Bozic, G., Gömöry, D., Ivankovic, M. and Rasztoivits, E. 2009b. Transfer analysis reveals macroclimatic adaptation of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, **5**, 47-62.
164. Mátyás, C. and Yeatman, C.W. 1992. Effect of geographical transfer on growth and survival of jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.) populations. *Silvae Genetica*, **41** (6), 370-376.
165. Maxwell, R.S. and Larsson, L.-A. 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia*, **67**, 125841, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125841>.
166. McMaster, G.S. and Wilhelm, W.W. 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, **87** (4), 291-300, [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0).
167. Meier, I.C. and Leuschner, C. 2008. Genotypic variation and phenotypic plasticity in the drought response of fine roots of European beech. *Tree physiology*, **28** (2), 297-309, <https://doi.org/10.1093/treephys/28.2.297>.
168. Menon, M., Landguth, E., Leal-Saenz, A., Bagley, J.C., Schoettle, A.W., Wehenkel, C. *et al.* 2020. Tracing the footprints of a moving hybrid zone under a demographic history of speciation with gene flow. *Evolutionary Applications*, **13** (1), 195-209, <https://doi.org/10.1111/eva.12795>.

169. Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R. *et al.* 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, **12** (10), 1969-1976, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>.
170. Meyer, D., Zeileis, A., Hornik, K., Gerber, F., Friendly, M. and Meyer, M.D. 2024 Package 'vcd'. In *R package version 1.4-13*, pp. 1-4.
171. Mihai, G. 2009. Surse de seminte testate pentru principalele specii de arbori forestieri din România [Tested seed sources for the main forest tree species from Romania]. *Editura Silvică, București*.
172. Mihai, G., Șofletea, N., Curtu, L., Pârnută, G., Ioniță, L., Stuparu, E. *et al.* 2008. Evaluări privind variația genetică a principalelor specii de arbori forestieri din România în vederea stabilirii surselor de seminte testate.[Evaluation of genetic variation of the main forest tree species in Romania for establishing tested seed sources.]. *Revista Pădurilor*, **4**, 3-11.
173. Milescu, I., Alexe, P., Nicovescu, H. and Suciuc, P. 1967. Fagul. *Agro-Silvică, București*.
174. Miranda, J.C., Calderaro, C., Cocozza, C., Lasserre, B., Tognetti, R. and von Arx, G. 2022. Wood Anatomical Responses of European Beech to Elevation, Land Use Change, and Climate Variability in the Central Apennines, Italy. *Frontiers in Plant Science*, **13** <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855741>.
175. Mrak, T., Gričar, J., Unuk Nahberger, T., Božič, G., Krajnc, L., Prisljan, P. *et al.* 2024. How beech provenance affects the structure of secondary xylem, leaf traits, and the ectomycorrhizal community under optimal growth conditions. *Trees*, **38** (3), 637-653, <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02502-z>.
176. Müller, M. and Finkeldey, R. 2016. Genetic and adaptive trait variation in seedlings of European beech provenances from Northern Germany. *Silvae Genetica*, **65** (2), 65-73, <https://doi.org/10.1515/sg-2016-0018>.
177. Müller, M., Kempen, T., Finkeldey, R. and Gailing, O. 2020. Low population differentiation but high phenotypic plasticity of European beech in Germany. *Forests*, **11** (12), 1-14, <https://doi.org/10.3390/f11121354>.
178. Nabais, C., Hansen, J.K., David-Schwartz, R., Klisz, M., López, R. and Rozenberg, P. 2018. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? *Forest Ecology and Management*, **408**, 148-156, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.040>.
179. Nguyen, Q.N., Polle, A. and Pena, R. 2017. Intraspecific variations in drought response and fitness traits of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from three provenances differing in annual precipitation. *Trees*, **31**, 1215-1225, <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1539-1>.
180. Nicotra, A.B., Atkin, O.K., Bonser, S.P., Davidson, A.M., Finnegan, E.J., Mathesius, U. *et al.* 2010. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. *Trends Plant Sci*, **15** (12), 684-692, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.09.008>.
181. Noce, S., Cipriano, C. and Santini, M. 2023. Altitudinal shifting of major forest tree species in Italian mountains under climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, **6** <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1250651>.
182. Oladi, R., Bräuning, A. and Pourtahmasi, K. 2014. "Plastic" and "static" behavior of vessel-anatomical features in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in view of xylem hydraulic conductivity. *Trees*, **28** (2), 493-502, <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0966-x>.

183. Olano, J.M., Hernández-Alonso, H., Sangüesa-Barreda, G., Rozas, V., García-Cervigón, A.I. and García-Hidalgo, M. 2022. Disparate response to water limitation for vessel area and secondary growth along *Fagus sylvatica* southwestern distribution range. *Agricultural and Forest Meteorology*, **323**, 109082, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109082>.
184. Olivoto, T. and Lúcio, A.D.C. 2020. metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, **11** (6), 783-789, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>.
185. Packham, J.R., Thomas, P.A., Atkinson, M.D. and Degen, T. 2012. Biological Flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. *Journal of Ecology*, **100** (6), 1557-1608, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.02017.x>.
186. Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M., Alonso, J.L.B. *et al.* 2012. Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. *Science*, **336** (6079), 353-355, <https://doi.org/10.1126/science.1219033>.
187. Pavlović, L., Stojanović, D., Mladenović, E., Lakićević, M. and Orlović, S. 2019. Potential Elevation Shift of the European Beech Stands (*Fagus sylvatica* L.) in Serbia. *Front Plant Sci*, **10**, 849, <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00849>.
188. Pedlar, J.H., McKenney, D.W., Aubin, I., Beardmore, T., Beaulieu, J., Iverson, L. *et al.* 2012. Placing Forestry in the Assisted Migration Debate. *BioScience*, **62** (9), 835-842, <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.9.10>.
189. Peters, R. 2013. *Beech forests*. Springer Science & Business Media.
190. Petkova, K., Molle, E., Huber, G., Konnert, M. and Gaviria, J. 2017. Spring and autumn phenology of Bulgarian and German provenances of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under similar climatic conditions. *Silvae Genetica*, **66**, 24-32, <https://doi.org/10.1515/sg-2017-0004>.
191. Petkova, K., Molle, E., Konnert, M. and Knutzen, F. 2019. Comparing German and Bulgarian provenances of European beech (*Fagus sylvatica* L.) regarding survival, growth and ecodistance. *Silva Balcanica*, **20** (2), <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9929087>.
192. Petkova, K., Molle, E. and Mustafova, A. 2022. Survival and growth of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances in North-Eastern Bulgaria. *Silva Balcanica*, **23** (2), 5-17, <https://doi.org/10.3897/silvabalcanica.22.e95109>.
193. Petřík, P., Grote, R., Gömöry, D., Kurjak, D., Petek-Petrik, A., Lamarque, L.J. *et al.* 2022. The Role of Provenance for the Projected Growth of Juvenile European Beech under Climate Change. *Forests*, **14** (1), 26-26, <https://doi.org/10.3390/f14010026>.
194. Petrik, P., Petek-Petrik, A., Kurjak, D., Mukarram, M., Klein, T., Gömöry, D. *et al.* 2022. Interannual adjustments in stomatal and leaf morphological traits of European beech (*Fagus sylvatica* L.) demonstrate its climate change acclimation potential. *Plant Biology*, **24** (7), 1287-1296, <https://doi.org/10.1111/plb.13401>.
195. Petřík, P., Petek, A., Konôpková, A., Bosela, M., Fleischer, P., Frýdl, J. *et al.* 2020. Stomatal and leaf morphology response of european beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances transferred to contrasting climatic conditions. *Forests*, **11** (12), 1-22, <https://doi.org/10.3390/f11121359>.
196. Popescu, R. and Șofletea, N. 2020. Spring and autumn phenology in sub-mesothermal beech stands from the southwestern extremity of the Carpathians. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, **48** (2), 1057-1069, <https://doi.org/10.15835/nbha48211897>.

197. Prendin, A.L., Petit, G., Carrer, M., Fonti, P., Björklund, J. and von Arx, G. 2017. New research perspectives from a novel approach to quantify tracheid wall thickness. *Tree Physiology*, **37** (7), 976-983, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx037>.
198. Pretzsch, H., Grams, T., Häberle, K.H., Pritsch, K., Bauerle, T. and Rötzer, T. 2020. Growth and mortality of Norway spruce and European beech in monospecific and mixed-species stands under natural episodic and experimentally extended drought. Results of the KROOF throughfall exclusion experiment. *Trees*, **34** (4), 957-970, <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01973-0>.
199. Prigoliti, M., Chiofalo, M.T., Petruzzellis, F., Lo Gullo, M.A. and Trifilò, P. 2023. Ecophysiological Behavior of *Fagus sylvatica* L. Growing at Its Southern Distribution Limit: Insights for Understanding the Fate of the European Beech under Warmer and Drier Growth Conditions. *Forests*, **14** (10), 2058, <https://doi.org/10.3390/f14102058>.
200. Prislán, P., Gričar, J., Čufar, K., de Luis, M., Merela, M. and Rossi, S. 2019. Growing season and radial growth predicted for *Fagus sylvatica* under climate change. *Climatic Change*, **153** (1), 181-197, <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02374-0>.
201. R, T.C. 2024 R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
202. Reinhardt-Imjela, C., Imjela, R., Bölscher, J. and Schulte, A. 2018. The impact of late medieval deforestation and 20th century forest decline on extreme flood magnitudes in the Ore Mountains (Southeastern Germany). *Quaternary International*, **475**, 42-53, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.12.010>.
203. Rita, A., Camarero, J.J., Colangelo, M., de Andrés, E.G. and Pompa-García, M. 2022. Wood Anatomical Traits Respond to Climate but More Individualistically as Compared to Radial Growth: Analyze Trees, Not Means. *Forests*, **13** (6), 956, <https://doi.org/10.3390/f13060956>.
204. Robson, T.M., Alia, R., Bozic, G., Clark, J., Forsteuter, M., Gomory, D. et al. 2011. *The timing of leaf flush in European beech (Fagus sylvatica L.) saplings*. Paper presented at the COST E52 Final Meeting.
205. Robson, T.M. and Garzón, M.B. 2018. Phenotypic trait variation measured on European genetic trials of *Fagus sylvatica* L. *Scientific Data*, **5** (1), 1-7, <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.149>.
206. Robson, T.M., Rasztovits, E., Aphalo, P.J., Alia, R. and Aranda, I. 2013. Flushing phenology and fitness of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances from a trial in La Rioja, Spain, segregate according to their climate of origin. *Agricultural and forest meteorology*, **180**, 76-85, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.008>.
207. Roibu, C.C., Palaghianu, C., Nagavciuc, V., Ionita, M., Sfecla, V., Mursa, A. et al. 2022. The Response of Beech (*Fagus sylvatica* L.) Populations to Climate in the Easternmost Sites of Its European Distribution. *Plants*, **11** (23), <https://doi.org/10.3390/plants11233310>.
208. Roibu, C.C., Popa, I., Kirchhefer, A.J. and Palaghianu, C. 2017. Growth responses to climate in a tree-ring network of European beech (*Fagus sylvatica* L.) from the eastern limit of its natural distribution area. *Dendrochronologia*, **42**, 104-116, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.02.003>.
209. Rose, L., Leuschner, C., Köckemann, B. and Buschmann, H. 2009. Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? *European Journal of Forest Research*, **128** (4), 335-343, <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0268-4>.

210. Royer-Tardif, S., Boisvert-Marsh, L., Godbout, J., Isabel, N. and Aubin, I. 2021. Finding common ground: Toward comparable indicators of adaptive capacity of tree species to a changing climate. *Ecology and Evolution*, **11** (19), 13081-13100, <https://doi.org/10.1002/ece3.8024>.
211. Rukh, S., Sanders, T.G.M., Krüger, I., Schad, T. and Bolte, A. 2023. Distinct Responses of European Beech (*Fagus sylvatica* L.) to Drought Intensity and Length—A Review of the Impacts of the 2003 and 2018–2019 Drought Events in Central Europe. *Forests*, **14** (2), 248, <https://doi.org/10.3390/f14020248>.
212. Sánchez-Gómez, D. and Aranda, I. 2024. Unveiling intra-population functional variability patterns in a European beech (*Fagus sylvatica* L.) population from the southern range edge: drought resistance, post-drought recovery and phenotypic plasticity. *Tree Physiol*, **44** (9), <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae107>.
213. Sansilvestri, R., Frascaria-Lacoste, N. and Fernández-Manjarrés, J.F. 2015. Reconstructing a deconstructed concept: Policy tools for implementing assisted migration for species and ecosystem management. *Environmental Science & Policy*, **51**, 192-201, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.04.005>.
214. Savolainen, O., Pyhäjärvi, T. and Knürr, T. 2007. Gene flow and local adaptation in trees. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, **38** (1), 595-619, <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095646>.
215. Schieber, B., Janík, R. and Snopková, Z. 2013. Phenology of common beech (*Fagus sylvatica* L.) along the altitudinal gradient in Slovak Republic (Inner Western Carpathians). *Journal of Forest Science*, **59** (4), 176-184.
216. Schueler, S. and Liesebach, M. 2015. Latitudinal population transfer reduces temperature sum requirements for bud burst of European beech. *Plant Ecology*, **216** (1), 111-122, <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0420-1>.
217. Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F. and Bräker, O.U. 1990. Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, **8**, 9-38.
218. Shapiro, S.S. and Wilk, M.B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete samples)†. *Biometrika*, **52** (3-4), 591-611, [10.1093/biomet/52.3-4.591](https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591).
219. Shen, C.-F. 1992. *A monograph of the genus Fagus Tourn. ex L.(Fagaceae)*. City University of New York.
220. Stănescu, V., Șofletea, N. and Popescu, O.C. 1997. *Flora forestiera lemnoasa a Romaniei*. Ceres.
221. Ste-Marie, C., A. Nelson, E., Dabros, A. and Bonneau, M.-E. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle*, **87** (6), 724-730, <https://doi.org/10.5558/tfc2011-089>.
222. Stojnić, S., Orlović, S., Ballian, D., Ivanković, M., Šijačić-Nikolić, M., Pilipović, A. *et al.* 2015a. Provenance by site interaction and stability analysis of European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances grown in common garden experiments. *Silvae Genetica*, **64** (4), 133-133, <https://doi.org/10.1515/sg-2015-0013>.
223. Stojnić, S., Orlović, S., Miljković, D., Galić, Z., Kebert, M. and von Wuehlisch, G. 2015b. Provenance plasticity of European beech leaf traits under differing environmental conditions at two Serbian

- common garden sites. *European Journal of Forest Research*, **134**, 1109-1125, <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0914-y>.
224. Stojnić, S., Orlović, S., Trudić, B., Kesić, L., Stanković, M. and Šijačić-Nikolić, M. 2016. Height and root-collar diameter growth variability of European beech provenances from Southeast Europe. *Topola*, **197-198**, 5-14.
225. Stojnic, S., Sass-Klaassen, U., Orlovic, S., Matovic, B. and Eilmann, B. 2013. Plastic growth response of European beech provenances to dry site conditions. *IAWA Journal*, **34** (4), 475 - 484, <https://doi.org/10.1163/22941932-00000038>.
226. Stojnić, S., Viscosi, V., Marković, M., Ivanković, M., Orlović, S., Tognetti, R. *et al.* 2021. Spatial patterns of leaf shape variation in European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances. *Trees*, **36** (1), 497-511, <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02224-6>.
227. Svenning, J.C., Normand, S. and Skov, F. 2008. Postglacial dispersal limitation of widespread forest plant species in nemoral Europe. *Ecography*, **31** (3), 316-326, <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.05206.x>.
228. Svenning, J.C. and Skov, F. 2007. Could the tree diversity pattern in Europe be generated by postglacial dispersal limitation? *Ecol Lett*, **10** (6), 453-460, <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01038.x>.
229. Șofletea, N. and Curtu, L. 2008. *Dendrologie*. 2 edn. Pentru viață: Brașov.
230. Team, Q. 2024 QGIS Geographic Information System. 3.34.3 Ed., QGIS Association, pp. Open Source Geospatial Foundation.
231. Thiel, D., Kreyling, J., Backhaus, S., Beierkuhnlein, C., Buhk, C., Egen, K. *et al.* 2014. Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. *European Journal of Forest Research*, **133** (2), 247-260, <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0750-x>.
232. Thompson, D. 2007 Provenances of beech best suited for Ireland. In *Coford Connects*, pp. 4-4.
233. Thuiller, W., Albert, C., Araújo, M.B., Berry, P.M., Cabeza, M., Guisan, A. *et al.* 2008. Predicting global change impacts on plant species' distributions: future challenges. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*, **9** (3-4), 137-152, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2007.09.004>.
234. Thurman, L.L., Stein, B.A., Beever, E.A., Foden, W., Geange, S.R., Green, N. *et al.* 2020. Persist in place or shift in space? Evaluating the adaptive capacity of species to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **18** (9), 520-528, <https://doi.org/10.1002/fee.2253>.
235. Tudoran, G.M. and Zotta, M. 2020. Adapting the planning and management of Norway spruce forests in mountain areas of Romania to environmental conditions including climate change. *Science of The Total Environment*, **698**, 133761-133761, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133761>.
236. Unterholzner, L., Stolz, J., van der Maaten-Theunissen, M., Liepe, K. and van der Maaten, E. 2024. Site conditions rather than provenance drive tree growth, climate sensitivity and drought responses in European beech in Germany. *Forest Ecology and Management*, **572**, 122308, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122308>.
237. Unterholzner, L., Stolz, J., van der Maaten-Theunissen, M., Liepe, K.J. and van der Maaten, E. 2025. Phenotypic plasticity and inter-individual variability in *Fagus sylvatica* L. xylem traits

- challenge assisted migration. *Science of The Total Environment*, **1002**, 180596, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180596>.
238. Urşanu, E.-A., Grigorescu, I., Dumitrică, C., Kucsicsa, G., Mitrică, B., Roznovietchi, I. *et al.* 2024. Long-term changes of agricultural land over the last century in Romania. The showcase of Romanian plain. *Anthropocene*, **48**, 100449, <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100449>.
239. Valladares, F., Sanchez-Gomez, D. and Zavala, M.A. 2006. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. *Journal of ecology*, **94** (6), 1103-1116, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01176.x>.
240. Vanhellefont, M., Sousa-Silva, R., Maes, S.L., Van den Bulcke, J., Hertzog, L., De Groote, S.R.E. *et al.* 2019. Distinct growth responses to drought for oak and beech in temperate mixed forests. *Science of The Total Environment*, **650**, 3017-3026, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.054>.
241. Vaníček, L. 2021. *Beech provenance trail in Sweden*. Thesis. SLU, Southern Swedish Forest Research Centre.
242. Vannoppen, A., Treydte, K., Boeckx, P., Kint, V., Ponette, Q., Verheyen, K. *et al.* 2020. Tree species diversity improves beech growth and alters its physiological response to drought. *Trees*, **34**, 1059-1073, <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01981-0>.
243. Vettori, C., Vendramin, G.G., Anzidei, M., Pastorelli, R., Paffetti, D. and Giannini, R. 2004. Geographic distribution of chloroplast variation in Italian populations of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, **109** (1), 1-9, <https://doi.org/10.1007/s00122-004-1609-9>.
244. Vitasse, Y. and Basler, D. 2013. What role for photoperiod in the bud burst phenology of European beech. *European Journal of Forest Research*, **132** (1), 1-8, <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0661-2>.
245. Vitasse, Y., Bresson, C.C., Kremer, A., Michalet, R. and Delzon, S. 2010. Quantifying phenological plasticity to temperature in two temperate tree species. *Functional ecology*, **24** (6), 1211-1218, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01748.x>.
246. Vitasse, Y., Delzon, S., Bresson, C.C., Michalet, R. and Kremer, A. 2009a. Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research*, **39** (7), 1259-1269, <https://doi.org/10.1139/X09-054>.
247. Vitasse, Y., Delzon, S., Dufrêne, E., Pontailier, J.-Y., Louvet, J.-M., Kremer, A. *et al.* 2009b. Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, **149** (5), 735-744, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.10.019>.
248. Vitasse, Y., François, C., Delpierre, N., Dufrêne, E., Kremer, A., Chuine, I. *et al.* 2011. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151** (7), 969-980, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.03.003>.
249. von Arx, G. and Carrer, M. 2014. ROXAS – A new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers. *Dendrochronologia*, **32** (3), 290-293, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.12.001>.

250. von Arx, G., Crivellaro, A., Prendin, A.L., Čufar, K. and Carrer, M. 2016. Quantitative Wood Anatomy—Practical Guidelines. *Frontiers in Plant Science*, **7** <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00781>.
251. Von Wuehlisch, G. 2004. *Series of international provenance trials of European beech*. Paper presented at the Proceedings from the 7th International Beech Symposium IUFRO Research Group.
252. Von Wuehlisch, G. 2008. European beech. *EUFORGEN Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use*.
253. Von Wuehlisch, G., Hansen, J.K., Mertens, P., Liesebach, M., Meierjohann, E., Muhs, H.-J. *et al.* 2008. *Variation among Fagus sylvatica and Fagus orientalis provenances in young international field trials*. Paper presented at the Proceedings from the 8th IUFRO International Beech Symposium" Ecology and Silviculture of Beech.
254. Von Wuehlisch, G., Krusche, D. and Muhs, H.J. 1995. Variation in temperature sum requirement for flushing of beech provenances. *Silvae Genetica*, **44** (5-6), 343-346.
255. Wang, T., O'Neill, G.A. and Aitken, S.N. 2010. Integrating environmental and genetic effects to predict responses of tree populations to climate. *Ecological Applications*, **20**, 153-163, <https://doi.org/10.1890/08-2257.1>.
256. White, T.L., Adams, W.T. and Neale, D.B. 2007. *Forest genetics*. Cabi.
257. Wickham, H. 2011. ggplot2. *Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics*, **3** (2), 180-185, <https://doi.org/10.1002/wics.147>.
258. Wood, S.N. 2017. *Generalized additive models: an introduction with R*. Chapman and Hall/CRC: New York.
259. Wortemann, R., Herbette, S., Barigah, T.S., Fumanal, B., Alia, R., Ducousso, A. *et al.* 2011. Genotypic variability and phenotypic plasticity of cavitation resistance in *Fagus sylvatica* L. across Europe. *Tree Physiology*, **31** (11), 1175-1182, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpr101>.
260. Wright, J. 1976. *Introduction to forest genetics*. Elsevier.