



Universitatea
Transilvania
din Braşov

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură şi Exploatare Forestiere

Ing. Emanuel STOICA

Variabilitatea genetică a duglasului [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)
Franco] în culturi comparative de provenienţe din România

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof. dr. ing. Alexandru Lucian CURTU

BRAŞOV, 2026

Mulțumiri

În realizarea acestei lucrări am avut privilegiul de a colabora cu persoane deosebite, care s-au remarcat nu doar prin profesionalismul și competența lor, ci și prin calitățile umane deosebite. Sprijinul, disponibilitatea și implicarea lor au contribuit în mod esențial la desfășurarea și finalizarea acestei cercetări, motiv pentru care le adresez sincere mulțumiri și întreaga mea recunoștință.

Îmi exprim întreaga recunoștință față de conducătorul de doctorat, Prof. dr. ing. Alexandru Lucian Curtu, decanul Facultății de Silvicultură și Exploatare Forestiere din Braşov, pentru deschiderea și încrederea cu care a acceptat să îmi ghideze întreg parcursul doctoral. Sprijinul său constant, disponibilitatea și răbdarea demonstrate de-a lungul anilor au avut un rol esențial în depășirea provocărilor specifice cercetării doctorale. Rigoarea științifică, claritatea îndrumării și vasta sa experiență profesională au contribuit decisiv la conturarea și finalizarea acestei teze, având totodată un impact major asupra formării mele academice și profesionale.

Cu profundă recunoștință și aleasă considerație, doresc să-i adresez mulțumiri sincere doamnei CS I dr. ing. Georgeta Mihai, pentru rolul fundamental pe care l-a avut în parcursul meu academic și în orientarea mea către cercetare. Colaborarea deosebit de frumoasă și constructivă, începută încă din anii de facultate, a reprezentat un sprijin constant și a stat la baza deschiderii mele către activitatea de cercetare. Prin încrederea acordată, dăruirea și generozitatea sa intelectuală, mi-a transmis nu doar rigoarea cercetării științifice, ci și valori esențiale ale profesiei, adesea sintetizate prin cuvintele sale: *„Silvicultura se practică pe teren”* și *„Valoarea unui cercetător științific nu se cuantifică doar prin rezultate teoretice, ci și prin experimentele pe care le instalează și prin ceea ce lasă în urmă pentru generațiile viitoare de cercetători”*. Îi sunt profund recunoscător pentru sprijinul permanent, răbdarea, rigoarea profesională și înțelegerea deosebită de care a dat dovadă pe parcursul întregului stagiul doctoral și nu numai.

De asemenea, doresc să îmi exprim sinceră recunoștință față de membrii comisiei de îndrumare – Prof. dr. Nicolae Șofletea, Prof. dr. Valeriu Norocel Nicolescu și CS I dr. ing. Georgeta Mihai – precum și față de întregul colectiv al Departamentului de Silvicultură din cadrul Universității Transilvania din Braşov.

Adresez mulțumiri domnului Prof. dr. Iosif Vorovencii pentru amabilitatea de a fi președintele comisiei de evaluare și susținere publică a tezei de doctorat, precum și domnișoarei Conf. dr. ing. Elena Ciocîrlan și domnilor Conf. dr. ing. Ciprian Palaghianu și Prof. dr. ing. Gabriel Duduman pentru bunăvoința de a accepta invitația de a face parte din această comisie.

Îmi exprim recunoștința față de conducerea Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, în special față de domnul Director General CS II dr. ing. Șerban Octavian Davidescu, domnul Director Științific CS I dr. ing. Nicolae Ovidiu Badea și doamna CS I dr. ing. Nicoleta Ecaterina

Apostol, pentru sprijinul constant acordat și pentru asigurarea bazei materiale indispensabile desfășurării în bune condiții și finalizării acestei cercetări.

Îmi exprim sincerele mulțumiri colegilor mei din colectivul de Genetică și Ameliorarea arborilor din cadrul INCDS „Marin Drăcea”, doamnelor ACS Paula Gârbacea, CS II dr. ing. Maria Ioana Pleșca, domnișoarelor ing. Lavinia Ifrim, CS III dr. Ioana Bala, tehn. Roxana Pătruța și, nu în ultimul rând, colegului CS III dr. ing. Alin Mădălin Alexandru. Totodată, mulțumiri și colegilor ACS Mihăiță Bîtcă, ACS Adrian Tudora, dr. ing. Virgil Scărlătescu, tehn. Ștefan Florin pentru sprijinul acordat la colectarea datelor de teren.

De asemenea, adresez sincere mulțumiri părinților mei, Gelu și Mirela, pentru tot sprijinul oferit și pentru încurajarea către educație și dezvoltare profesională, precum și prietenilor și tuturor celor care, chiar dacă nu sunt menționați în mod direct, mi-au oferit sprijin, încurajare și ajutor de-a lungul acestui parcurs.

Îi mulțumesc lui Dumnezeu pentru călăuzire, putere și răbdare dăruite pe parcursul acestui drum, pentru sprijinul nevăzut din momentele de încercare și pentru binecuvântarea de a ajunge până la finalizarea acestei etape importante din viața mea.

Cu o recunoștință aparte, îi mulțumesc soției mele, Miriam, pentru dragostea necondiționată, răbdarea, încurajarea și sprijinul emoțional constant, care mi-au fost alături pe tot parcursul acestui drum.

Autorul

CUPRINS

LISTA DE ABREVIERI.....	5
Introducere	7
1. STADIUL ACTUAL AL CUNOȘȚINȚELOR PRIVIND VARIABILITATEA DUGLASULUI ÎN CULTURI COMPARATIVE DE PROVENIENȚE	8
1.1. Caracterizarea generală a duglasului.....	8
1.1.1. Scurt istoric.....	8
1.1.2. Arealul natural și de cultură	8
1.1.3. Cerințe ecologice	9
1.1.4. Importanța speciei	10
1.2. Variabilitatea genetică a duglasului în culturile comparative de proveniențe.....	11
1.2.1. Culturile comparative de proveniențe	11
1.2.2. Culturi comparative de proveniențe de duglas la nivel mondial.....	12
1.2.3. Culturi comparative de proveniențe de duglas instalate în România	13
2. SCOP ȘI OBIECTIVE.....	14
3. MATERIAL ȘI METODA DE CERCETARE	15
3.1. Descrierea culturilor de proveniențe studiate.....	15
3.2. Regimul climatic al locurilor de testare.....	21
3.3. Măsurători și observații.....	21
3.4. Analizele statistice.....	22
4. REZULTATE ȘI DISCUȚII.....	29
4.1. Variabilitatea genetică a caracteristicilor cantitative în fiecare cultură comparativă.....	29
4.1.1. Diametrul la 1,30 m (DBH)	30
4.1.2. Înălțimea totală (HT)	31
4.1.3. Volumul mediu/arbore (VOL).....	32
4.1.4. Suprafața de bază (SB).....	33

4.1.5. Interacțiunea genotip × mediu pentru caracteristicile cantitative	34
4.1.6. Discuții privind caracteristicile cantitative	34
4.2. Variabilitatea genetică a caracteristicilor de calitate a lemnului și adaptative	35
4.2.1. Variabilitatea genetică a caracteristicilor de calitate a lemnului	37
4.2.1.1. Înălțimea elagată (PH)	37
4.2.1.2. Unghiul de inserție al ramurilor (BA)	39
4.2.1.3. Grosimea ramurilor (DB)	40
4.2.1.4. Numărul de ramuri (NB)	41
4.3. Variabilitatea genetică a caracteristicilor adaptative	42
4.3.1. Supraviețuirea (SV)	42
4.3.2. Indicele de zveltețe (SI)	43
4.3.3. Interacțiunea genotip × mediu pentru caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative	44
4.3.4. Discuții privind caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative	45
4.4. Selecția celor mai bune proveniențe cu ajutorul indicilor de selecție	45
4.4.1. Selecția proveniențelor în fiecare cultură comparativă, cu ajutorul indicelui MGDI	46
4.4.2. Selecția proveniențelor pe baza indicelui MTSI la nivelul culturilor comparative	49
4.4.3. Discuții asupra selecției multivariate cu indicii de selecție MGDI și MTSI	51
4.5. Corelațiile fenotipice dintre principalele caracteristici analizate	51
4.6. Corelațiile dintre principalele caracteristici analizate și gradientii geografici de origine ai proveniențelor	55
4.6.1. Discuții asupra corelațiilor fenotipice și geografice	56
4.9. Funcțiile de transfer la condițiile climatice ale locului de testare	57
4.9. Funcțiile de răspuns la condițiile climatice ale locului de testare	64
4.9.1. Discuții asupra funcțiilor de transfer și răspuns	71
5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	73
5.1. Concluzii	73
5.3. Diseminarea rezultatelor	80

5.4. Direcții viitoare de cercetare	81
Bibliografie.....	82

LISTA DE ABREVIERI

DBH – diametrul la 1,30 m;

HT – înălțimea totală;

PH – înălțimea până la prima ramură verde sau elagată;

VOL – volum mediu/arbore;

SB – suprafața de bază;

SF – forma trunchiului;

NB – număr de ramuri;

DB – grosimea ramurilor;

BA – unghiul de inserție al ramurilor;

SV – supraviețuirea;

FI – înfurcirea;

SI – indicele de zveltețe;

U.M. – unitatea de măsură;

ns – nesemnificativ;

LRTp – testul raportului de probabilitate pentru efectul proveniențelor;

Vp – varianța efectului aleator al proveniențelor;

Vr – varianța reziduală;

MS rep – media sumelor de pătrate pentru repetiție;

P × L – proveniență × localitate;

MGIDI – indicele distanței genotip-ideotip pentru mai multe caracteristici (Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index);

MTSI – indicele de stabilitate pentru mai multe caracteristici (Multi-Trait Stability Index);

BIO8 – temperatura medie a celui mai umed trimestru;

SPIO3 – indicele standardizat de precipitații calculat pe 3 luni;

SPIO1 – indicele standardizat de precipitații pe 1 lună;

SPIO9 – indicele standardizat de precipitații calculat pe 9 luni;

BIO3 – indicele de izotermalitate;

SPEIO6 – indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 6 luni;

SPEIO8 – indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 8 luni;

BFFP – zilele fără îngheț;

BIO6 – temperatura minimă a celei mai reci luni;

BIO13 – precipitațiile din cele mai umede luni;

BIO19 – precipitațiile din cel mai rece trimestru;

BIO9 – temperatura medie a trimestrului celui mai secetos;

SPEIO2 – indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 2 luni;

SPEIO3 – indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 3 luni;

BIO12 – precipitațiile medii anuale;

SPEIO5 – indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 5 luni;

SHM – indicele estival de căldură-umiditate;

AHM – indicele anual de căldură-umiditate;

AIC – Criteriul informațional Akaike (Akaike Information Criterion);

VIF – Factorul de inflație al varianței (Variance Inflation Factor).

Introducere

Arborii au un rol esențial în ecosistemele terestre, contribuind la echilibrul ecologic și bunăstarea umană prin servicii de aprovizionare și de reglare (Negulescu și Ciumac 1959; Beugnon et al. 2025; Waring et al. 2020).

Schimbările climatice au determinat creșterea temperaturilor și intensificarea fenomenelor extreme, în special a secetei, cu efecte negative asupra vitalității, productivității și distribuției speciilor forestiere, precum și asupra diversității genetice (IPCC 2022; IPCC 2023). În România se estimează o creștere a temperaturii medii, iar capacitatea arborilor de adaptare depinde de mecanisme precum plasticitatea fenotipică și de nivelul diversității genetice, esențială pentru reziliența ecosistemelor (Cheval et al. 2017; Dumitrescu și Birsan 2015; Alberto et al. 2013; Bonamour et al. 2019; Kelleher et al. 2015; Alfaro et al. 2014). Schimbările climatice vor influența procesele fiziologice și arealul speciilor, ceea ce face necesară utilizarea testelor de proveniență și selecția proveniențelor adaptate, precum și introducerea unor specii alternative, cum este duglasul (Leites și Benito 2023; Moser et al. 2025).

Speciile forestiere alohtone, introduse în Europa încă din secolele XVII–XVIII, ocupă în prezent aproximativ 4% din suprafața forestieră, iar duglasul se situează printre cele mai importante rășinoase alohtone (Camenen et al. 2026; van Loo și Dobrowolska 2019). Datorită creșterii rapide, calității lemnului și rezistenței la stres, duglasul este considerat o specie promițătoare și o alternativă la speciile autohtone mai vulnerabile la schimbările climatice (Kjaer et al. 2014; Bauhus et al. 2013; Ennos et al. 2019; Thurm et al. 2018; Konnert și Bastien 2019).

Cercetarea vizează evaluarea variabilității genetice a proveniențelor de duglas testate în România, prin analiza caracteristicilor de creștere, calitate a lemnului și adaptabilitate, în vederea identificării proveniențelor performante și stabile pentru programe de ameliorare forestieră și împădurire.

1. STADIUL ACTUAL AL CUNOȘȚINȚELOR PRIVIND VARIABILITATEA DUGLASULUI ÎN CULTURI COMPARATIVE DE PROVENIENȚE

1.1. Caracterizarea generală a duglasului

1.1.1. Scurt istoric

Ecosistemele forestiere din Europa Centrală au fost puternic influențate de activitatea umană încă din preistorie, prin reducerea suprafețelor împădurite și modificarea compoziției speciilor, în favoarea celor cu valoare economică ridicată (Essl et al. 2011). Promovarea unor specii precum molidul (*Picea abies*) a dus la extinderea arealului acestuia, însă monoculturile s-au dovedit vulnerabile la factori perturbatori, precum vântul și atacurile de boli și dăunători, ceea ce evidențiază necesitatea transformării lor în arborete mixte pentru creșterea rezilienței (Carr et al. 2025; Greiser et al. 2025; Štraus și Bončina 2025; Feng et al. 2022).

Strategiile moderne de gestionare forestieră urmăresc diversificarea compoziției speciilor și introducerea controlată a unor specii alohtone mai adaptate la schimbările climatice, caracterizate prin toleranță la secetă, creștere rapidă și lemn de calitate (Pötzelsberger et al. 2020). În acest context, numeroase specii alohtone au fost introduse în Europa în secolele XIX și XX, majoritatea provenind din America de Nord, acestea ocupând în prezent aproximativ 4% din suprafața forestieră europeană (Alizoti et al. 2022; Bindewald 2021; Dimitrova et al. 2022; Schmidt et al. 2016; Brus et al. 2019).

Duglasul [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] s-a remarcat prin importanța sa economică și ecologică, datorită creșterii rapide, calității lemnului și rezistenței la factori biotici și abiotici (Henin et al. 2019; Remeš et al. 2020; Pâques 2013). Specia a fost descoperită în America de Nord la sfârșitul secolului al XVIII-lea și introdusă în Europa în 1827, demonstrând un potențial ridicat de creștere, ceea ce a favorizat extinderea sa ulterioară (Menzies 1923; Haralamb 1963; Fletcher și Samuel 2010). Inițial utilizat în scop ornamental, duglasul a fost ulterior plantat pe scară largă, inclusiv în monoculturi, devenind o specie importantă pentru reîmpăduriri în Europa Occidentală (van Loo și Dobrowolska 2019). În România, introducerea duglasului a început la sfârșitul secolului al XIX-lea, iar extinderea plantațiilor a continuat în prima jumătate a secolului XX, ajungând la suprafețe semnificative, în special în Banat, Crișana și Oltenia, unde condițiile s-au dovedit favorabile (Lăzărescu și Ionescu 1964; Popa-Costea 1973).

1.1.2. Arealul natural și de cultură

Duglasul prezintă cea mai largă răspândire latitudinală dintre coniferele comerciale din America de Nord, arealul său având o formă de „V” inversat, ceea ce reflectă o adaptabilitate ridicată la diverse condiții climatice și ecologice (Lavender și Hermann 2014). Ramura vestică corespunde varietății de coastă – *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*, caracterizată prin creștere rapidă și adaptare la condiții umede, iar ramura estică varietății de interior – *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*, adaptată la climate

continentale (Lavender și Hermann 2014). Această distribuție evidențiază capacitatea speciei de a ocupa habitate variate, de la climate oceanice la cele montane continentale (Hermann și Lavender 1990; Lavender și Hermann 2014). Arealul natural se întinde pe aproximativ 18,8 milioane de hectare, majoritatea în SUA și Canada (Fletcher și Samuel 2010; Lavender și Hermann 2014).

Introducerea duglasului în Europa a avut loc între 1827 și 1850, inițial în Regatul Unit, urmată de extinderea rapidă în numeroase țări europene în a doua jumătate a secolului al XIX-lea, inclusiv în România (van Loo și Dobrowolska 2019). În prezent, specia ocupă aproximativ 0,8 milioane de hectare în Europa, fiind a doua specie de rășinoase alohtonă ca răspândire și utilizată atât în arborete pure, cât și în amestecuri (Haralamb 1967; Brus et al. 2019; Ronch et al. 2016).

În România, duglasul a fost introdus în 1887, iar extinderea semnificativă a plantațiilor a avut loc după 1956, odată cu importul de semințe și implementarea unor programe de împădurire, ajungând în perioada 1960–1970 la peste 23.000 ha plantate (Popa-Costea 1973; Avram 1960). În prezent, suprafața ocupată este estimată la aproximativ 7.300 ha, reprezentând circa 0,1% din fondul forestier național (INS 2025).

1.1.3. Caracterele morfologice

Duglasul aparține genului *Pseudotsuga*, familia Pinaceae, și are o origine veche, fosilele genului datând din Oligocen (Stănescu 1977; Stănescu 1979; OECD 2008; Șofletea și Curtu 2007; Schorn și Thompson 1998). În vestul Americii de Nord sunt recunoscute două varietăți principale: varietatea de coastă (*Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*) și varietatea de interior (*Pseudotsuga menziesii* var. *glauca*), diferențiate prin caracteristici morfologice precum culoarea acelor și dimensiunea conurilor (Frothingham 1909; Stănescu 1977; Stănescu 1979; Clinovschi 2005; Șofletea și Curtu 2007).

Duglasul este o specie de rășinoase de talie mare, sempervirescentă, cu dimensiuni impresionante, putând depăși 80 m înălțime și 4–5 m în diametru și având o longevitate frecventă de peste 500 de ani (Ronch et al. 2016; Hermann și Lavender 1990). Tulpina este dreaptă, cu coroană conică la tinerețe și mai îngustă la maturitate, iar scoarța evoluează de la netedă, subțire la groasă și adânc brăzdată.

Acele sunt persistente, plate și dispuse într-un singur plan, iar conurile pendente, cu bractee trilobate, reprezintă un caracter distinctiv al genului (Clinovschi 2005; Franklin et al. 1981). Semințele sunt aripate; maturarea are loc în septembrie, iar fructificația începe în general între 30 și 40 de ani, fiind influențată de condițiile climatice (Clinovschi 2005; Hermann și Lavender 1990; Șofletea și Curtu 2007). Dispersia semințelor se realizează prin vânt, pe distanțe relativ reduse (Clinovschi 2005). Sistemul radicular este relativ superficial comparativ cu alte conifere, dezvoltându-se în stratul organic sau superficial al solului (Minore 1979; Peterson și Arbaugh 2011). Lemnul are densitate medie și proprietăți mecanice foarte bune, fiind apreciat pentru rezistență, durabilitate și elasticitate, ceea ce îl face valoros pentru utilizări în construcții și în industria lemnului.

1.1.3. Cerințe ecologice

Duglasul [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] este o specie cu o adaptabilitate ecologică remarcabilă, ocupând o gamă largă de condiții climatice și edafice în arealul său natural din America de Nord, de la climate maritime umede la cele continentale montane (Fulé și Covington 1999; González-Elizondo et al. 2005; Lavender și Hermann 2014). Diferențele climatice sunt determinate de latitudine, altitudine și distanța față de Oceanul Pacific, iar varietatea de interior prezintă o rezistență mai ridicată la temperaturi scăzute comparativ cu varietatea de coastă (Hermann și Lavender 1990; Lavender și Hermann 2014). Specia este supusă unor factori limitativi precum înghețul, seceta, vântul, zăpada și incendiile, dintre care înghețul este cel mai dăunător, influențând distribuția și diferențierea ecologică a varietăților (Hermann și Lavender 1990).

În Europa, duglasul este bine adaptat la climatul temperat umed, utilizând eficient apa și demonstrând o bună adaptare la condiții de secetă estivală. Studiile indică o sensibilitate redusă la schimbările climatice și chiar un potențial de creștere a productivității (Levanič și Štraus 2022; Nicolescu et al. 2023; Paligi et al. 2024; Huang et al. 2017; Vitali et al. 2018).

În România, specia se dezvoltă optim în zonele de deal și montane inferioare, la altitudini de până la 800–1.000 m, cu cerințe moderate față de umiditate și precipitații anuale de peste 600 mm, fiind mai rezistentă la secetă decât bradul și molidul (Stănescu 1979; Clinovschi 2005; Haralamb 1967; Negulescu și Săvulescu 1957; Purcean și Pașcovschi 1954; Mihai et al. 2022).

Duglasul preferă soluri profunde, bine aerate, cu reacție slab acidă, dar poate crește pe o varietate largă de tipuri de sol, datorită toleranței la deficitul de umiditate și fertilitate redusă. Factorii principali care influențează productivitatea sunt disponibilitatea apei și conținutul de azot (Lavender și Hermann 2014; Nicolescu et al. 2023; Čater 2021; Eckhart et al. 2019; Novák et al. 2018; Spellmann et al. 2015).

Distribuția altitudinală variază în funcție de varietate și latitudine, fiind controlată în principal de temperatură și umiditate. Varietatea de interior ocupă altitudini mai mari decât cea de coastă, iar în Europa specia se dezvoltă optim între 300–900 m, cu extinderi până la 1.300–1.600 m în anumite regiuni (Silen 1978; Frothingham 1909; Kirkwood 1922; Costello et al. 2009; Pearson 1931; Nicolescu et al. 2023). În România, duglasul prezintă o amplitudine altitudinală largă, între 120 și 1.550 m, fiind prezent în condiții variate de temperatură și precipitații (Nicolescu et al. 2023; Popa-Costea 1973).

Din punct de vedere ecologic, duglasul are o toleranță moderată la umbră, fiind mai tolerant în stadiile tinere, dar devenind mai exigent față de lumină odată cu maturizarea. Regenerarea optimă are loc în condiții de lumină moderată și acoperire redusă a coronamentului (Hermann și Lavender 1990; Nicolescu et al. 2023; Schütz et al. 2015; Thomas et al. 2022; Frei et al. 2022; Stokes et al. 2020).

1.1.4. Importanța speciei

Duglasul [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] este o specie forestieră valoroasă, caracterizată prin creștere rapidă, adaptabilitate ecologică și lemn de calitate superioară, fiind considerată un substitut promițător pentru coniferele autohtone afectate de schimbările climatice (Pâques 2013; Ronch et al. 2016; Konnert și Bastien 2019; Drewett 2015; Rais et al. 2014; Podrázský et al. 2020). Datorită

productivității ridicate și proprietăților fizico-mecanice superioare, lemnul de duglas depășește adesea molidul și pinul în ceea ce privește densitatea și rezistența, fiind comparabil cu laricele (Zeidler et al. 2022; Giagli et al. 2019; Pollet et al. 2017). Este utilizat pe scară largă în construcții și industria lemnului, sub formă de cherestea, grinzi, panouri, traverse, elemente de tâmplărie și alte produse, datorită rezistenței mecanice, durabilității și stabilității dimensionale (Pâques 2013; Ross 2021).

Specia contribuie și la îmbunătățirea caracteristicilor solului și a ecosistemelor forestiere, fiind rezistentă la secetă și capabilă să realizeze creșteri superioare față de alte specii, cu 15–50% mai mari decât la molid și fag și chiar mai ridicate față de pin și stejar (Kupka et al. 2013; Podrázský et al. 2014; Podrázský et al. 2016; Podrázský et al. 2020; Eilmann și Rigling 2012; Montwé et al. 2015; Konnert et al. 2019). Din punct de vedere economic, lemnul de duglas este valorificat la prețuri mai ridicate decât ale altor rășinoase europene, fiind în medie cu aproximativ 25% mai scump decât molidul, ceea ce evidențiază importanța sa în sectorul forestier european (Henin et al. 2019; Pulkrab et al. 2014; Experts Forestiers de Belgique 2022).

1.2. Variabilitatea genetică a duglasului în culturile comparative de proveniențe

1.2.1. Culturile comparative de proveniențe

Există două metode principale de separare a influențelor genetice de cele ale mediului: culturile comparative și tehnologiile genetice moleculare. Culturile comparative presupun cultivarea materialului genetic provenit din diferite proveniențe, descendente sau clone în condiții similare de mediu, astfel încât diferențele observate să fie atribuite factorilor genetici (White et al. 2007). Proveniența reprezintă originea geografică a semințelor, iar descendenții și clonele sunt rezultatul reproducerii sexuate sau vegetative, permițând transmiterea genotipului (Breed et al. 2018; Enescu 1973).

Scopul principal al culturilor comparative este separarea componentei genetice de cea de mediu și identificarea surselor valoroase de semințe. Caracteristicile analizate sunt, în general, trăsături cantitative, controlate poligenic și influențate de interacțiunea genotip x mediu (Enescu 1973; Enescu 1982). Aceste caractere pot fi clasificate în funcție de modul de cuantificare, valoarea adaptativă, dependența de mediu și controlul genetic (White et al. 2007).

Culturile comparative permit evaluarea comportamentului proveniențelor în raport cu factorii de mediu și sunt esențiale pentru înțelegerea variabilității genetice și a adaptării speciilor forestiere. Deoarece observațiile directe în populațiile naturale sunt limitate, experimentele controlate oferă o bază solidă pentru estimarea influențelor genetice și pentru fundamentarea practicilor silvice (White et al. 2009; Bailey et al. 2021). Aceste studii contribuie la analiza plasticității fenotipice, a adaptării și a răspunsului la condițiile climatice, fiind utilizate pentru selecția proveniențelor valoroase și optimizarea managementului forestier (Schwinning et al. 2022). Cercetările asupra proveniențelor au o istorie de peste 260 de ani, primele experimente fiind realizate în Franța în secolul al XVIII-lea (Matyas 1994; FAO 2025; Langlet 1971).

În prezent, culturile comparative sunt utilizate pentru studierea adaptării locale, ecotipurilor, potențialului adaptativ, plasticității fenotipice, interacțiunii genotip × mediu, stabilității creșterii, parametrilor genetici și selecției proveniențelor superioare, precum și pentru evaluarea impactului schimbărilor climatice și orientarea managementului forestier (Halbritter et al. 2018; McDonough MacKenzie et al. 2018; Korecký et al. 2021; Peuke et al. 2002; Chauvin et al. 2019; Mihai et al. 2018; Čortan et al. 2019; Mátyás et al. 2023; Mihai et al. 2022; Poupon et al. 2023; Di Fabio et al. 2024; Hayatgheibi et al. 2019; Zhang et al. 2022; Kurjak et al. 2024; Nabais et al. 2018; Park și Rodgers 2023).

1.2.2. Culturi comparative de proveniențe de duglas la nivel mondial

Primele cercetări privind variația geografică a duglasului au fost realizate în Pacificul de Nord-Vest, fiind urmate de primele experimente „common garden” inițiate în 1912, care au evidențiat diferențe genetice între populațiile de coastă (Lavender și Hermann 2014; Silen 1978). Studiile ulterioare au confirmat existența variației geografice și diferențele dintre varietățile de coastă și de interior, primele fiind mai productive, iar cele din interior mai rezistente la condiții climatice severe (Ching 1965; White și Ching 1985; Gamble et al. 1996).

Programele extinse de testare, inclusiv cele din Canada și cele inițiate de Serviciul Forestier al Columbiei Britanice, au evidențiat variabilitatea genetică ridicată și diferențierea ecotipică a speciei (Illingworth și St. Pierre 1975; Ying 1990). Aceste rezultate au stat la baza programului internațional IUFRO, început la sfârșitul anilor 1960, care a urmărit evaluarea globală a proveniențelor și standardizarea metodologiei experimentale (Lavender și Hermann 2014; Fletcher și Barner 1978).

În cadrul programului IUFRO au fost testate 182 de proveniențe din întregul areal natural, utilizând un design experimental comun, cu măsurători periodice privind creșterea, supraviețuirea și rezistența la factori climatici (Enescu 1984; Fletcher și Barner 1987; Lavender și Hermann 2014). Rezultatele au evidențiat superioritatea proveniențelor de coastă în condiții oceanice și a celor de interior în condiții continentale, precum și existența unor modele clinale de variație genetică (Fletcher și Barner 1987). Pe baza acestor cercetări au fost stabilite zone de proveniență recomandate pentru diferite regiuni, iar utilizarea necorespunzătoare a unor surse semincere a condus la performanțe suboptimale în plantații (Lavender și Hermann 2014; Konnert et al. 2019).

La nivel european, numeroase țări au participat la testarea proveniențelor și la programe de ameliorare. În general, rezultatele au indicat performanțe superioare ale populațiilor locale sau ale proveniențelor de coastă din Washington și Oregon, în funcție de condițiile climatice specifice fiecărei regiuni (Pâques 2013; Thompson și Pfeifer 1995; Ducci et al. 2003; Mejnartowicz și Szmidt 1978; Mejnartowicz 1976; Merlo 2002; Fletcher și Samuel 2010). Aceste studii au contribuit semnificativ la dezvoltarea programelor de ameliorare genetică, la selecția proveniențelor adaptate și la fundamentarea strategiilor de utilizare a materialului forestier de reproducere în Europa.

1.2.3. Culturi comparative de proveniențe de duglas instalate în România

În România, primele teste de pepinieră pentru duglas au inclus 61 de proveniențe din arealul natural și din plantații europene, materialul fiind utilizat pentru instalarea a cinci culturi comparative între 1977 și 1980, destinate evaluării adaptabilității, creșterii și calității lemnului (Enescu 1984). În prezent, doar trei dintre aceste culturi mai există.

Rezultatele la vârsta de 18 ani au indicat o bună adaptare a proveniențelor din Idaho și din vestul statului Washington, precum și a proveniențelor artificiale românești, reflectată prin valori ridicate ale supraviețuirii (Moise 1998). Cele mai bune performanțe de creștere au fost înregistrate la proveniențele din Washington și Oregon, în special din zonele de joasă altitudine, dar și proveniențele locale au avut rezultate favorabile (Moise 1998). Analiza a evidențiat o variabilitate genetică semnificativă și efecte importante ale interacțiunii genotip $\times$ mediu, proveniențele de coastă având în general performanțe superioare, însă nu în toate condițiile de testare.

După etapa inițială de introducere și testare, nu a mai fost dezvoltat un program de ameliorare genetică pentru duglas în România. Studiul de față urmărește relansarea acestui program, prin valorificarea culturilor comparative existente și aplicarea unor metode moderne de selecție multivariată, în vederea inițierii unui nou ciclu de ameliorare și a instalării de plantațe semincere.

2. SCOP ȘI OBIECTIVE

Scopul cercetărilor din prezenta teză de doctorat este evaluarea variabilității genetice a duglasului [*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco] pe baza rezultatelor obținute în culturile comparative de proveniențe din România, în vederea selectării celor mai productive și adaptate proveniențe în contextul preconizatelor schimbări climatice.

Obiectivele specifice sunt:

1. Evaluarea variabilității genetice interpopulaționale a proveniențelor de duglas în raport cu principalele caracteristici cantitative, de calitate a lemnului și adaptative;
2. Identificarea proveniențelor cu performanțe superioare și adaptabilitate ridicată, în vederea propunerii acestora ca surse de semințe testate în România;
3. Evaluarea interacțiunii dintre genotip $\times$ mediu și stabilitatea spațio-temporală a performanțelor proveniențelor de duglas;
4. Selecția proveniențelor cu performanțe ridicate și stabile, care să constituie surse genetice pentru programele de ameliorare și împădurire, cu ajutorul indicilor de selecție multivariată MGIDI și MTSI.
5. Analiza corelațiilor fenotipice între principalele caracteristici analizate;
6. Analiza corelațiilor între caracteristicile analizate și gradientii geografici, precum și cu variabilele climatice din locul de origine;
7. Analiza relației dintre performanța proveniențelor de duglas și diferențele climatice dintre locul de origine și locul de testare, prin utilizarea funcțiilor de răspuns și de transfer.

3. MATERIAL ȘI METODA DE CERCETARE

3.1. Descrierea culturilor de proveniențe studiate

Dintre cele cinci culturi comparative de duglas instalate în România, doar trei mai sunt în prezent, fiind amplasate la Aleșd (județul Bihor), Făget (județul Timiș) și Padeș (județul Gorj), toate instalate în anul 1977, în timp ce cele de la Bocșa Montană și Târgul Lăpuș au fost dezafectate (Figura 2B). Dispozitivul experimental utilizat este grilajul pătrat parțial balansat de tip 8×8 , cu trei repetiții, fiecare parcelă unitară conținând 25 de puiți plantați la distanțe de 2 m.

Proveniențele testate provin din SUA, Canada, Europa și România, acoperind o variabilitate largă latitudinală, longitudinală și altitudinală (Figura 1; Figura 2A; Figura 2B). În total, au fost testate 55 de proveniențe la Aleșd, 49 la Făget și 48 la Padeș, dintre care 38 sunt comune în toate cele trei locații (Tabel 2).

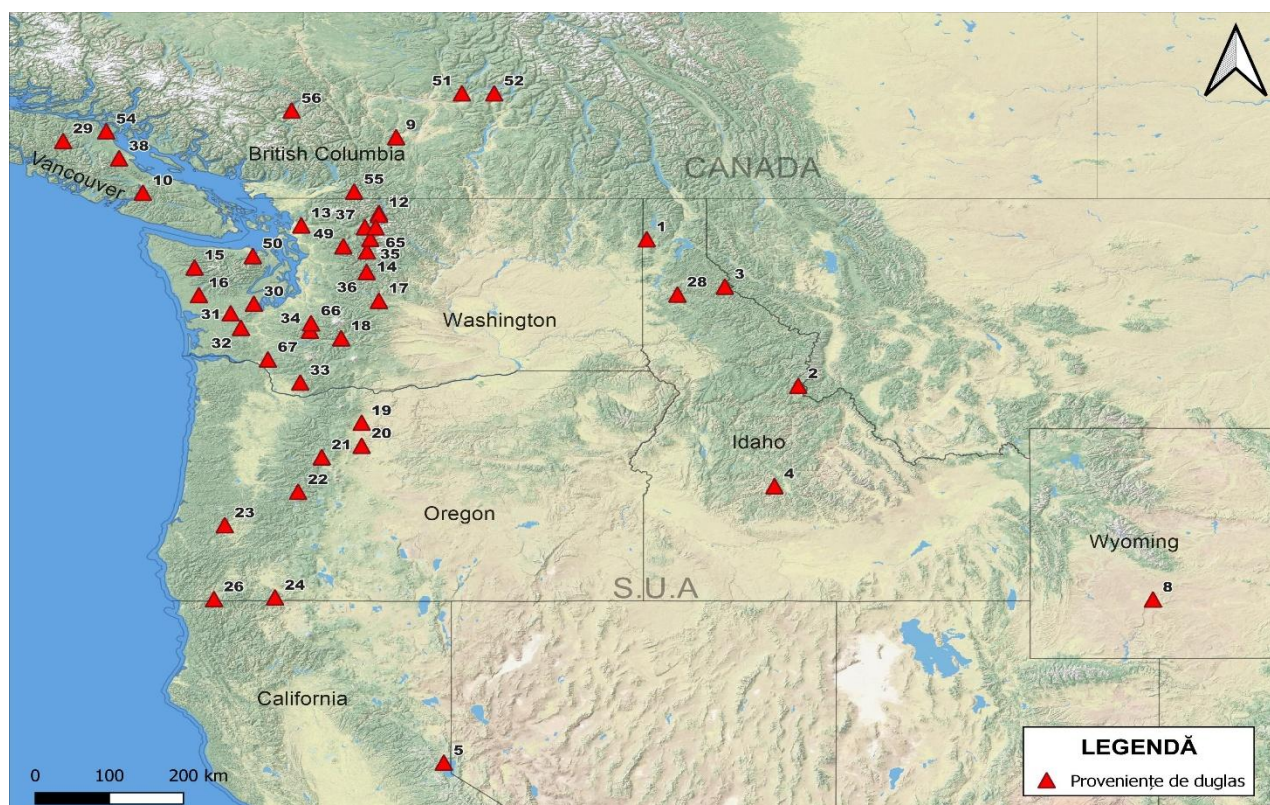


Fig. 1 Originea proveniențelor de duglas din SUA și Canada testate în România

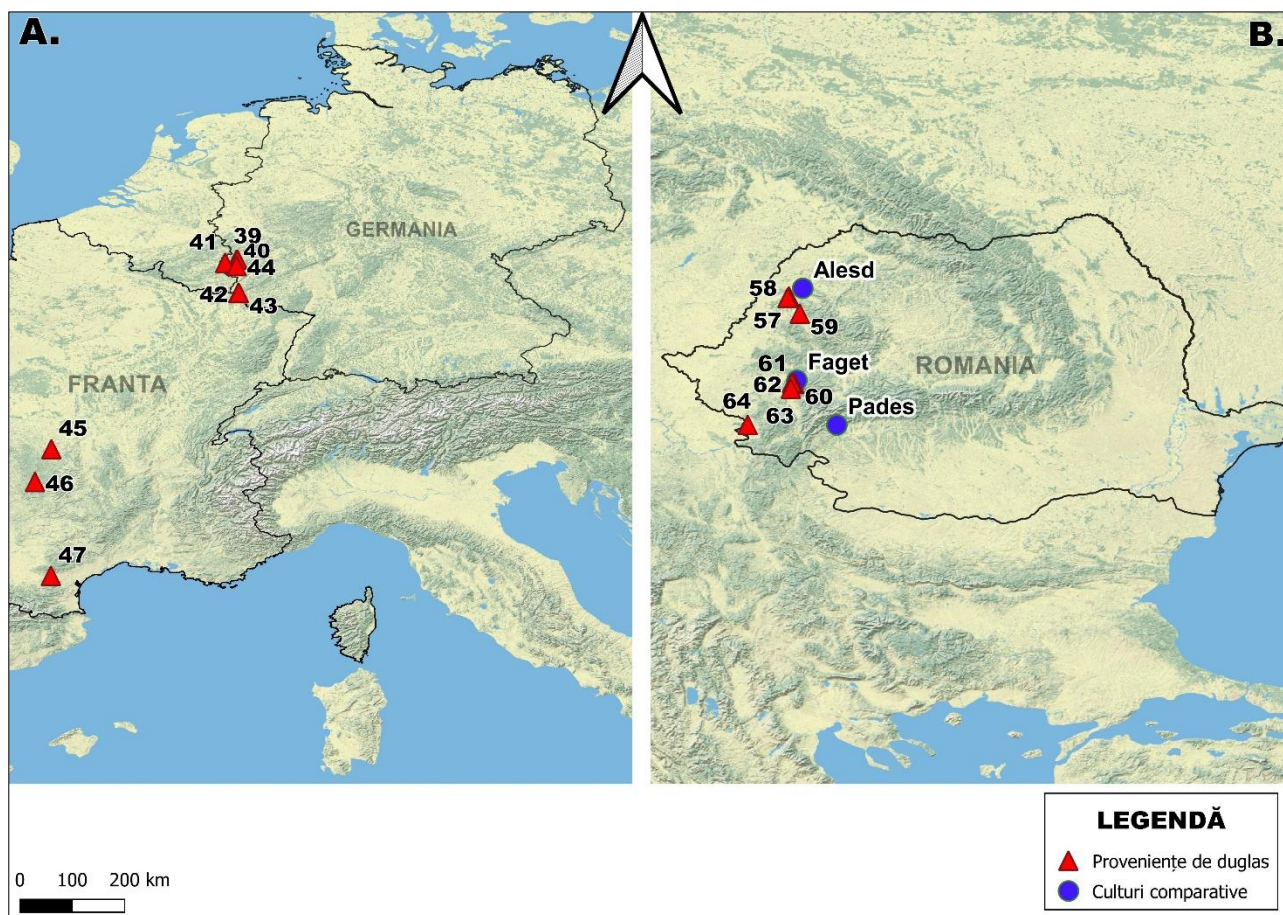


Fig. 2 Localizarea proveniențelor de duglas din Germania și Franța – panou A, respectiv a proveniențelor testate în România – panou B.

Tab. 1 Culturile comparative de proveniențe de duglas instalate în anul 1977

Cultura	Aleşd	Făget	Padeș
Bonitatea stațiunii	5242 – Deluros de făgete Bm, eutricambosol edafic mijlociu cu <i>Asperula</i> – <i>Asarum</i>	6153 – Deluros de cvercete, cu șleauri de deal fără fag, Bs/m, luvosol și faeoziom greic, edafic mare	5243 – Deluros de făgete Bs, eutricambosol edafic mare cu <i>Asperula</i> – <i>Asarum</i>
Tipul de pădure	4214 – Făget de deal cu floră de mull de productivitate mijlocie	5111 – Gorunet normal cu floră de mull (s)	4211 – Făget de deal cu floră de mull (s)
Tipul de sol	3101 – Eutricambosol tipic	2201 – Luvosol tipic	3101 – Eutricambosol tipic
Regiunea de proveniență	E2 – Munții Apuseni Vestici	D2 – Munții Banatului: Țarcu – Poiana Ruscă	C2 – Carpații Meridionali Sudici

Panta (°)	15	26	25
Expoziția	V	E	SE
Altitudine (m)	670	330	720
Lat N	47.15°	45.76°N	45.09°
Long E	22.33°	22.29°	22.89°
Temperatura medie anuală (°C)	5,5	10,4	7,8
1977-2023			
Temperatura medie anuală (°C) din sezonul de vegetație mai – septembrie	15,3	17,9	15,4
Precipitațiile medii anuale (mm)	860	852	975
1977-2023			
Precipitațiile medii anuale (mm)	450	455	502
1977-2023 din sezonul de vegetație mai – septembrie			

Tab. 2 Proveniențele de duglas testate în cele trei culturi comparative

Nr. crt	Cod prov.	Denumire proveniență	Țara/Statul	Lat. N	Long. E	Altd. (m)
1	1	Idaho (var. <i>glauca</i>)	SUA	48°00'	-116°95'	780
2	2	Idaho (var. <i>glauca</i>)	SUA	47°48'	-113°61'	1389
3	3	Idaho (var. <i>glauca</i>)	SUA	47°52'	-115°68'	1356
4	4	Boise (var. <i>glauca</i>)	SUA	44°00'	-115°00'	1829
5	5	El Dorado	SUA, California	39°17'	-120°08'	1387
6	8	South End Pass	SUA, Wyoming	50°07'	-120°85'	900
7	9	Merrit	Canada, Columbia Britanică	50°04'	-120°51'	900
8	10	Franklin River	Canada, Columbia Britanică	49°06'	-124°46'	150
9	11	Duncan	Canada, Columbia Britanică	48°75'	-121°17'	450
10	12	Diablo Dam – Whatcom	SUA, Washington	48°72'	-121°17'	450
11	13	Skagit – Sedro Wooley	SUA, Washington	48°53'	-122°31'	60
12	14	Snohomish –Sloan Creek	SUA, Washington	48°08'	-121°18'	650
13	15	Jefferson – Hoh River	SUA, Washington	47°48'	-123°58'	240
14	16	Grays Harbour – Humptulips	SUA, Washington	47°19'	-123°54'	140
15	17	Kittias – CleElum	SUA, Washington	47°13'	-121°07'	640
16	18	Lewis – Packwood	SUA, Washington	46°34'	-121°42'	300
17	19	Pine Grove	SUA, Oregon	45°06'	-121°23'	730
18	20	Benton – Corvallis,	SUA, Oregon	44°42'	-121°23'	76
19	21	Marion Forks	SUA, Oregon	44°30'	-122°00'	1060
20	22	Lane – Oakridge	SUA, Oregon	43°54'	-122°22'	880

21	23	Rosenburg	SUA, Oregon	43°19'	-123°30'	280
22	24	Jakson – Ashland	SUA, Oregon	42°05'	-122°39'	1500
23	26	Siskiyou – Hawkinsville,	SUA, California	41°47'	-123°40'	1060
24	28	Chatcolet, S. (var. <i>glauca</i>)	SUA, Idaho	47°20'	-116°30'	700
25	29	Vancouver	Canada, Columbia Britanică	50°00'	-126°00'	150
26	30	Hoodsport	SUA, Washington	47°10'	-123°03'	300
27	31	Elma	SUA, Washington	47°00'	-123°30'	300
28	32	Pe Ell-Sand Creek, Mc. Donald	SUA, Washington	46°45'	-123°15'	200
29	33	Yacolt – Spotted Deernt – Battle G.	SUA, Washington	45°48'	-122°20'	600
30	34	Vicinity, Mineral Walker Road	SUA, Washington	46°40'	-12°15'	500
31	35	Darrington – Texas Pond	SUA, Washington	48°18'	-121°15'	280
32	36	Skycomish – Beckler Peak	SUA, Washington	47°42'	-121°20'	500
33	37	Concrete – Presentin Creek	SUA, Washington	48°30'	-121°20'	110
34	38	Oyster R.	Canada, Columbia Britanică	49°42'	-125°08'	400
35	39	Daun Ost – Abt. 39 A – Rezervație	Germania	50°12'	06°50'	520
36	40	Daun Ost – Abt. 46 C.	Germania	50°11'	06°52'	500
37	41	Prüm Süd – Abt. 79 C	Germania	50°13'	06°25'	380
38	42	Wittlich West – Abt. 3B	Germania	49°47'	06°54'	230
39	43	Wittlich West – Abt. 1B	Germania	49°47'	06°55'	230
40	44	Manderscheid – Abt. 36	Germania	50°06'	06°50'	400
41	45	Poinsat – Puy de Dome	Franța	46°04'	02°43'	750
42	46	Les Farges III	Franța	45°32'	02°07'	665
43	47	Moussans II	Franța	43°26'	02°42'	750

44	49	Darrington III	SUA, Washington	48°10'	-121°40'	200
45	50	Clallam Country – Louella	SUA, Washington	48°00'	-123°04'	330
46	51	Pinetan	Canada, Columbia Britanică	50°50'	-119°50'	830
47	52	Shuswape Lake	Canada, Columbia Britanică	50°50'	-119°20'	530
48	54	Morton Lake	Canada, Columbia Britanică	50°10'	-125°20'	150
49	55	Centre Creek – Chilliwack Valley	Canada, Columbia Britanică	49°07'	-121°30'	460
50	56	Devine – Dist.	Canada, Columbia Britanică	50°32'	-122°28'	380
51	57	Pădurea Neagră	România	47°03'	22°17'	500
52	58	Piatra Albă	România	47°01'	22°15'	580
53	59	Toplița	România	46°46'	22°20'	330
54	60	Aninoasa Mare	România	45°43'	22°15'	550
55	61	Vârful Dăii	România	45°44'	22°13'	825
56	62	Vârful Dăii	România	45°44'	22°13'	420
57	63	Nădrăgel	România	45°43'	22°13'	560
58	64	Anina – Buhui	România	45°10'	21°55'	650
59	65	Sedro Woolley	SUA, Washington	48°30'	-122°10'	720
60	66	Elbe	SUA, Washington	46°50'	-122°10'	720
61	67	Kelso	SUA, Washington	46°12'	-122°50'	609

3.2. Regimul climatic al locurilor de testare

În cultura comparativă Aleșd, temperatura medie anuală este de 5,5 °C, iar totalul anual al precipitațiilor este de 860 mm, cu un maxim în lunile mai–iulie; în cultura comparativă Făget, temperatura medie anuală este de 10,4 °C, iar totalul anual al precipitațiilor este de 852 mm, cu un maxim în lunile aprilie–iulie; în cultura comparativă Padeș, temperatura medie anuală este de 7,8 °C, iar totalul anual al precipitațiilor este de 975 mm, cu un maxim în lunile aprilie–iulie.

3.3. Măsurători și observații

Măsurătorile și observațiile au fost realizate în anul 2024, la 47 de ani de la instalarea culturilor comparative, fiind analizate caracteristici cantitative, de calitate a lemnului și adaptative.

Caracteristicile analizate au fost clasificate după cum urmează:

- I. **CANTITATIVE:** diametrul la 1,30 m (DBH) , înălțimea totală (HT), volumul mediu/arbore (VOL), suprafața de bază (SB).
- II. **DE CALITATE A LEMNULUI:** înălțimea până la prima ramură verde sau elagată (PH), forma trunchiului (SF), număr de ramuri (NB), grosimea ramurilor (DB), unghiul de inserție al ramurilor (BA), înfurcirea (FI).
- III. **ADAPTATIVE:** supraviețuirea (SV), indicele de zveltețe (SI).

Metodologia de evaluarea a caracteristicilor cantitative, de calitate a lemnului și adaptative a fost preluată și adaptată din protocolul *TreeBreedex* (*TreeBreeding for Resilience and Efficiency*) (Fulvio Ducci et al. 2012).

Tab. 3 Metodologia de evaluare a caracteristicilor cantitative, de calitate a lemnului și adaptative

Caracteristică	U.M./Indice	Instrument de măsurare/Descriere indice
i. CANTITATIVE		
DBH	cm	Clupa Haglof ($\pm 0,1$ cm)
HT	m	Vertex IV ($\pm 0,1$ m)
VOL	m ³	Ecuația 5
SB	m ² ha ⁻¹	Ecuația 6
ii. DE CALITATE A LEMNULUI		
PH	m	Vertex IV ($\pm 0,1$ m)
SF	5	Tulpină dreaptă, fără curburi

	4	Tulpină relativ dreaptă (curburi slabe, 1-2)
	3	Curbură ușoară până la moderată în direcții diferite (≥ 3 curburi)
	2	Curbură moderată sau accentuată (1-2 curburi)
	1	Tulpină foarte curbată (≥ 3 curburi severe)
NB		Numărarea ramurilor din primul verticil verde
DB	1	Diametrul ramurilor < 2 cm
	2	Diametrul ramurilor între 2-5 cm
	3	Diametrul ramurilor > 5 cm
BA	1	Unghi $< 90^\circ$
	2	Unghi $\approx 90^\circ$
	3	Unghi $> 90^\circ$
FI	4	Neînfurcit
	3	Înfurcit în treimea superioară
	2	Înfurcit la mijlocul tulpinii
	1	Înfurcit în treimea inferioară
iii. Adaptative		
SV		% arbori vii din 25 de arbori plantați inițial/proveniență
SI	%	Ecuția 7

Notă: U.M. – unitatea de măsură, DBH – diametrul la 1,30 m, HT – înălțimea totală, VOL – volumul mediu/arbore, SB – suprafața de bază, PH – înălțimea elagată, SF – forma trunchiului, NB – număr de ramuri, DB – grosimea ramurilor, BA – unghiul de inserție al ramurilor, FI – înfurcirea, SV – supraviețuirea, SI – indicele de zveltețe.

3.4. Analizele statistice

Analiza variabilității genetice pentru fiecare caracteristică a fost realizată pentru fiecare cultură comparativă, precum și la nivelul tuturor culturilor.

1. Analiza variabilității genetice la nivel de cultură

La nivelul fiecărei culturi (Aleșd, Făget și Padeș), s-a urmărit evidențierea diferențelor între proveniențe și estimarea varianței acestora, utilizând un model liniar mixt, adaptat după modelul propus de Nanson, unde proveniența a fost considerată factor aleator, iar repetiția drept factor fix (Nanson 2004).

$$Y_{ijk} = \mu + P_j + R_k + P_j \times R_k + e_{ijk} \quad (1)$$

unde:

Y_{ijk} este valoarea observată a caracteristicilor (DBH, TH, VOL, SB, PH, SF, NB, DB, BA, FI, SV, SI),

μ este media generală,

P_j este efectul provenienței j ,

R_k este efectul repetiției k ,

$P_j \times R_k$ este interacțiunea proveniență $\times$ repetiție,

e_{ijk} este termenul erorii asociate cu arborele ijk .

2. Analiza variabilității genetice la nivelul culturilor

Pe lângă evaluarea separată în fiecare loc de testare, s-a efectuat și o analiză la nivelul celor trei locuri de testare (Aleșd, Făget și Padeș). Scopul acestei analize a fost de a evidenția variabilitatea genetică între proveniențe și de a estima impactul interacțiunii proveniență $\times$ localitate asupra caracteristicilor analizate (Nanson 2004).

Pentru această analiză, s-a utilizat un model liniar mixt, în care efectul provenienței, precum și interacțiunea proveniență $\times$ cultură au fost considerate factori aleatori, iar efectul cultură a fost tratat ca factor fix:

$$Y_{ijk} = \mu + C_i + P_j + R_k + C_i \times P_j + e_{ijk} \quad (2)$$

unde:

Y_{ijk} este valoarea observată a caracteristicilor (DBH, TH, VOL, SB, PH, SF, NB, DB, BA, FI, SV, SI),

μ este media generală,

C_i este efectul culturii i ,

P_j este efectul provenienței j ,

R_k este efectul repetiției k ,

$C_i \times P_j$ este interacțiunea proveniență $\times$ cultură,

e_{ijk} este termenul erorii asociate cu arborele ijk .

Această analiză a fost esențială întrucât a facilitat atât separarea varianței atribuite factorilor genetici și de mediu, cât și evaluarea interacțiunilor dintre aceștia. Analiza variabilității genetice la nivelul culturilor comparative a fost realizată pe baza celor 38 de proveniențe comune.

Calculul modelelor liniare mixte, precum și testarea semnificației efectelor incluse, au fost realizate utilizând pachetul *lmer* (Kuznetsova, et al. 2020), în programul R (R Core Team 2024).

3. Indicii de selecție multivariată (MGIDI și MTSI)

Pentru evaluarea performanței și stabilității proveniențelor de *douglas* s-au utilizat doi indici de selecție multivariată, recent introduși în programele de ameliorare a arborilor:

i) **MGIDI** (*Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index*) (Olivoto și Nardino 2021) – aplicat în fiecare cultură comparativă, cu scopul de a selecta proveniențele cu performanțe superioare în raport cu un genotip ideal (ideotip).

ii) **MTSI** (*Multi-Trait Stability Index*) (Olivoto et al. 2019) – aplicat la nivelul tuturor locurilor de testare, pentru a evalua performanța și stabilitatea proveniențelor în condiții ecologice diferite.

3.1. Calculul MGIDI

MGIDI a fost calculat prin parcurgerea următoarelor etape:

1. *Recalcularea caracteristicilor* – toate caracteristicile au fost rescalate pe o scară comună de la 0-100. În cazul caracteristicilor unde se urmărește maximizarea valorilor, maximum a fost transformat în 100 și minimum în 0. Pentru caracteristicile unde se urmărește minimizarea valorii, transformarea a fost inversată, astfel încât valoarea minimă a fost atribuită scorului 100, iar valoarea maximă scorului 0.

2. *Analiza factorială* – pe baza valorilor transformate s-a realizat o analiză factorială, cu scopul de a grupa caracteristicile corelate în factori comuni și de a estima scorurile factoriale pentru fiecare proveniență. Această etapă reduce dimensionalitatea și minimizează efectul coliniarității între caracteristici.

3. *Definirea ideotipului* – a fost stabilit un genotip ipotetic (ideotip) caracterizat prin scorul de 100 pentru toate caracteristicile analizate, reprezentând modelul ideal spre care tinde selecția.

4. *Calculul distanței* – pentru fiecare proveniență s-a calculat distanța euclidiană față de ideotip, obținându-se indicii MGIDI. Proveniențele cu valori mai mici ale acestui indice au fost considerate mai apropiate de ideotip și implicit mai valoroase pentru selecție.

Ecuția folosită este următoarea:

$$MGIDI_i = \left[\sum_{j=1}^f (y_{ij} - y_j)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

unde:

$MGIDI_i$ = indicele distanței dintre genotip și fenotip pentru proveniența i ,

y_{ij} = scorul provenienței i pentru factorul j ,

y_i = scorul ideotipului pentru factorul j ,

f = numărul de factori extrași.

Intensitatea selecției pentru MGIDI a fost stabilită la 20%, ceea ce corespunde selectării a 11 proveniențe din cultura Aleșd (55 testate), 10 din cultura Padeș (48 testate) și 10 din cultura Făget (49 testate).

Cu cât valoarea MGIDI asociată proveniențelor este mai mică, cu cât aceasta se află mai aproape de ideotipul definit și, implicit, prezintă valori ale caracteristicilor analizate mai apropiate de obiectivele urmărite. În acest fel, indicele permite o ierarhizare a proveniențelor, integrând simultan informația provenită din mai multe caracteristici și reducând riscul ca selecția să fie influențată de o singură variabilă. Proveniențele cu MGIDI scăzut pot fi considerate genotipuri candidate pentru utilizarea în programe de ameliorare și pentru recomandări privind materialul forestier de reproducere.

3.2. Calcul MTSI

MTSI a fost calculat prin parcurgerea următoarelor etape:

1. *Calculul WAASB (Weighted Average of Absolute Score)* – pentru determinarea stabilității celor 38 de proveniențe comune în cele trei locuri de testare, utilizând modele liniare mixte. Valorile WASSB și valorile caracteristicilor analizate au fost transformate pe o scară comună de 0-100.

2. *Calculul indicelui WASSBY* – care combină stabilitatea (WASB) și performanța medie ($\bar{Y}$) a proveniențelor. Indicele de selecție a fost 20 %.

3. *Definirea ideotipului* – similar cu MGIDI, dar în acest caz ideotipul a fost caracterizat prin scorul maxim (100) atât pentru performanță, cât și pentru stabilitate.

4. *Calculul distanței euclidiene* – pentru fiecare proveniență, s-a estimat o distanță față de ideotip, rezultatul reprezentând valoarea MTSI:

$$MTSI_i = \left[\sum_{j=1}^f (F_{ij} - F_j)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

unde:

$MTSI_i$ = the multi trait stability index pentru proveniența i ,

F_{ij} = scorul provenienței i ,

F_j = scorul ideotipului,

f = numărul de factori extrași.

Astfel, proveniențele cu valori mai mici ale MTSI sunt considerate cele mai aproape de ideotip, demonstrând o combinație optimă între performanță și stabilitate.

Calcululele pentru determinarea indicilor MGDI și MTSI au fost efectuate în programul R, utilizând pachetul *metan* (Olivoto și Lúcio 2020).

Corelațiile dintre caracteristicile cantitative, de calitate a lemnului și adaptative, precum și corelațiile acestora cu gradientii geografici de origine ale proveniențelor au fost evaluate utilizând coeficientul de corelație Pearson, în cadrul fiecărei culturi comparative. Analiza presupune o distribuție cât mai apropiată de normalitate și cuantifică intensitatea relațiilor pe un interval cuprins între - 1 (corelație negativă) și +1 (corelație pozitivă), valoarea 0 indicând absența unei asocieri liniare. Matricele de corelație au fost ilustrate grafic prin corelograme, generate cu ajutorul pachetului *corrplot* (Wei și Simko 2021) în programul R. Variabilele geografice – latitudinea (°N), longitudinea (°E) și altitudinea (m deasupra nivelului mării) au fost determinate pe baza coordonatelor proveniențelor. Diagramele climatice aferente culturilor comparative, corespunzătoare perioadei 1977-2023, au fost realizate prin utilizarea pachetului *climato* (Guijarro și Guijarro 2019) în programul R.

Pentru calculul **volumului arborelui** a fost utilizată următoarea ecuație de regresie (Giurgiu 2004):

$$\log v = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log^2 d + a_3 \log h + a_4 \log_2 h \quad (5)$$

unde:

d = diametrul de bază al arborelui (cm);

h = înălțimea arborelui (m);

v = volumul arborelui (m³).

Coeficienții de regresie utilizați în Ecuația 5 sunt cei corespunzători speciei duglas verde:

$a_0 = -4,29910$;

$a_1 = 1,90710$;

$a_2 = 0,02841$;

$a_3 = 1,01819$;

$a_4 = -0,055894$.

Suprafața de bază (m²) a fost calculată la nivel de arbore utilizând Ecuația 6:

$$SB = \frac{\pi}{4} \times DBH^2 \quad (6)$$

unde:

DBH = diametrul la 1,30 m;

- valorile individuale au fost însumate pentru determinarea suprafeței de bază la nivel de proveniență;
- valorile la nivel de proveniență au fost ulterior exprimate la hectar (m^2ha^{-1}).

Indicele de zveltețe (%) a fost calculat la nivel de arbore utilizând Ecuația 7 (Nicolescu 2016):

$$SI = \frac{HT}{DBH} \times 100 \quad (7)$$

unde:

HT = înălțimea totală (m);

DBH = diametrul la 1,30 m.

Funcțiile de răspuns și transfer au fost dezvoltate folosind modelele de regresie multiplă, incluzând termeni liniari și de ordinul doi pentru variabilele climatice (Wang et al. 2006). Modelul general a avut forma:

$$z = a + b \cdot x^2 + c \cdot y$$

unde:

z = caracteristica analizată (DBH, HT, SV);

a, b, c = coeficienții de regresie;

x, y = variabilele climatice.

Funcțiile de răspuns descriu relația dintre performanța proveniențelor și variabilele climatice ale locului de origine, în timp ce *funcțiile de transfer* au cuantificat efectul diferențelor climatice dintre originea proveniențelor și locurile de testare asupra caracteristicilor analizate (Wang et al. 2006).

Etapele pentru construirea *funcțiilor de transfer* au fost:

1. Analiza a fost realizată doar cu proveniențele din SUA prezente în fiecare loc de testare (Aleșd, Făget și Padeș).
2. Pentru fiecare proveniență au fost extrase valorile parametrilor climatici ale locului de origine din baza de date ClimateDT (Marchi et al. 2024) pentru perioada 1901-1977, iar pentru fiecare cultură, climatul locului de testare pe baza variabilelor climatice corespunzătoare perioadei 1977-2023.
3. Variabilele de transfer au fost calculate ca diferența între climatul locului de testare și climatul locului de origine al proveniențelor:

$$\Delta C = C_{test} - C_{origine}$$

4. Variabilele candidate au fost supuse unui screening univariat (Zuur et al. 2010), iar selecția predictorilor s-a realizat pe baza semnificației statistice a coeficienților de corelație R^2 ($p \leq 0,05$, $p \leq 0,01$, și $p \leq 0,001$), a criteriului *Akaike* (AIC) (Akaike 1974) și a absenței coliniarității între predictorii, evaluată prin *Variance Inflation Factor* (VIF) (Craney și Surles 2002; Thompson et al. 2017).
5. Pentru fiecare caracteristică (DBH, HT și SV) au fost ajustate inițial modele de regresie multiplă cu termeni liniari. Ulterior, forma optimă a modelului a fost evaluată prin testarea includerii termenilor de ordinul doi (quadratici) pentru variabilele climatice incluse. Caracterul quadratic al modelului a fost confirmat atunci când termenul pătrat a îmbunătățit semnificativ calitatea ajustării, evaluată prin AIC, creșterea coeficientului de determinare ajustat (R^2_{adj}) și semnificația statistică a coeficienților, menținând în același timp coliniaritatea redusă între predictorii (VIF).
6. *Funcțiile de transfer* finale au fost definite prin relația (Wang et al. 2006):

$$z = a + b \cdot \Delta x + c \cdot (\Delta x)^2 + d\Delta y + \varepsilon$$

unde:

z = caracteristica analizată (DBH, HT și SV);

$\Delta x, \Delta y$ = distanțele climatice de transfer;

a, b, c, d = coeficienții de regresie;

ε = eroarea reziduală.

7. Modelele au fost utilizate pentru a evidenția efectele transferului climatic asupra performanței proveniențelor.

Pentru funcțiile de răspuns au fost urmate aceleași etape metodologice enumerate mai sus, cu următoarele diferențe:

1. Predictorii climatici au fost definiți pe baza variabilelor climatice care caracterizează locurile de origine.
2. Modelele au descris relația directă dintre performanța proveniențelor în fiecare loc de testare și climatul locului de origine, fără a analiza efectul diferențelor climatice dintre origine și locul de testare.
3. În urma analizei multivariate, au fost selectați predictorii climatici pentru fiecare caracteristică analizată, iar funcțiile de răspuns finale au fost definite prin modele cu un predictor sau doi predictorii incluzând termeni liniari și, unde a fost cazul, termeni quadratici.

Analizele statistice și reprezentările grafice au fost realizate în programul R, utilizând pachetul *car* (Fox și Weisberg 2019) și *ggplot2* (Wickham 2016).

4. REZULTATE ȘI DISCUȚII

4.1. Variabilitatea genetică a caracteristicilor cantitative în fiecare cultură comparativă

Analiza datelor obținute după aproape cinci decenii de la instalarea culturilor comparative a permis evidențierea unor diferențe semnificative între proveniențele de duglas testate în România. Rezultatele reflectă atât efectele genetice, cât și cele de mediu, evidențiind modul în care proveniențele de duglas reacționează diferit la condițiile locale (Tabelul 4).

Tab. 4 Rezultatele modelului linear pentru caracteristicile cantitative analizate în fiecare cultură comparativă

Cultura comparativă	Caracteristică	LRTp	Vp	Vr	MS rep	Media $\pm$ SD
Aleșd	DBH	23,16 ***	7,23 (11%)	60,77 (89%)	80,66 ^{ns}	35,9 $\pm$ 8,18
	HT	29,67 ***	3,36 (15%)	19,68 (85%)	13,32 ^{ns}	30,2 $\pm$ 4,71
	VOL	18,53 ***	0,06 (10%)	0,57 (90%)	0,25 ^{ns}	1,43 $\pm$ 0,78
	SB	19,27 ***	2,42 (10%)	21,11 (90%)	20,11 ^{ns}	51,2 $\pm$ 4,79
Făget	DBH	8,27 **	2,87 (5%)	56,16 (95%)	565,59 ***	28,8 $\pm$ 7,75
	HT	12,80 ***	2,01 (8%)	24,73 (92%)	923,91 ***	29,6 $\pm$ 5,31
	VOL	9,07 **	0,01 (3%)	0,34 (97%)	5,65 ***	0,93 $\pm$ 0,60
	SB	8,92 **	0,68 (5%)	12,07 (95%)	131,31 ^{ns}	34,8 $\pm$ 3,68
Padeș	DBH	2,89 ^{ns}	1,93 (4%)	50,89 (96%)	0,31 ^{ns}	34,7 $\pm$ 7,25
	HT	18,97 ***	1,59 (9%)	15,29 (91%)	20,03 ^{ns}	28,8 $\pm$ 4,1
	VOL	6,57 *	0,21 (37%)	0,36 (63%)	0,05 ^{ns}	1,29 $\pm$ 0,62
	SB	3,30 ^{ns}	0,63 (4%)	15,69 (96%)	0,31 ^{ns}	42,7 $\pm$ 4,03

Notă: Niveluri de semnificație: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); ^{ns} – nesemnificativ ($p > 0,05$); LRTp – testul raportului de probabilitate pentru efectul proveniențelor; Vp – varianța efectului aleator al proveniențelor; Vr – varianța reziduală; MS rep – media sumelor de pătrate pentru repetiție; DBH – diametrul la 1,30 m; HT – înălțimea totală; VOL – volumul mediu/arbore, SB – suprafața de bază.

În cultura comparativă Aleșd, efectul provenienței a fost foarte semnificativ pentru toate caracteristicile analizate (DBH, HT, VOL, SB), explicând 10–15% din varianța totală, în timp ce varianța reziduală a avut o pondere de 85–90%. Efectul repetiției nu a fost semnificativ ($p > 0,05$).

În cultura comparativă Făget, proveniența a avut un efect semnificativ pentru DBH, VOL și SB și foarte semnificativ pentru HT, contribuind cu 3–8% la varianța totală, restul fiind explicat de varianța reziduală (92–97%). Efectul repetiției a fost semnificativ pentru DBH, HT și VOL, dar nesemnificativ pentru SB.

În cultura comparativă Padeș, efectul provenienței nu a fost semnificativ pentru DBH și SB, dar a fost semnificativ pentru HT și VOL, contribuind cu 4–37% la varianța totală, în timp ce varianța reziduală a reprezentat 63–96%. Efectul repetiției nu a fost semnificativ pentru niciuna dintre caracteristici.

4.1.1. Diametrul la 1,30 m (DBH)

Valorile medii ale DBH pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 3.

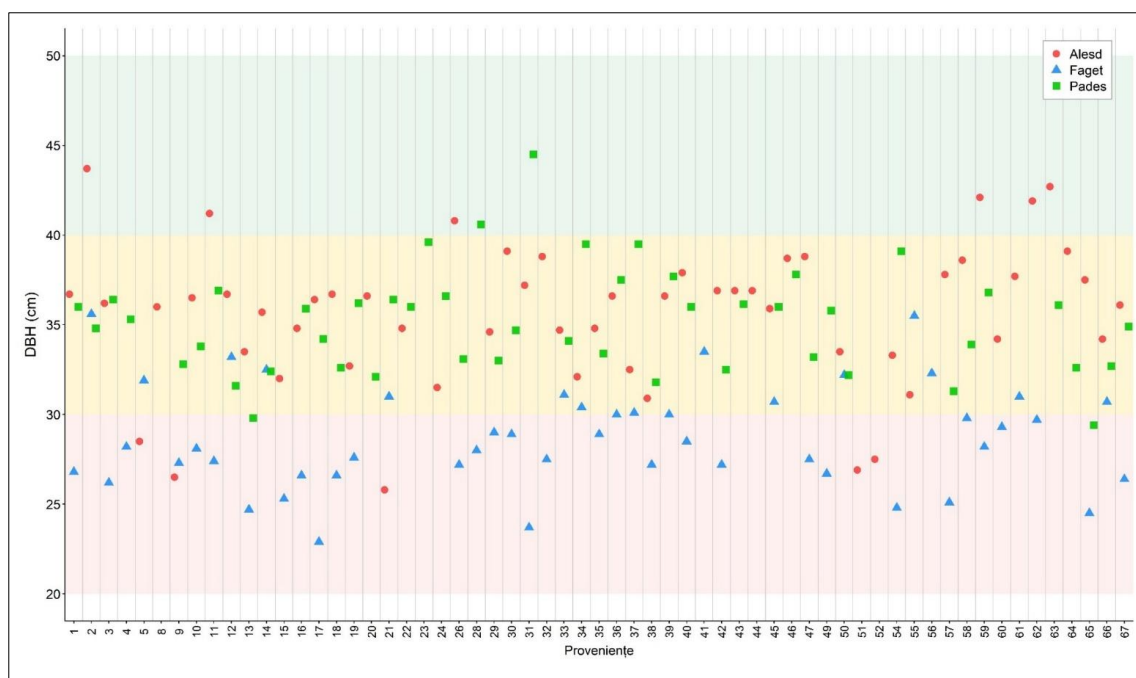


Fig. 3 Variația diametrul la 1,30 m a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, analizând performanțele DBH, în topul clasamentului se situează proveniențele 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 63 – Nădrăgel, RO; 59 – Toplița, RO; 62 – Vârful Dăii, RO; 11 – Duncan, CA și 26 – Siskiyou – Hawkinsville, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește DBH, au fost reprezentate de proveniențele 21 – Marion Forks, SUA; 9 – Merritt, SUA și 51 – Pinetan, CA (Figura 3).

În cultura comparativă Făget, analizând performanțele DBH, în topul clasamentului se situează proveniențele 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 55 – Centre Creek – Chilliwack Valley, CA; 41 – Prüm Süd – Abt. 79 C, DE; 12 – Diablo Dam – Whatcom, SUA și 14 – Snohomish – Sloan Creek, SUA. Proveniențele cu performanțele cele mai reduse, în ceea ce privește DBH, au fost reprezentate de proveniențele 17 – Kittitas – Cle Elum, SUA; 31 – Elma, SUA și 65 – Sedro Wooley, SUA (Figura 3).

În cultura comparativă Padeș, analizând performanțele DBH, în topul clasamentului se situează proveniențele 31 – Elma, SUA; 28 – Chatcolet, S., (var. *glauca*), SUA; 23 – Rosenberg, SUA; 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA și 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA. Proveniențele cu performanțele cele mai reduse, în ceea ce privește DBH, au fost reprezentate de proveniențele 65 – Sedro Wooley, SUA; 13 – Skagit – Sedro Wooley, SUA și 57 – Pădurea Neagră, RO.

În ceea ce privește media DBH la nivel de cultură, aceasta a fost de 35,9 cm la Aleșd, urmată de 34,7 cm la Padeș, iar pe ultimul loc s-a situat Făget, cu 28,8 cm.

4.1.2. Înălțimea totală (HT)

Valorile medii ale HT pentru proveniențele de douglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 4.

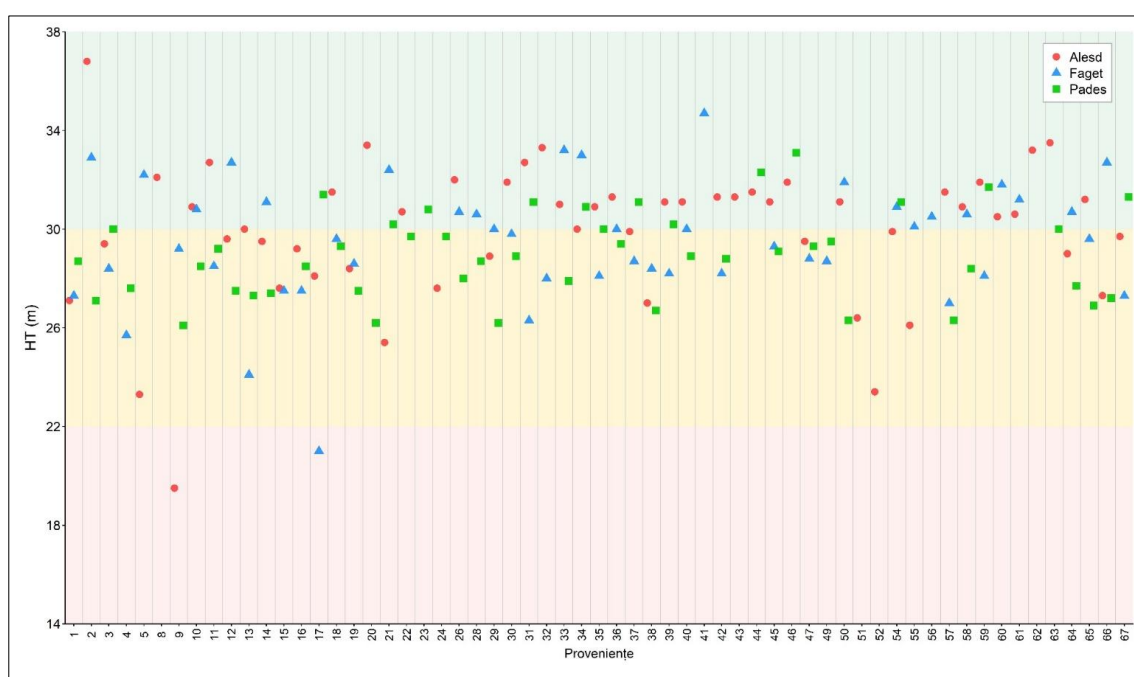


Fig. 4 Variația înălțimii totale a proveniențelor de douglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, analizând performanțele HT, în topul clasamentului se situează proveniențele 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 63 – Nădrăgel, RO; 20 – Benton – Corvallis, SUA; 32 – Pe Ell – Sand Creek, Mc. Donald, SUA și 62 – Vârful Dăii, RO. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește HT, au fost reprezentate de proveniențele 9 – Merritt, CA; 5 – El Dorado, SUA și 52 – Shuswap Lake, CA (Figura 4).

În cultura comparativă Făget, analizând performanțele HT, în topul clasamentului se situează proveniențele 41 – Prüm Süd – Abt. 79 C, DE; 33 – Yacolt – Spotted Deernt – Battle G., SUA; 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA; 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA și 12 – Diablo Dam – Whatcom, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește HT, au fost reprezentate de

proveniențele 17 – Kittitas – Cle Elum, SUA; 13 – Skagit – Sedro Woolley, SUA și 4 – Boise (var. *glauca*), SUA (Figura 4).

În cultura comparativă Padeș, analizând performanțele HT, în topul clasamentului se situează proveniențele 46 – Les Farges III, FR; 44 – Manderscheid – Abt. 36 B2, DE; 59 – Toplița, RO; 17 – Kittitas – Cle Elum, SUA și 67 – Kelso, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește HT, au fost reprezentate de proveniențele 9 – Merritt, CA; 29 – Vancouver, CA și 20 – Benton – Corvallis, SUA (Figura 4).

În ceea ce privește media HT la nivel de cultură, aceasta a fost de 30,2 m la Aleșd, urmată de 29,6 m la Făget, iar pe ultimul loc s-a situat Padeș, cu 28,8 m .

4.1.3. Volumul mediu/arbore (VOL)

Valorile medii ale VOL pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 5.

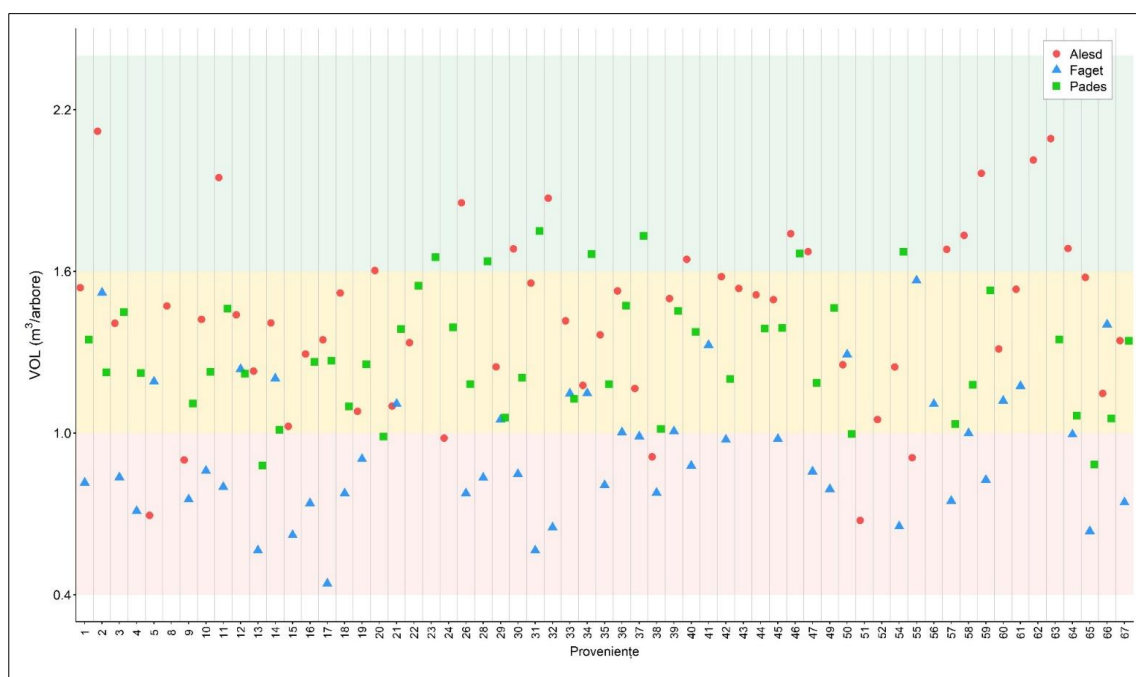


Fig. 5 Variația volumului mediu/arbore a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În culturile comparative Aleșd, Făget și Padeș, analiza volumului mediu/arbore evidențiază un clasament similar cu cel obținut pe baza DBH (vezi Subcapitolul 4.1.1). Proveniențele cu valori ridicate ale DBH prezintă, de asemenea, cele mai mari volume, în timp ce proveniențele cu valori ale DBH sub medie prezintă volume mai reduse.

În ceea ce privește media VOL la nivel de cultură, aceasta a fost de 1,43 m³/arbore la Aleșd, urmată de 1,29 m³/arbore cm la Padeș , iar pe ultimul loc s-a situat Făget, cu 0,93 m³/arbore.

4.1.4. Suprafața de bază (SB)

Valorile medii ale SB pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 6.

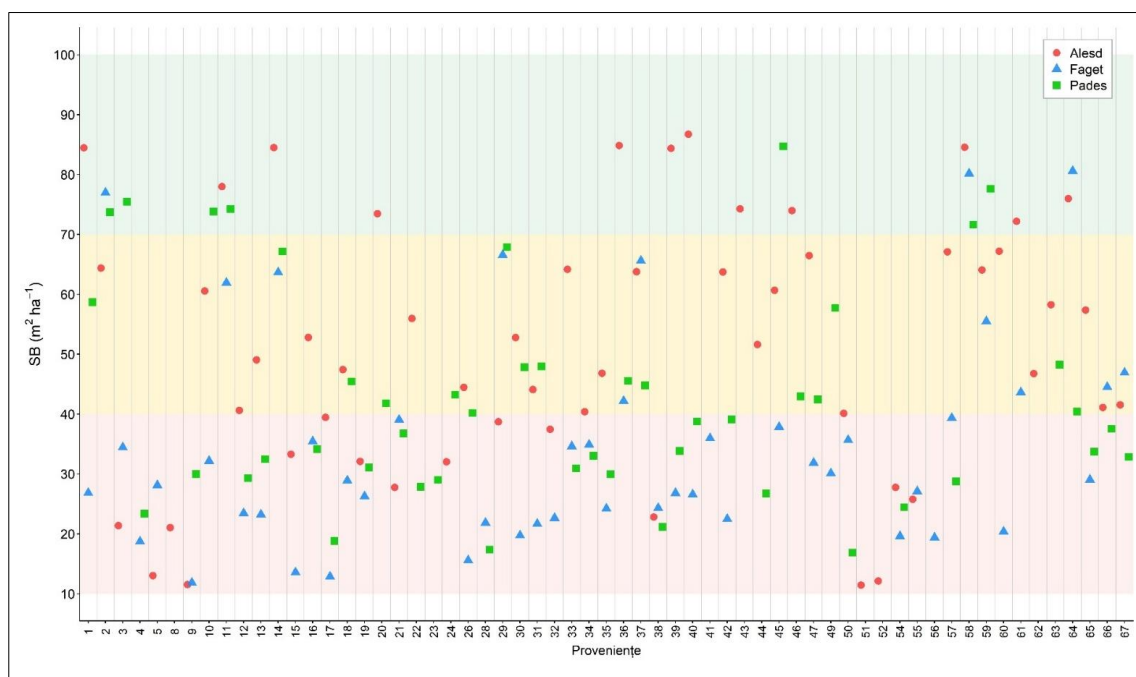


Fig. 6 Variația suprafeței de bază a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, analizând performanțele SB, în topul clasamentului se situează proveniențele 40 – Daun Ost – Abt. 46 C., DE; 36 – Skycomish – Beckler Peak, SUA; 58 – Piatra Albă, RO; 14 – Snohomish – Sloan Creek, SUA și 1 – Idaho (var. *glauca*), SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește SB, au fost reprezentate de proveniențele 51 – Pinetan, CA; 9 – Merritt, CA și 52 – Shuswape Lake, CA (Figura 6).

În cultura comparativă Făget, analizând performanțele SB, în topul clasamentului se situează proveniențele 64 – Anina – Buhui, RO; 58 – Piatra Albă, RO; 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 29 – Vancouver, CA și 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește SB, au fost reprezentate de proveniențele 9 – Merritt, CA; 17 – Kittias – Cle Elum, SUA și 15 – Jefferson – Hoh River, SUA (Figura 6).

În cultura comparativă Padeș, analizând performanțele SB, în topul clasamentului se situează proveniențele 45 – Poinat – Puy de Dôme, FR; 59 – Toplița, RO; 3 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 11 – Duncan, DE și 10 – Franklin River, CA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește SB, au fost reprezentate de proveniențele 50 – Clallam County – Louella, SUA; 28 – Chatcolet, S. (var. *glauca*), SUA și 17 – Kittitas – Cle Elum, SUA (Figura 6).

În ceea ce privește media SB la nivel de cultură, aceasta a fost de $51,2 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ la Aleșd, urmată de $42,7 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ la Padeș, iar pe ultimul loc s-a situat Făget, cu $34,8 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$.

4.1.5. Interacțiunea genotip × mediu pentru caracteristicile cantitative

Rezultatele analizei varianței evidențiază influența localității (L), a provenienței (P) și a interacțiunii proveniență × localitate (P × L) pentru caracterele cantitative analizate (Tabelul 5).

Tab. 5 Interacțiunea genotip × mediu

Sursa de variație	DF	Varianța (s^2)			
		DBH	HT	VOL	SB
Proveniența (P)	37	43,450 ***	12,135 *	0,235 **	2379,8 ***
Localitatea (L)	2	2040,1 ***	78,70 ***	6,768 ***	8953,6 ***
Interacțiunea (P × L)	74	49,691 ***	17,538 ***	0,235 ***	868,1 ***
Eroarea	189	18,983	7,497	0,11	416,5

Notă: Nivelurile de semnificație: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**) și $p \leq 0,001$ (***); DBH – diametrul la 1,30 m; HT – înălțimea totală; VOL – volumul mediu/arbore; SB – suprafața de bază.

Proveniența (P) a evidențiat efecte foarte semnificative pentru DBH, VOL și SB ($p < 0,001$), precum și un efect semnificativ pentru HT ($p \leq 0,05$). Analiza varianței a evidențiat efecte foarte semnificative ale localității (L) pentru toate caracteristicile analizate: DBH, HT, VOL și SB ($p < 0,001$). Interacțiunea proveniență × localitate (P × L) a fost foarte semnificativă pentru toate caracteristicile cantitative analizate, respectiv DBH, TH, VOL și SB ($p \leq 0,001$).

4.1.6 Discuții privind caracteristicile cantitative

Rezultatele evidențiază existența unei variabilități genetice semnificative între proveniențele de duglas, însă intensitatea acesteia diferă în funcție de locul de testare și de caracteristicile analizate (Tabel 4). În cultura comparativă Aleșd, proveniența are un efect foarte semnificativ pentru toate caracteristicile, indicând o diferențiere genetică clară, în timp ce la Făget efectul este semnificativ, dar cu o contribuție redusă la varianța totală, iar la Padeș este variabil, fiind semnificativ doar pentru anumite caracteristici (Eilmann et al. 2013; Ye și Jayawickrama 2024; Montwé et al. 2015; Neophytou et al. 2016; Gričar et al. 2024; Bastien et al. 2013; Petkova et al. 2014; Popov 2014; Smolnikar et al. 2021).

Analiza componentelor varianței arată că varianța reziduală este dominantă în toate culturile comparative, indicând influența majoră a factorilor de mediu asupra caracteristicilor analizate, în timp ce componenta genetică, deși semnificativă, are o contribuție mai redusă (Cappa et al. 2019; Robinson et al. 2007). Efectul repetiției este nesemnificativ la Aleșd și Padeș, sugerând condiții relativ omogene,

dar semnificativ la Făget pentru unele caracteristici, ceea ce indică heterogenitate microstațională. Diferențele edafice și de pantă între locații contribuie la variațiile de creștere, cu condiții mai favorabile la Aleșd și Padeș comparativ cu Făget.

Analiza performanțelor evidențiază existența unor proveniențe cu comportament stabil și superior în toate culturile comparative, precum Idaho (SUA), Skykomish (SUA), Daun (Germania), Poinat (Franța) și Toplița (România), precum și performanțe bune ale unor proveniențe locale, ceea ce indică o bună adaptare la condițiile din România.

În cazul înălțimii totale, un grup de proveniențe din SUA, Germania, Franța și Canada prezintă performanțe ridicate în toate locațiile, iar unele proveniențe sunt constante atât pentru DBH, cât și pentru HT, indicând stabilitate ecologică. Rezultatele confirmă superioritatea generală a proveniențelor de coastă în condiții europene, în timp ce cele de interior sunt mai potrivite pentru condiții continentale (van Loo et al. 2019; Milenkova et al. 2018; Neophytou et al. 2022).

Analiza varianței arată că atât proveniența, cât și localitatea influențează semnificativ caracteristicile analizate, iar interacțiunea proveniență × localitate este foarte semnificativă, indicând un răspuns diferențiat al proveniențelor în funcție de mediu (Dungey et al. 2012; Liao et al. 2023; Chakraborty et al. 2024; Benito Garzón et al. 2019).

În ansamblu, rezultatele evidențiază rolul combinat al factorilor genetici și de mediu, precum și importanța plasticității fenotipice în adaptarea duglasului, oferind o bază solidă pentru selecția proveniențelor valoroase și pentru dezvoltarea programelor de ameliorare genetică în România.

4.2. Variabilitatea genetică a caracteristicilor de calitate a lemnului și adaptative

Rezultatele analizei statistice obținute prin aplicarea modelului liniar sunt sintetizate în Tabelul 6, evidențiind efectele surselor de variație asupra caracteristicilor de calitate a lemnului și adaptative analizate în cadrul fiecărei culturi comparative.

Tab. 6 Rezultatele modelului linear pentru caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative analizate în fiecare cultură comparativă

Cultura	Caracter	LRTp	Vp	Vr	MS rep	Media ± SD
CARACTERISTICI DE CALITATE A LEMNULUI						
Aleșd	PH	24,55 ***	0,98 (12%)	7,34 (88%)	228,08*	17,3 ± 2,91
	SF	1,67 ^{ns}	0,01 (3%)	0,28 (97%)	0,01 ^{ns}	4,47 ± 0,53
	NB	6,68 **	0,04 (3%)	1,14 (97%)	3,15 ^{ns}	2,16 ± 1,09
	DB	14,53 **	0,04 (7%)	0,56 (93%)	1,71 ^{ns}	2,13 ± 0,77

Făget	BA	26,18 **	0,03 (7%)	0,42 (93%)	0,45 ^{ns}	1,66 ± 0,68
	FI	2,81 ^{ns}	0,01 (3%)	0,31 (97%)	0,04 ^{ns}	3,66 ± 0,57
	CARACTERISTICI ADAPTATIVE					
	SI	12,09 ***	0,06 (9%)	0,57 (91%)	0,25 ^{ns}	0,86 ± 0,15
	SV	35,56 ***	39,96 (48%)	42,77 (52%)	108,04 ^{ns}	18,47 ± 0,09
	CARACTERISTICI DE CALITATE A LEMNULUI					
	PH	34,01 ***	1,73 (13%)	12,05 (87%)	735,91 ***	17,2 ± 3,86
	SF	0,54 ^{ns}	0,01 (2%)	0,45 (98%)	0,79 ^{ns}	4,59 ± 0,67
	NB	0,44 ^{ns}	0,01 (1%)	1,58 (99%)	2,07 ^{ns}	2,26 ± 1,26
	DB	12,34 ***	0,05 (7%)	0,63 (93%)	2,97 *	2,01 ± 0,82
	BA	15,38 ***	0,35 (44%)	0,44 (56%)	0,06 ^{ns}	1,84 ± 0,68
	FI	4,60 ^{ns}	0	0,90 (100%)	0,01 ^{ns}	3,96 ± 0,30
Padeș	CARACTERISTICI ADAPTATIVE					
	SI	6,86 **	0,001 (3%)	0,34 (97%)	0,57 ^{ns}	1,06 ± 0,19
	SV	0 ^{ns}	0	92,14 (100%)	254,74 ^{ns}	16,85 ± 9,65
	CARACTERISTICI DE CALITATE A LEMNULUI					
	PH	7,78 **	0,38 (5%)	6,74 (95%)	20,02 ^{ns}	17,7 ± 2,67
	SF	0,34 ^{ns}	0,002 (1%)	0,27 (99%)	0,33 ^{ns}	4,66 ± 0,53
	NB	0,99 ^{ns}	0,02 (1%)	1,46 (99%)	0,08 ^{ns}	2,26 ± 1,22
	DB	2,50 ^{ns}	0,01 (2%)	0,57 (98%)	2,96 *	2,04 ± 0,77
	BA	8,60 **	0,03 (6%)	0,48 (94%)	0,12 ^{ns}	1,95 ± 0,71
	FI	0,23 ^{ns}	0	0,11 (100%)	0,01 ^{ns}	3,89 ± 0,34
	CARACTERISTICI ADAPTATIVE					
	SI	2,07 ^{ns}	0	0,22 (100%)	0,22 ^{ns}	0,85 ± 0,15
	SV	0,01 ^{ns}	0,55 (1%)	63,40 (99%)	26,04	16,60 ± 8,06

Notă: Niveluri de semnificație: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***) ; *ns* – ne semnificativ ($p > 0,05$); *LRTp* – testul raportului de probabilitate pentru efectul proveniențelor; *Vp* – varianța efectului aleator al proveniențelor; *Vr* – varianța reziduală; *MS rep* – media sumelor de pătrate pentru repetiție; *PH* – înălțimea elagată, *SF* – forma trunchiului, *NB* – numărul de ramuri, *DB* – grosimea ramurilor, *BA* – unghiul de inserție al ramurilor, *FI* – înfurcirea, *SI* – indicele de zveltețe și *SV* – supraviețuirea.

În cultura comparativă Aleșd, efectul provenienței pentru caracteristicile de calitate a lemnului a fost foarte semnificativ pentru PH și semnificativ pentru NB, DB și BA, în timp ce pentru SF și FI a fost ne semnificativ. Pentru caracteristicile adaptative, efectul provenienței a fost foarte semnificativ pentru SV și SI. Varianța provenienței a reprezentat 3–12% pentru caracteristicile de calitate și 9–48% pentru cele adaptative, restul fiind explicat de varianța reziduală. Efectul repetiției a fost ne semnificativ, cu excepția PH (Tabel 6).

În cultura comparativă Făget, efectul provenienței a fost foarte semnificativ pentru PH, DB și BA, dar ne semnificativ pentru SF, NB și FI. Pentru caracteristicile adaptative, efectul provenienței a fost semnificativ doar pentru SI și ne semnificativ pentru SV. Varianța provenienței a avut valori de 3–13% pentru majoritatea caracteristicilor, cu valori mai ridicate pentru BA, iar efectul repetiției a fost semnificativ pentru PH și DB (Tabel 6).

În cultura comparativă Padeș, efectul provenienței a fost semnificativ doar pentru PH și BA, fiind ne semnificativ pentru celelalte caracteristici de calitate și adaptative. Varianța provenienței a fost redusă sub 6%, iar efectul repetiției a fost semnificativ doar pentru DB (Tabel 6).

4.2.1. Variabilitatea genetică a caracteristicilor de calitate a lemnului

4.2.1.1 Înălțimea elagată (PH)

Valorile medii ale PH pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 7.

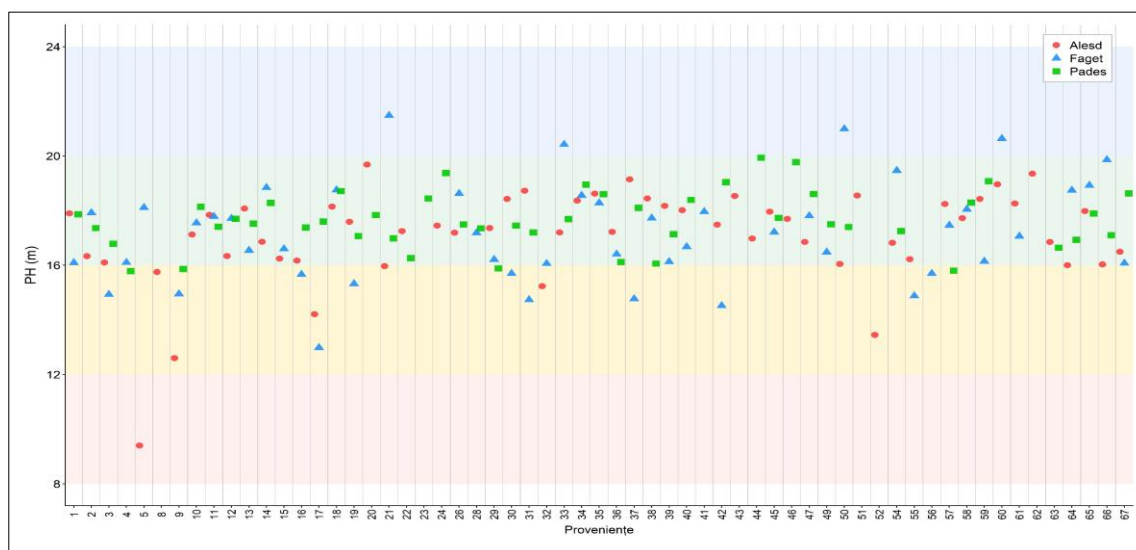


Fig. 7 Variația înălțimii elagate a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, analizând performanțele PH, în topul clasamentului se situează proveniențele 5 – El Dorado, SUA; 9 – Merritt, CA; 52 – Shuswap Lake, CA; 17 – Kittias – Cle Elum, SUA și 32 – Pe Ell – Sand Creek, Mc. Donald, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește PH, au fost reprezentate de proveniențele 31 – Elma, SUA; 60 – Aninoasa Mare, RO și 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA (Figura 7).

În cultura comparativă Făget, analizând performanțele PH, în topul clasamentului se situează proveniențele 17 – Kittias – Cle Elum, SUA; 42 – Wittlich West – Abt. 3B, DE; 31 – Elma, SUA; 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA și 55 – Centre Creek – Chilliwack Valley, CA. Proveniențele cu performanțele cele mai reduse, în ceea ce privește PH, au fost reprezentate de proveniențele 66 – Elbe, SUA; 33 – Yacolt – Spotted Deernt – Battle G., SUA și 60 – Aninoasa Mare, RO (Figura 7).

În cultura comparativă Padeș, analizând performanțele PH, în topul clasamentului se situează proveniențele 4 – Boise (var. *glauca*), SUA; 57 – Pădurea Neagră, RO; 9 – Merritt, CA; 29 – Vancouver, CA; 38 – Oyster R., CA și 36 – Skycomish – Beckler Peak, SUA. Proveniențele cu cele mai reduse performanțe, în ceea ce privește PH, au fost reprezentate de proveniențele 42 – Wittlich West – Abt. 3B, DE; 59 – Toplița, RO și 24 – Jackson – Ashland, SUA (Figura 16).

În ceea ce privește media PH la nivel de cultură, aceasta a fost de 17,2 m la Făget, urmată de 17,3 m la Aleșd, iar pe ultimul loc s-a situat Padeș cu 17,7 m.

4.2.1.2 Unghiul de inserție al ramurilor (BA)

Valorile medii ale BA pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 8.

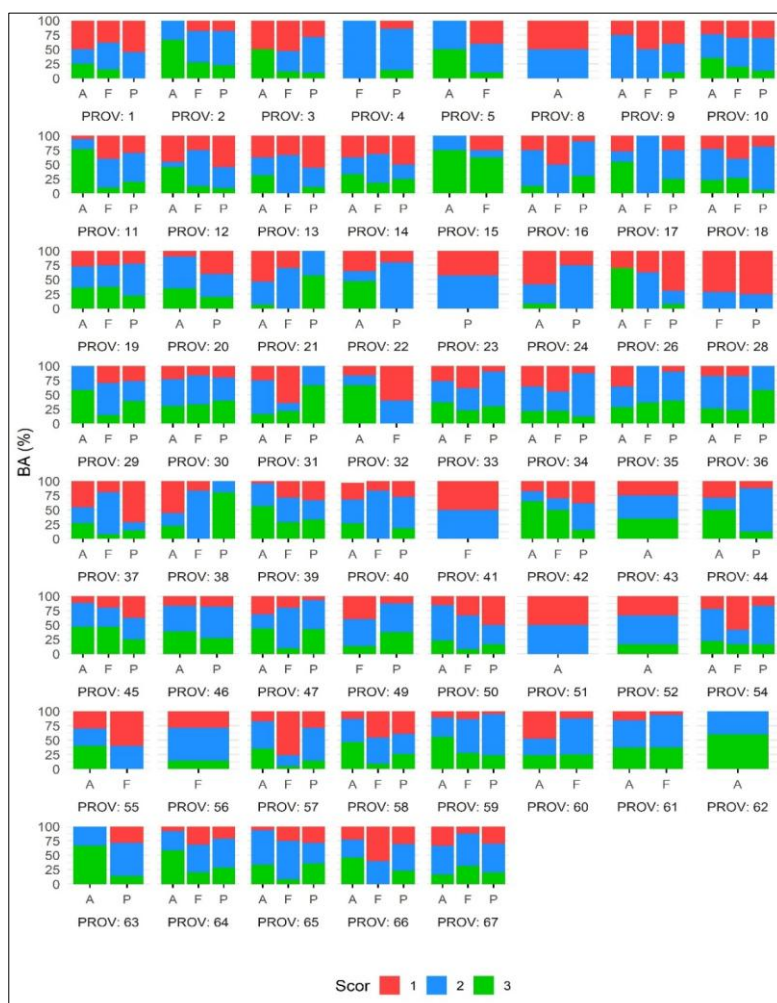


Fig. 8 Variația unghiului de inserție al ramurilor a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, în clasa de performanță superioară, corespunzătoare scorului 3 (unghi > 90°), se situează următoarele proveniențe: 16 – Grays Harbour – Humptulips, SUA; 33 – Yacolt – Spotted Deernt – Battle G., SUA; 3 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 5 – El Dorado, SUA și 9 – Merritt, CA (Figura 8).

În cultura comparativă Făget, în clasa de performanță superioară, corespunzătoare scorului 3 (unghi > 90°), se situează următoarele proveniențe: 15 – Jefferson – Hoh River, SUA; 35 – Darrington – Texas Pond, SUA; 61 – Vârful Dăii, RO; 45 – Poinat – Puy de Dome, FR și 42 – Wittlich West – Abt. 3B., DE (Figura 8).

În cultura comparativă Padeș, în clasa de performanță superioară, corespunzătoare scorului 3 (unghi > 90°), se situează următoarele proveniențe: 38 – Oyster R. – CA; 31 – Elma, SUA; 36 – Skycomish – Beckler Peak, SUA; 21 – Marion Forks, SUA și 47 – Moussans II, FR (Figura 8).

4.2.1.3. Grosimea ramurilor (DB)

Valorile medii ale DB pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 9.

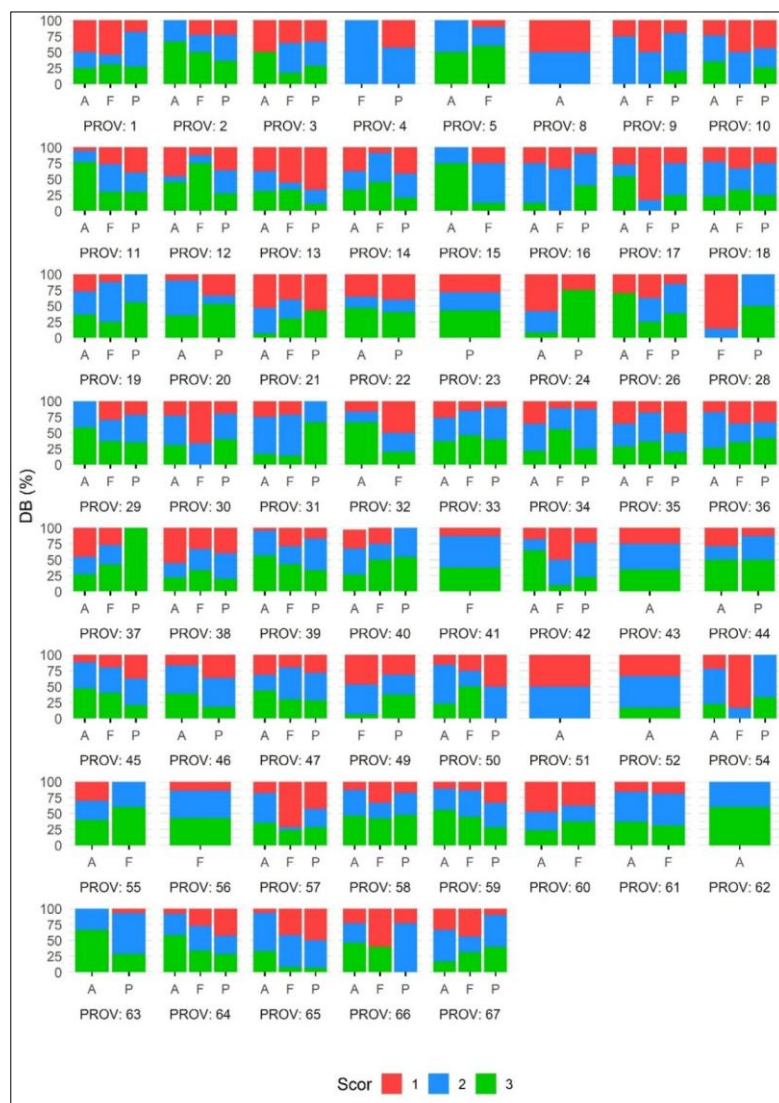


Fig. 9 Variația grosimii ramurilor a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, analizând performanțele DB, în topul clasamentului în ceea ce privește scorul 1 (DB < 2 cm) se situează proveniențele 8 – South End Pass, SUA; 24 – Jackson – Ashland, SUA; 51 – Pinetan, CA; 21 – Marion Forks, SUA și 38 – Oyster R., CA. Proveniențele cu scorul 3 (DB > 5 cm) sunt reprezentate de 62 – Vârful Dăii, RO; 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA și 63 – Nădrăgel, RO (Figura 9).

În cultura comparativă Făget, analizând performanțele DB, în topul clasamentului în ceea ce privește scorul 1 (DB < 2 cm) se situează proveniențele 28 – Chatcolet, S. (var. *glauca*), SUA; 17 – Kittias – Cle

Elum, SUA; 54 – Morton Lake, CA; 30 – Hoodsport, SUA și 9 – Merritt, CA. Proveniențele cu scorul 3 (DB > 5 cm) sunt reprezentate de 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA; 5 – El Dorado, SUA și 33 – Yacolt – Spotted Deernt – Battle G., SUA (Figura 9).

În cultura comparativă Padeș, analizând performanțele DB, în topul clasamentului în ceea ce privește scorul 1 (DB < 2 cm) se situează proveniențele 13 – Skagit – Sedro Wooley, SUA; 50 – Clallam County – Louella, SUA; 4 – Boise (var. *glauca*), SUA; 65 – Sedro Wooley, SUA și 35 – Darrington – Texas Pond, SUA. Proveniențele cu scorul 3 (DB > 5 cm) sunt reprezentate de 28 – Chatcolet, S. (var. *glauca*), SUA; 40 – Daun Ost – Abt. 46 C., DE și 19 – Pine Grove, SUA (Figura 9).

4.2.1.4 Numărul de ramuri (NB)

Valorile medii ale NB pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 10.

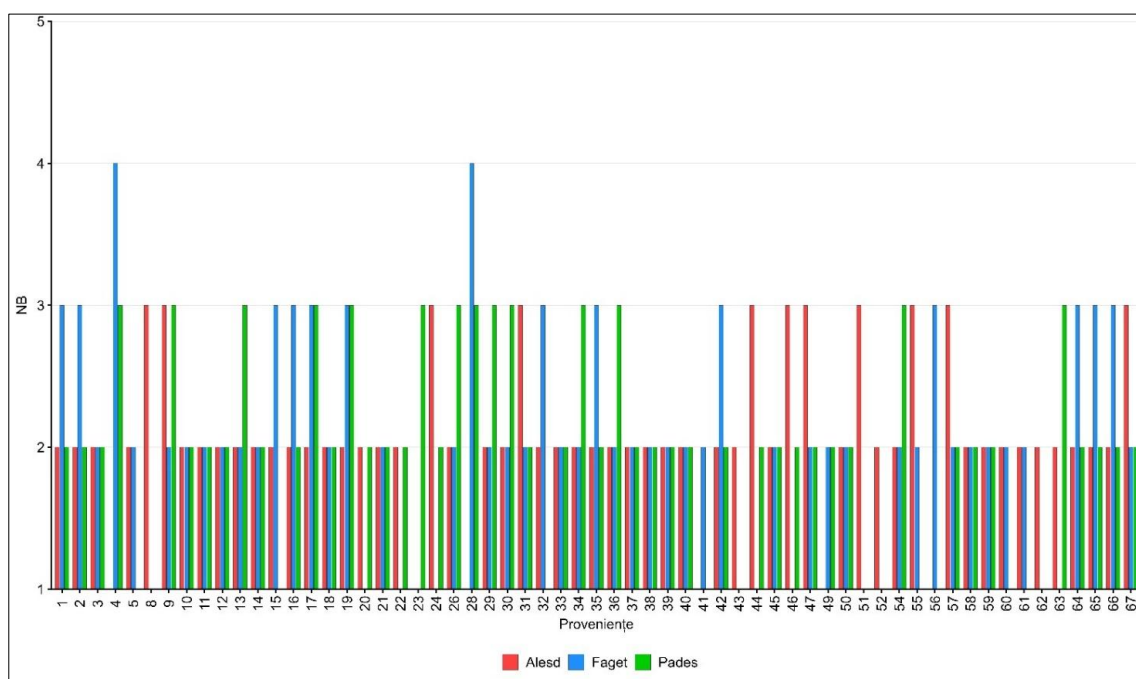


Fig. 10 Variația numărului de ramuri al proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, cele mai scăzute valori medii ale NB au fost înregistrate de proveniențele 1 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 3 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 5 – El Dorado, SUA; 58 – Piatra Albă, RO și 62 – Vârful Dăii, RO. Proveniențele caracterizate prin cele mai ridicate valori medii ale NB sunt următoarele: 46 – Les Farges III, FR; 8 – South End Pass, SUA și 9 – Merritt, SUA (Figura 10).

În cultura comparativă Făget, cele mai scăzute valori medii ale NB au fost înregistrate de proveniențele 9 – Merritt, CA; 47 – Moussans II, FR; 39 – Daun Ost – Abt. 39 A., DE; 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA și 59 – Toplița, RO. Proveniențele caracterizate prin cele mai ridicate valori medii ale NB sunt următoarele: 17 – Kittias – Cle Elum, SUA; 32 – Pe Ell – Sand Creek, Mc. Donald, SUA și 66 – Elbe, SUA (Figura 10).

În cultura comparativă Padeș, cele mai scăzute valori medii ale NB au fost înregistrate de proveniențele 24 – Jackson – Ashland, SUA; 39 – Daun Ost – Abt. 39 A., DE; 33 – Yacolt – Spotted Deernt – Battle G., SUA; 66 – Elbe, SUA și 1 – Idaho (var. *glauca*), SUA. Proveniențele caracterizate prin cele mai ridicate valori medii ale NB sunt următoarele: 30 – Hoodsport, SUA; 54 – Shuswape Lake, CA și 13 – Skagit – Sedro Wooley, SUA (Figura 10).

4.3. Variabilitatea genetică a caracteristicilor adaptative

4.3.1. Supraviețuirea (SV)

Valorile medii ale SV pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 11.

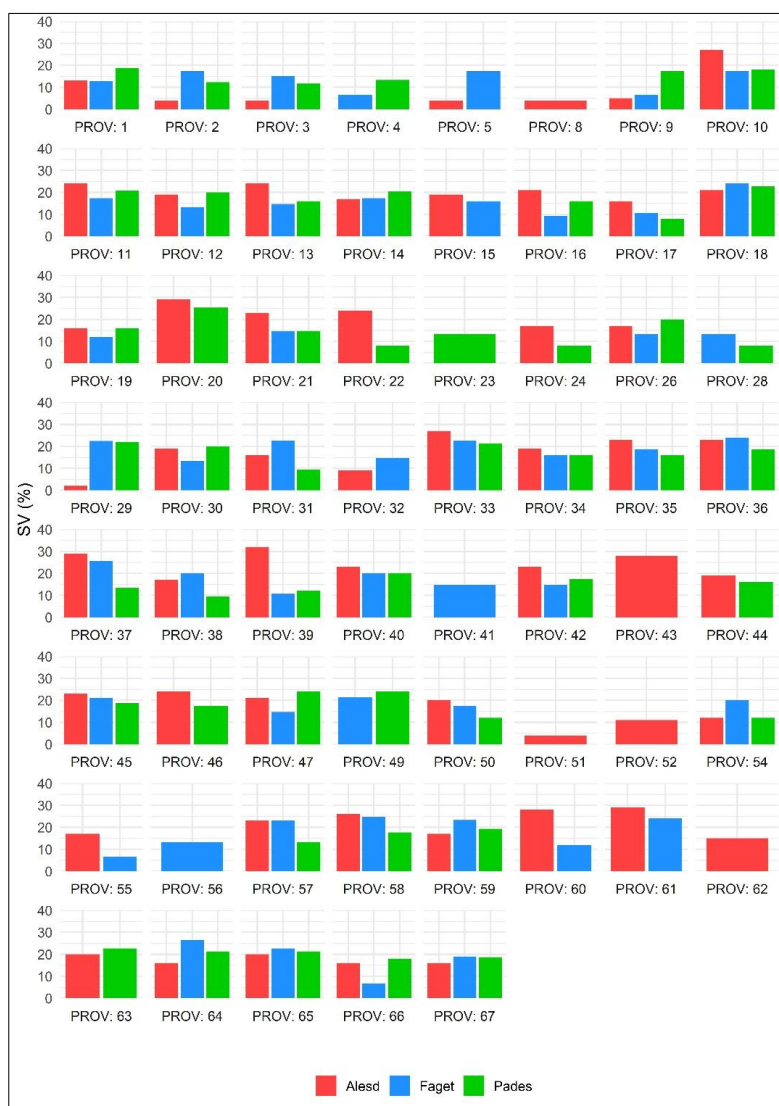


Fig. 11 Variația supraviețuirii a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, proveniențele cu cele mai mari procente în ceea ce privește SV au fost înregistrate de următoarele proveniențe: 39 – Daun Ost – Abt. 39 A., DE; 61 – Vârful Dăii, RO; 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA; 20 – Benton – Corvallis, SUA și 60 – Aninoasa Mare, RO.

Proveniențele care au înregistrat cele mai mici procente ale SV sunt următoarele: 8 – South End Pass, SUA; 5 – El Dorado, SUA și 3 – Idaho (var. *glauca*) (Figura 11).

În cultura comparativă Făget, proveniențele cu cele mai mari procente în ceea ce privește SV au fost înregistrate de următoarele proveniențe: 64 – Anina – Buhui, RO; 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA; 58 – Piatra Albă, RO; 18 – Lewis – Packwood, SUA și 36 – Skycomish – Beckler Peak, SUA. Proveniențele care au înregistrat cele mai mici procente ale SV sunt următoarele: 16 – Grays Harbour – Humptulips, SUA; 4 – Boise (var. *glauca*), SUA și 9 – Merritt, CA (Figura 11).

În cultura comparativă Padeș, proveniențele cu cele mai mari procente în ceea ce privește SV au fost înregistrate de următoarele proveniențe: 20 – Benton – Corvallis, SUA; 47 – Moussans II, FR; 49 – Darrington III, SUA; 18 – Lewis – Packwood, SUA și 63 – Nădrăgel, RO. Proveniențele care au înregistrat cele mai mici procente ale SV sunt următoarele: 38 – Oyster R., CA; 17 – Kittias – Cle Elum, SUA și 22 – Lane – Oakridge, SUA (Figura 11).

În ceea ce privește media SV la nivel de cultură, aceasta a fost de 18,47% la Aleșd, urmată de 16,85% la Făget, iar pe ultimul loc s-a situat Padeș, cu 16,60%.

4.3.2. Indicele de zveltețe (SI)

Valorile medii ale SI pentru proveniențele de duglas analizate în cele trei culturi comparative sunt prezentate în Figura 12.

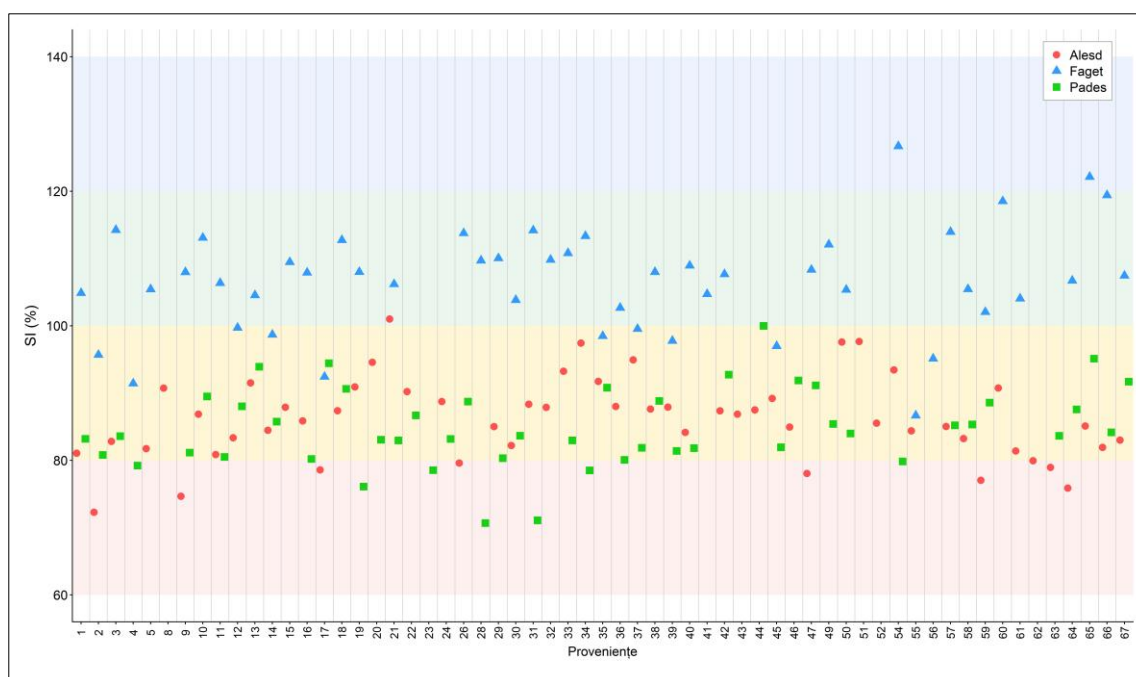


Fig. 12 Variația indicelui de zveltețe a proveniențelor de duglas testate în culturile comparative

În cultura comparativă Aleșd, în ceea ce privește SI, unde valorile mai mici indică o stabilitate ridicată, în topul clasamentului se situează proveniențele 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 9 – Merritt, CA; 64 – Anina – Buhui, RO; 59 – Toplița, RO și 47 – Moussans II, FR. Proveniențele caracterizate prin SI mai

mari, indicând o vulnerabilitate ridicată, sunt următoarele: 37 – Concrete – Presentin Creek, SUA; 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA și 50 – Clallam Contry – Louella, SUA (Figura 12).

În cultura comparativă Făget, în ceea ce privește SI, unde valorile mai mici indică o stabilitate ridicată, în topul clasamentului se situează proveniențele 55 – Centre Creek – Chilliwack Valley, CA; 4 – Boise (var. *glauca*), SUA; 17 – Kittias – Cle Elum, SUA; 56 – Devine – Dist., DE și 2 – Idaho (var. *glauca*), SUA. Proveniențele caracterizate prin SI mai mari, indicând o vulnerabilitate ridicată, sunt următoarele: 3 – Idaho (var. *glauca*), SUA; 60 – Aninoasa Mare, RO și 66 – Elbe, SUA (Figura 12).

În cultura comparativă Padeș, în ceea ce privește SI, unde valorile mai mici indică o stabilitate ridicată, în topul clasamentului se situează proveniențele 28 – Chatcolet, S., (var. *glauca*), SUA; 31 – Elma, Washington; 19 – Pine Grove, SUA; 34 – Vicinity, Mineral Walker Road, SUA și 23 – Rosenberg, SUA. Proveniențele caracterizate prin SI mai mari, indicând o vulnerabilitate ridicată, sunt următoarele: 42 – Wittlich West – Abt. 3B; 13 – Skagit – Sedro-Woolley, SUA și 17 – Kittitas – Cle Elum, SUA (Figura 12).

În ceea ce privește media SI la nivel de cultură, aceasta a fost de 85% la Padeș, urmată de 86% la Aleșd, iar pe ultimul loc s-a situat Făget, cu 107%.

4.3.3. Interacțiunea genotip × mediu pentru caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative

Rezultatele analizei varianței evidențiază efectul localității (L), provenienței (P) și a interacțiunii proveniență × localitate (P × L) pentru caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative (Tabelul 7).

Tab. 7 Interacțiunea dintre genotip × mediu

Sursa de variație	DF	Varianța (s^2)							
		PH	SF	NB	DB	BA	FI	SI	SV
Proveniența (P)	37	9,896	0,162	0,516	0,361	1,685	1,224	0,009	124,70
		***	ns	ns	**	**	ns	ns	***
Localitatea (L)	2	8,267	0,804	0,981	1,073	1,294	1,098	1,388	431,23
		ns	**	ns	**	**	***	***	***
Interacțiunea P × L	74	5,393	0,171	0,666	0,326	0,236	0,074	0,11	61,629
		ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns
Eroarea	188	4,184	0,095	0,453	0,190	0,195	0,084	0,008	48,611

Notă: Niveluri de semnificație: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); ns – ne semnificativ ($p > 0,05$); PH – înălțimea elagată; SF – forma trunchiului; NB – numărul de ramuri; DB – grosimea ramurilor; BA – unghiul de inserție al ramurilor; FI – înfurcirea; SI – indicele de zveltețe și SV – supraviețuirea.

Proveniența (P) a evidențiat un efect foarte semnificativ pentru SV, PH ($p \leq 0,001$) și semnificativ pentru DB și BA ($p \leq 0,01$), în timp ce pentru SF, NB, BA, FI și SI efectul provenienței nu a fost semnificativ ($p \leq 0,05$). Analiza varianței a evidențiat efecte foarte semnificative ale localității (L) pentru FI, SI și SV ($p \leq 0,001$), respectiv semnificative pentru SF, DB, BA ($p \leq 0,01$). Pentru PH, NB și DB, efectul localității nu a fost semnificativ ($p > 0,05$). Interacțiunea proveniență $\times$ localitate ($P \times L$) a fost semnificativă pentru DB și SI, în timp ce pentru PH, SF, NB, BA, FI și SV nu a fost semnificativă ($p > 0,05$).

4.3.4. Discuții privind caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative

Rezultatele evidențiază existența unor răspunsuri diferențiate ale proveniențelor de duglas în funcție de locul de testare, confirmând rolul important al condițiilor staționale în exprimarea caracteristicilor de calitate a lemnului și adaptative. În ansamblu, variația atribuită provenienței a fost redusă spre moderată, iar semnificația efectului genetic a variat în funcție de locul de testare și caracteristică.

În cultura comparativă Aleșd, efectul provenienței a fost semnificativ pentru mai multe caracteristici de calitate a lemnului (PH, NB, DB, BA) și adaptative (SV, SI), indicând o contribuție genetică la variația fenotipică, în special pentru supraviețuire. La Făget, proveniența a influențat semnificativ PH, DB, BA și SI, în timp ce SV a fost determinată predominant de factorii de mediu. În cultura Padeș, efectul provenienței a fost limitat, fiind semnificativ doar pentru PH și BA, majoritatea caracteristicilor fiind dominate de variația reziduală.

Diferențele dintre locații reflectă influența condițiilor staționale, Aleșd favorizând exprimarea variației genetice, în timp ce la Făget și Padeș factorii de mediu au avut un rol mai pronunțat. În ansamblu, efectul localității a fost dominant pentru majoritatea caracteristicilor, în special pentru SV, SI și FI, confirmând influența majoră a mediului asupra exprimării fenotipice (Li et al. 2017; Magalska și Howe 2014). Interacțiunea proveniență $\times$ localitate a fost semnificativă doar pentru DB și SI, indicând diferențe în răspunsul proveniențelor între locații pentru aceste caracteristici (Campbell 1992; Chauvin et al. 2019).

Caracteristicile asociate ramificării (NB, DB, BA) au un rol determinant în calitatea lemnului, influențând dimensiunea nodurilor și proprietățile mecanice ale acestuia, aspect evidențiat în numeroase studii (Osborne și Maguire 2016; Lowell et al. 2014; Macdonald și Hubert 2002; Longo et al. 2019; Todoroki et al. 2005).

În ansamblu, rezultatele confirmă existența unei variabilități genetice semnificative, dar puternic influențate de condițiile de mediu (Di Fabio et al. 2024; Hankin et al. 2023; Kerns et al. 2020; Pedlar et al. 2024).

4.4. Selecția celor mai bune proveniențe cu ajutorul indicilor de selecție

Pentru a include mai multe caracteristici și pentru a evita limitările selecției univariate, în acest studiu a fost aplicată selecția multivariată bazată pe indici de selecție. Prin această selecție multivariată, se

pot selecta proveniențe care combină niveluri superioare ale performanței cu un comportament mai stabil, contribuind astfel la fundamentarea deciziilor de selecție pentru utilizări viitoare ale duglasului.

4.4.1. Selecția proveniențelor în fiecare cultură comparativă, cu ajutorul indicelui MGIDI

Aplicarea indicelui MGIDI a permis conturarea unui grup de proveniențe cu performanțe superioare în fiecare cultură comparativă. Intensitatea selecției a fost menținută la 20%, ceea ce a condus la selectarea a 11 proveniențe din cele 55 testate la Aleșd, 10 din cele 49 la Făget și 10 din cele 48 la Padeș. Toate proveniențele selectate au înregistrat valori peste mediile locurilor de testare pentru DBH, TH și SV (Tabel 8).

Tab. 8 Diferențele obținute prin selecția cu ajutorul indicelui MGIDI a proveniențelor de duglas testate

Caracter	Media culturii comparative			Media proveniențelor selectate			Diferența %		
	Aleșd	Făget	Padeș	Aleșd	Făget	Padeș	Aleșd	Făget	Padeș
DBH	35,9	28,8	34,7	39,9	31,2	35,4	11,1	8,3	2
HT	30,2	29,6	28,8	32	31,8,9	28,8	6	7,4	0
SV	18,5	17,9	16,6	23,7	20,6	18,2	28,1	15,1	9,6

Notă: DBH – diametrul la 1,30 m; HT – înălțimea totală; SV – supraviețuirea

În cultura comparativă Aleșd, aplicarea indicelui MGIDI a condus la selectarea unor proveniențe provenite din cinci țări: Canada (1), SUA (2), Germania (2), Franța (1) și România (5). Din Canada a fost selectată proveniența Duncan (Columbia Britanică), din SUA proveniențele 20 – Benton–Corvallis (Oregon) și 26 – Siskiyou–Hawkinsville (California), din Germania proveniențele 39 – Daun Ost și 43 – Wittlich West, iar din Franța proveniența 46 – Les Farges III. Proveniențele selectate din România au fost 58 – Piatra Albă, 59 – Toplița, 62 – Vârful Dăii și 63 – Nădrăgel (Figura 13).

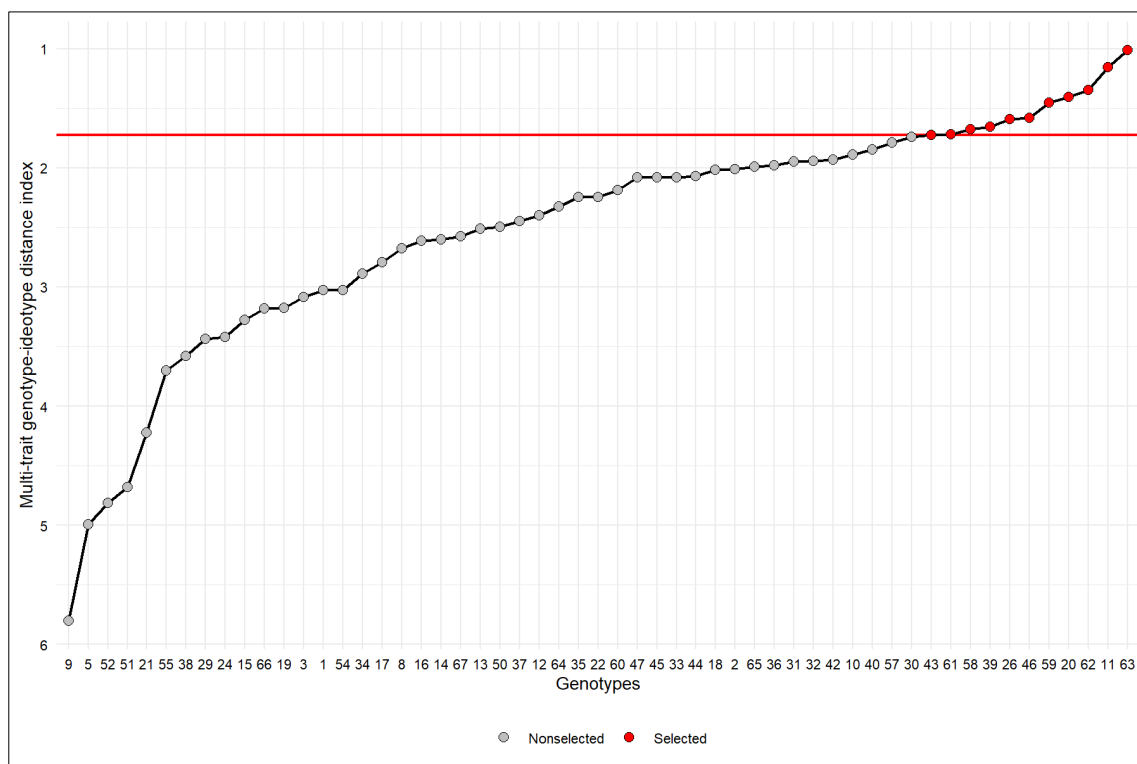


Fig. 13 Proveniențele de duglas selectate pe baza indicelui MGIDI în cultura comparativă Aleșd

În cultura comparativă Făget, aplicarea indicelui MGIDI a condus la selectarea unor proveniențe provenite din trei țări: SUA (6), Germania (1) și România (3). Proveniențele selectate din SUA au fost 2 – Idaho (var. *glauca*), 5 – El Dorado (California), 14 – Snohomish–Sloan Creek, 33 – Yacolt–Spotted Deernt–Battle Ground, 36 – Skykomish–Beckler Peak și 50 – Clallam County–Louella (Washington). Din Germania a fost selectată proveniența 41 – Prüm Süd, iar din România proveniențele 58 – Piatra Albă, 61 – Vârful Dăii și 64 – Anina–Buhui (Figura 14).

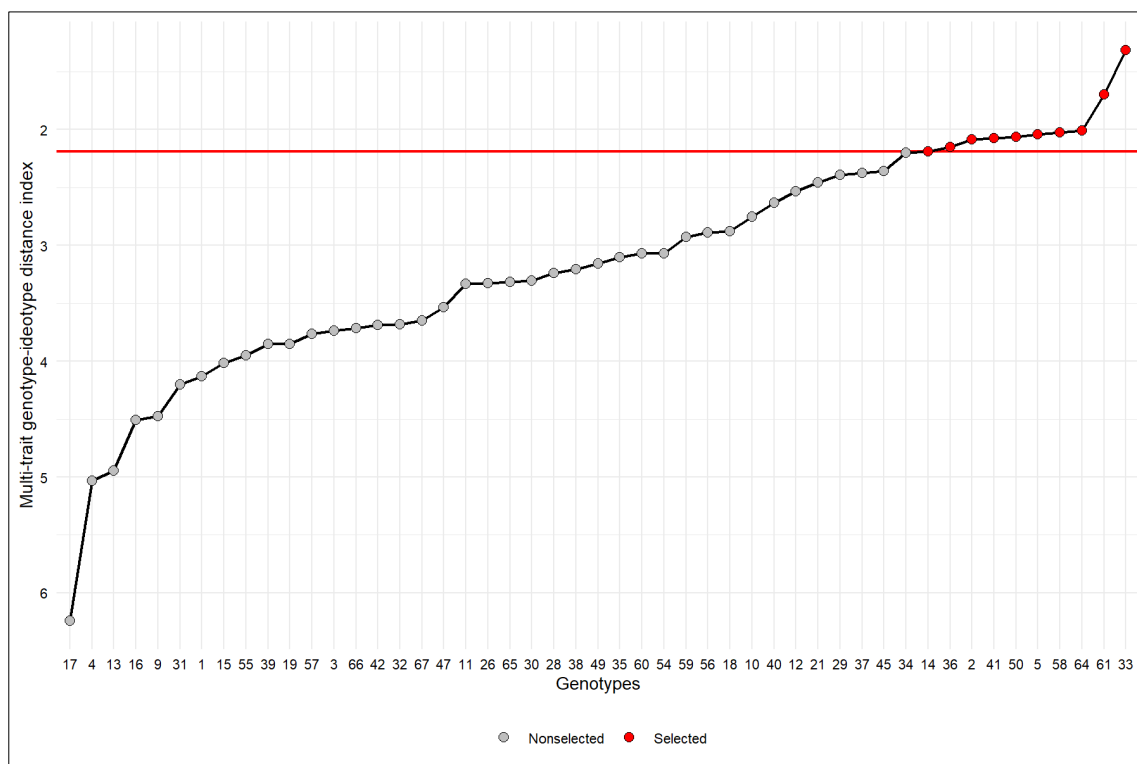


Fig. 14 Proveniențele de duglas selectate pe baza indicelui MGIDI în cultura comparativă Făget

În cultura comparativă Padeș, aplicarea indicelui MGIDI a condus la selectarea unor proveniențe provenite din patru țări: SUA (5), Germania (1), Franța (1) și România (1). Proveniențele selectate din SUA au fost 19 – Pine Grove, 2 – Idaho (var. *glauca*), 4 – Boise (var. *glauca*) și 30 – Hoodsport (Washington). Din Germania a fost selectată proveniența 40 – Darrington III, din Franța proveniența 49 – Poinat–Puy de Dôme, iar din România proveniența 60 – Nădrăgel (Figura 14).

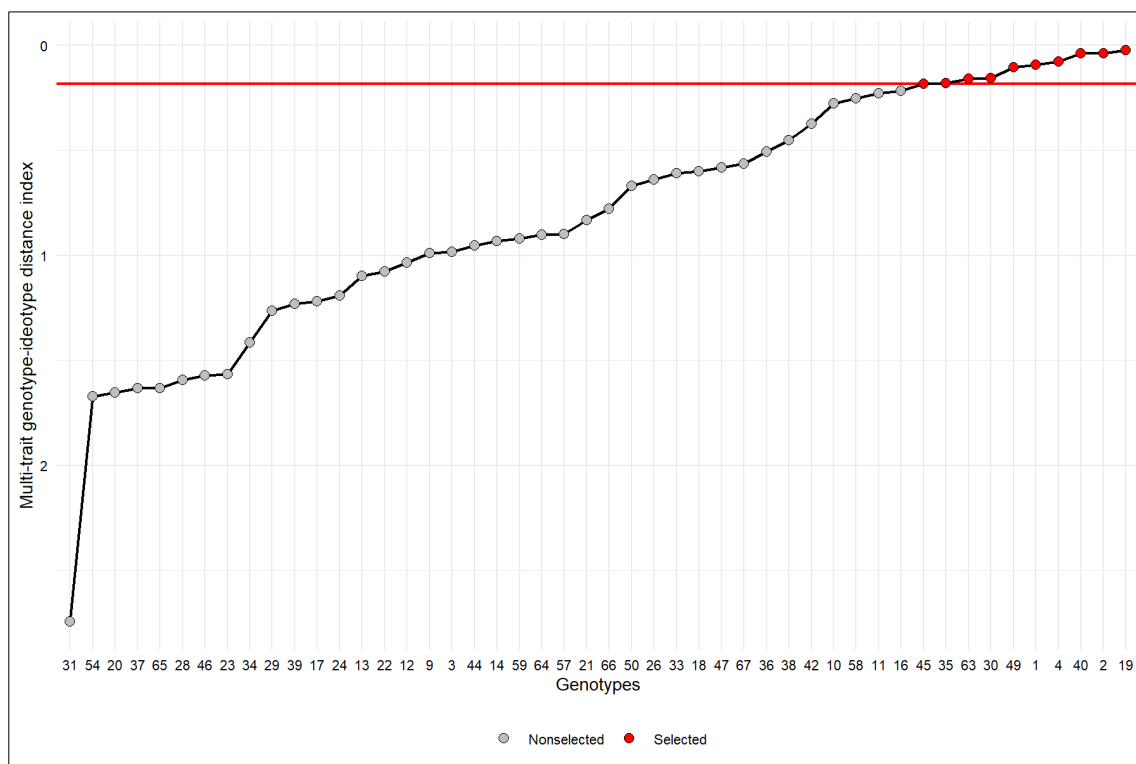


Fig. 15 Proveniențele de duglas selectate pe baza indicelui MGIDI în cultura comparativă Padeș

4.4.2. Selecția proveniențelor pe baza indicelui MTSI la nivelul culturilor comparative

Pe baza performanței și stabilității caracteristicilor DBH, HT și SV integrate în indicele MTSI, au fost selectate opt proveniențe cu comportament stabil în cele trei culturi comparative (Tabel 9). Acestea provin din SUA (3), Canada (1), România (1), Franța (2) și Germania (1) (Figura 16).

Proveniențele selectate sunt: 36 – Skykomish–Beckler Peak, 37 – Concrete–Presentin Creek și 30 – Hoodsport (SUA), 10 – Franklin River (Canada), 58 – Piatra Albă (România), 45 – Poinat–Puy de Dôme și 47 – Moussans II (Franța) și 39 – Daun Ost (Germania).

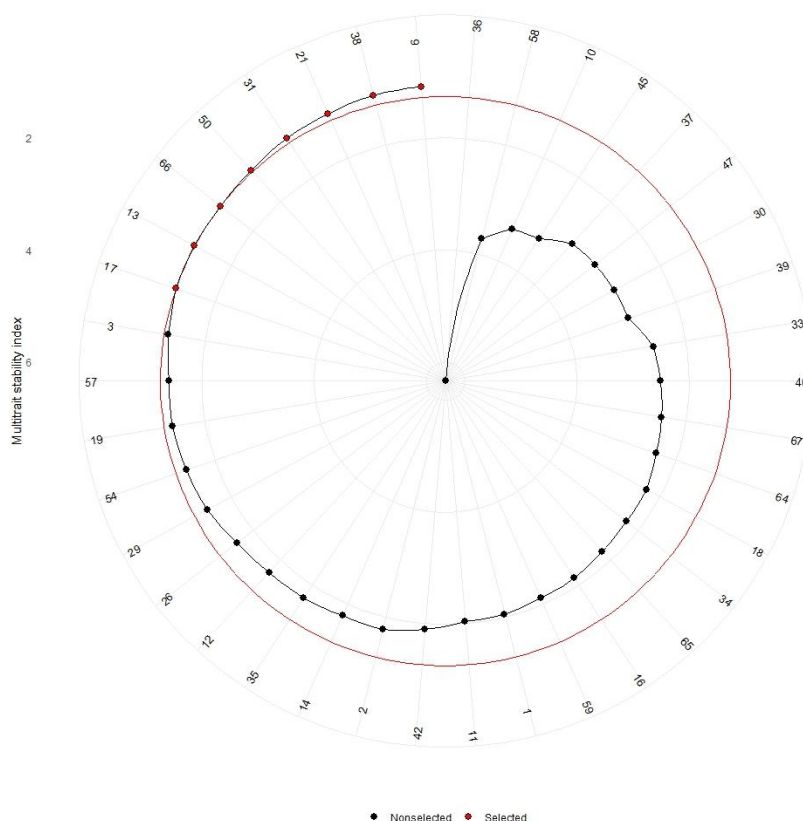


Fig. 16 Proveniențele de duglas selectate pe baza indicelui MTSI în cele trei culturi comparative

Notă: Intensitatea selecției este de 20 % (linia roșie). Punctele reprezintă valorile indicelui MTSI. Punctele roșii corespund proveniențelor selectate.

Tab. 9 Diferențele obținute prin selecția cu ajutorul indicelui MTSI a proveniențelor de duglas testate

Caracter	Media culturii comparative			Media proveniențelor selectate			Diferența %		
	Aleșd	Făget	Padeș	Aleșd	Făget	Padeș	Aleșd	Făget	Padeș
DBH	35,9	28,8	34,7	37,1	30,1	36,1	3,2	4,6	4
HT	30,2	29,6	28,8	30,9	30,1	29,3	2,4	1,7	2,6
SV	18,5	17,9	16,6	25,3	21,9	20	35	22,3	20,2

Notă: DBH – diametrul la 1,30 m; HT – înălțimea totală; SV – supraviețuirea

4.4.3. Discuții asupra selecției multivariate cu indicii de selecție MGIDI și MTSI

Rezultatele evidențiază potențialul ridicat de adaptare al duglasului în România și relevanța selecției multivariate pentru programele de ameliorare. Proveniențele selectate au depășit mediile pe experiment pentru toate caracteristicile analizate, confirmând eficiența utilizării indicilor de selecție. Aplicarea indicelui MGIDI a permis identificarea unor proveniențe performante în fiecare cultură comparativă, menținând totodată diversitatea genetică printr-o intensitate a selecției de 20% (Tabel 8).

Câștigurile genetice au fost evidente pentru toate caracteristicile, cele mai ridicate fiind înregistrate pentru supraviețuire, în special la Aleșd și Făget, în concordanță cu studiile privind variabilitatea și adaptabilitatea duglasului (Alexandru et al. 2023; Liepe et al. 2024; Li et al. 2017). Pentru DBH și HT, câștigurile au fost moderate, dar relevante pentru programele de ameliorare, confirmând rolul acestora în creșterea productivității și a valorii economice (Isaac-Renton et al. 2025).

Proveniențele selectate au variat între locații, reflectând influența condițiilor staționale asupra performanței. La Aleșd, selecția a inclus proveniențe din mai multe regiuni geografice, indicând un potențial genetic ridicat în condiții favorabile (Peláez et al. 2024), în timp ce la Făget și Padeș selecția a fost mai restrânsă, evidențiind un control mai puternic al factorilor de mediu. Prezența proveniențelor românești în grupurile selectate confirmă adaptarea acestora la condițiile locale.

Aplicarea indicelui MTSI a permis identificarea unor proveniențe stabile la nivelul tuturor culturilor comparative, combinând performanța și stabilitatea caracteristicilor analizate (Tabel 9). Câștigurile genetice obținute prin această abordare au fost mai ridicate pentru supraviețuire, confirmând eficiența selecției pentru caracteristici adaptative. Rezultatele sunt în concordanță cu studiile internaționale care evidențiază superioritatea proveniențelor de coastă în diferite condiții ecologice (Low et al. 2012; Malmqvist et al. 2018).

Proveniențele selectate, prin originea lor ecologică variată și adaptabilitatea demonstrată, pot contribui semnificativ la promovarea unor proveniențe mai reziliente și mai adaptate în contextul schimbărilor climatice. Aceste rezultate sunt relevante pentru elaborarea strategiilor viitoare de ameliorare și pentru managementul forestier al duglasului în vestul și sud-vestul României.

4.5. Corelațiile fenotipice dintre principalele caracteristici analizate

Analiza corelațiilor fenotipice dintre principalele caracteristici analizate evidențiază gradul de asociere existent între caracteristici la nivel fenotipic, ca rezultat al acțiunii combinate a factorilor genetici și de mediu. Rezultatele obținute indică relații diferențiate dintre caracteristici, variind de la corelații slabe sau puternice, pozitive sau negative. Corelațiile fenotipice au fost realizate separat pentru fiecare cultură comparativă.

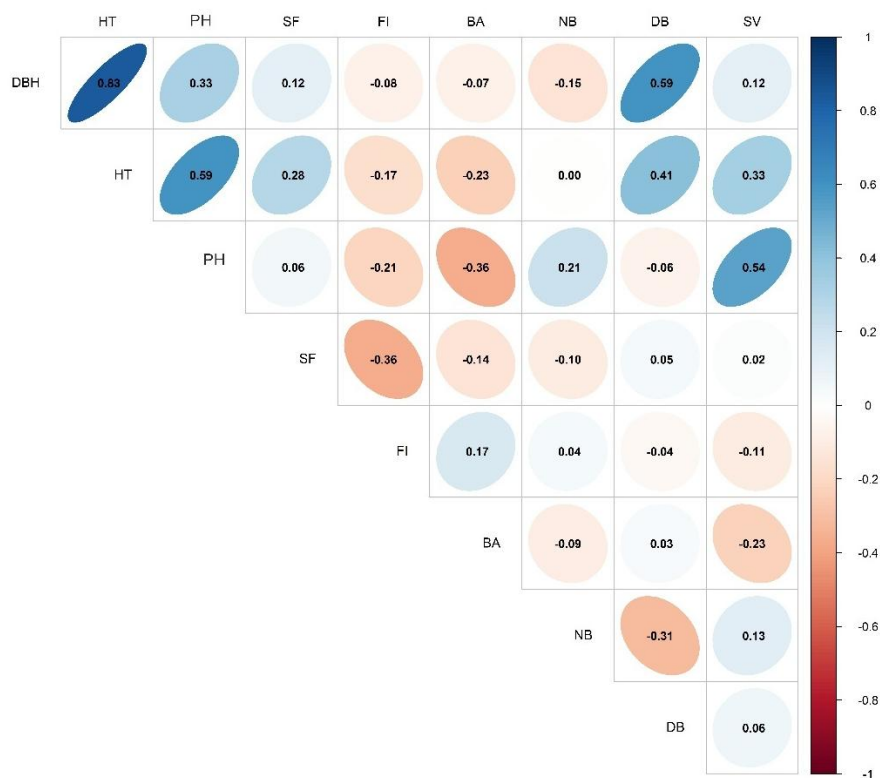


Fig. 17 Corelațiile Pearson dintre caracteristicile analizate în cultura comparativă Aleșd

În cultura comparativă Aleșd, se evidențiază corelații pozitive între DBH – HT ($r = 0,83$), DBH – DB ($r = 0,59$) și HT – PH ($r = 0,59$), HT – DB ($r = 0,41$), DBH – PH ($r = 0,33$), HT – SV ($r = 0,33$) și PH – SV ($r = 0,54$). În ceea ce privește corelațiile negative, se evidențiază între PH – BA ($r = -0,36$), SF – FI ($r = -0,36$), BA – SV ($r = -0,23$) și HT – FI ($r = -0,23$) (Figura 20). Celelalte perechi de caracteristici au prezentat corelații slabe, cu valori ale coeficientului Pearson apropiate de zero, indicând legături slabe între acestea.

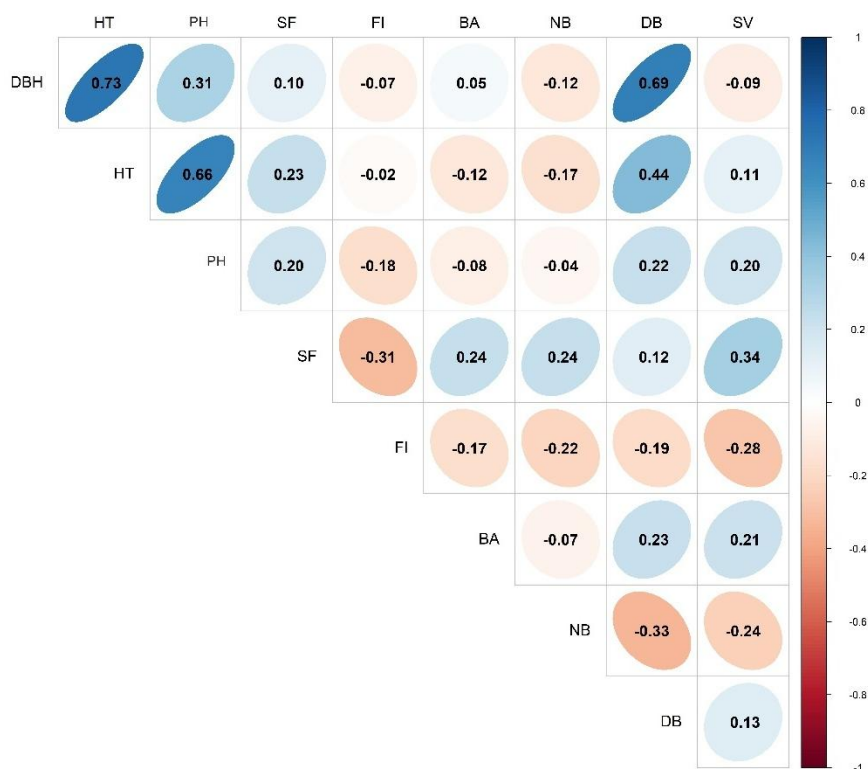


Fig. 18 Corelațiile Pearson dintre caracteristicile analizate în cultura comparativă Făget

În cultura comparativă Făget, se evidențiază corelații pozitive între DBH – HT ($r = 0,73$), DBH – PH ($r = 0,31$), DBH – DB ($r = 0,69$), HT – PH ($r = 0,66$), HT – DB ($r = 0,44$), SF – SV ($r = 0,34$). În ceea ce privește corelațiile negative, se evidențiază între SF – FI ($r = -0,31$), FI – SV ($r = -0,28$), NB – DB ($r = -0,33$) și NB – SV ($r = -0,24$) (Figura 30). Celelalte perechi de caracteristici au prezentat corelații slabe, cu valori ale coeficientului Pearson apropiate de zero, indicând relații slabe între acestea.

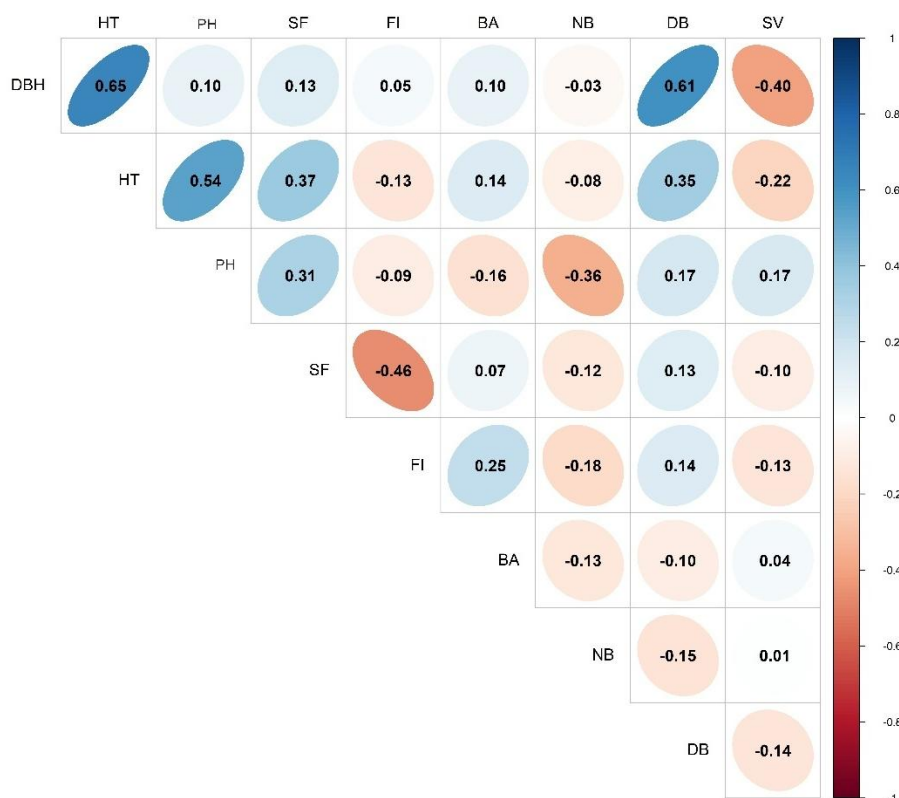


Fig. 19 Corelațiile Pearson dintre caracteristicile analizate în cultura comparativă Padeș

În cultura comparativă Padeș, se evidențiază corelații pozitive între DBH – HT ($r = 0,65$), DBH – DB ($r = 0,61$), HT – PH ($r = 0,54$), HT – SF ($r = 0,37$), HT – DB ($r = 0,35$), PH – SF ($r = 0,31$) și FI – BA ($r = 0,25$). În ceea ce privește corelațiile negative, se evidențiază între DBH – SV ($r = -0,40$), PH – NB ($r = -0,36$) și SF – FI ($r = -0,46$). Celelalte perechi de caracteristici au prezentat corelații slabe, cu valori ale coeficientului Pearson apropiate de zero, indicând relații slabe între acestea.

4.6. Corelațiile dintre principalele caracteristici analizate și gradientii geografici de origine ai proveniențelor

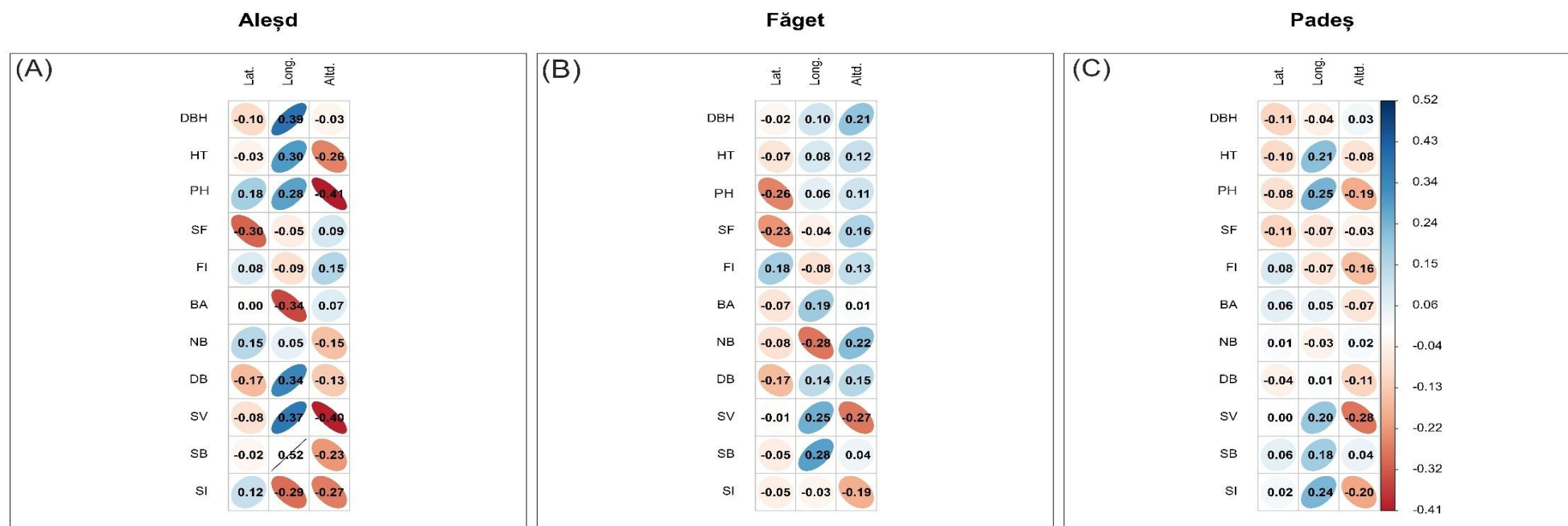


Fig. 20 Corelațiile Pearson dintre principalele caracteristici analizate și gradientii geografici de origine ai proveniențelor (latitudine, longitudine și altitudine) în fiecare cultură comparativă (Aleșd – panou A, Făget – panou B și Padeș – panou C).

În cultura comparativă Aleșd, se evidențiază corelații cu gradientii geografici pentru mai multe caracteristici analizate. În raport cu *latitudinea*, au fost observate corelații negative pentru SF ($r = -0,30$) și DB ($r = -0,17$), respectiv corelații pozitive pentru PH ($r = 0,18$), NB ($r = 0,15$) și SI ($r = 0,12$). În raport cu *longitudinea*, se remarcă corelații pozitive pentru DBH ($r = 0,39$), HT ($r = 0,30$), PH ($r = 0,28$), DB ($r = 0,34$), SV ($r = 0,37$) și SB ($r = 0,52$), în timp ce BA ($r = -0,34$) și SI ($r = 0,29$) prezintă corelații negative. Față de *altitudine*, corelații negative au fost identificate pentru PH ($r = -0,41$), SV ($r = -0,40$), HT ($r = -0,26$), SI ($r = -0,27$) și SB ($r = -0,23$) (Figura 20 – panel A).

În cultura comparativă Făget, au fost identificate corelații între caracteristicile analizate și gradientii geografici, în general de intensitate redusă până la moderată. În raport cu *latitudinea*, se evidențiază corelații negative pentru PH ($r = -0,26$) și SF ($r = -0,23$), respectiv o corelație pozitivă pentru FI ($r = 0,18$). În raport cu *longitudinea*, au fost observate corelații pozitive pentru BA ($r = 0,19$), DB ($r = 0,14$), SV ($r = 0,25$) și SB ($r = 0,28$), în timp ce NB prezintă o corelație negativă ($r = -0,28$). Față de *altitudine*, se remarcă corelații pozitive pentru DBH ($r = 0,21$), SF ($r = 0,16$), FI ($r = 0,13$), NB ($r = 0,22$) și DB ($r = 0,15$), precum și corelații negative pentru SV ($r = -0,27$) și SI ($r = -0,19$) (Figura 20 – panel B).

În cultura comparativă Padeș, corelațiile dintre caracteristicile analizate și gradientii geografici au fost, în general, de intensitate redusă. În raport cu *latitudinea*, au fost observate corelații negative pentru DBH ($r = -0,11$), HT ($r = -0,10$), PH ($r = -0,08$) și SF ($r = -0,11$), precum și corelații pozitive pentru FI ($r = 0,08$) și BA ($r = 0,06$). În raport cu *longitudinea*, se evidențiază corelații pozitive pentru HT ($r = 0,21$), PH ($r = 0,25$), SV ($r = 0,20$), SI ($r = 0,24$) și SB ($r = 0,18$), în timp ce corelații negative au fost identificate pentru SF ($r = -0,07$) și FI ($r = -0,07$). Față de *altitudine*, se remarcă corelații negative pentru PH ($r = -0,19$), FI ($r = -0,16$), DB ($r = -0,11$), SV ($r = -0,28$) și SI ($r = -0,20$) (Figura 20 – panel C).

4.6.1 Discuții asupra corelațiilor fenotipice și geografice

Corelațiile fenotipice evidențiază integrarea caracteristicilor de creștere, a calității lemnului și a adaptabilității sub influența interacțiunii dintre potențialul genetic și condițiile locale. În toate culturile comparative, cele mai puternice corelații sunt între DBH și HT, cu intensitate maximă la Aleșd și mai redusă la Făget și Padeș.

La Aleșd, corelațiile pozitive între caracteristicile de creștere, calitatea lemnului și supraviețuire indică o corelație între performanță și adaptabilitate, iar cele negative sugerează compromisuri între creștere și calitatea trunchiului (Macdonald și Hubert 2002). La Făget, corelațiile sunt moderate, iar relațiile negative sugerează că o calitate mai slabă a trunchiului poate fi asociată cu o supraviețuire mai redusă. La Padeș, relațiile sunt mai heterogene, iar creșterea nu este întotdeauna asociată cu supraviețuirea.

În ansamblu, intensitatea corelațiilor este cea mai ridicată la Aleșd, intermediară la Făget și cea mai redusă la Padeș, evidențiind influența condițiilor staționale (Macdonald și Hubert 2002). Caracteristicile coroanei sunt importante pentru calitatea lemnului și pot fi utilizate în selecție (Osborne și Maguire 2016; Briggs et al. 2007), iar relațiile dintre creștere și densitatea lemnului indică un compromis între productivitate și rezistență (El-Kassaby et al. 2011; Howe et al. 2006).

Corelațiile cu gradientii geografici arată influențe variabile între culturi: Aleșd prezintă cele mai semnificative corelații, Făget corelații moderate, iar Padeș corelații slabe. În general, latitudinea, longitudinea și altitudinea influențează caracteristicile analizate, reflectând adaptarea diferențiată a proveniențelor la condițiile ecologice (Climent et al. 2024; Liao et al. 2024; Georgieva et al. 2024).

4.9. Funcțiile de transfer la condițiile climatice ale locului de testare

Performanța proveniențelor este influențată de diferențele dintre condițiile climatice ale locului de origine și ale locului de testare ($\Delta C = C_{test} - C_{origin}$). Funcțiile de transfer descriu relația dintre creșterea arborilor și diferențele climatice, oferind un instrument util pentru evaluarea adaptabilității proveniențelor și identificarea pragurilor sau zonelor optime.

Tab. 10 Modelele funcțiilor de transfer pentru diametrul la 1,30 cm (DBH)

Cultura	Modelul	Adj. R ²	Partial R ²	
			Factor 1	Factor 2
Aleșd	38,16 – 0,44 BIO8* + 14,97 SPI03*	0,19**	0,29	0,29
Făget	29,15 – 0,09 AHM* – 8,77 SPI01*	0,16 *	0,14	0,12
Padeș	30,41 + 10,10 SPI09 – 0,34 BIO3	0,12 *	0,14	0,11

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); BIO8 – Temperatura medie a celui mai umed trimestru (°C); SPI03 – Indicele standardizat de precipitații calculat pe 3 luni (index); AHM – Indicele anual de căldură-umiditate (°C / mm); SPI01 – Indicele standardizat de precipitații calculat pe 1 lună (index); SPI09 – Indicele standardizat de precipitații calculat pe 9 luni (index); BIO3 – Izotermalitatea (index); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de transfer pentru diametrul la 1,30 m (DBH) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabel 10). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 19% din variația totală (Adj. R² = 0,19; $p \leq 0,01$), iar contribuția fiecărui predictor la variația explicată a fost de 0,29. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 16% (Adj. R² = 0,16; $p \leq 0,05$), cu valori R² de 0,14 și 0,12 pentru cei doi predictori incluși. În cultura comparativă Padeș, modelul a explicat 12% din variația DBH (Adj. R² = 0,12; $p \leq 0,05$), iar valorile R² au fost de 0,14 și 0,11 pentru cei doi predictori incluși.

Tab. 11 Modelele funcțiilor de transfer pentru înălțimea totală (HT)

Cultura	Modelul	Adj. R ²	Partial R ²	
			Factor 1	Factor 2
Aleșd	33,17 – 0,33 BIO8* – 15,19 SPEI06	0,23**	0,45	0,30
Făget	28,42 + 10,95 SPEI08* – 0,02 bFFP	0,10*	0,18	0,8
Padeș	28,04 + 0,04 AHM – 0,13 BIO3	0,16 *	0,14	0,12

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); BIO8 – Temperatura medie a celui mai umed trimestru (°C); SPEI06 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 6 luni (index); SPEI08 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 8 luni (index); bFFP – zilele fără îngheț; AHM – Indicele anual de căldură-umiditate (°C / mm); BIO3 – Izotermalitatea (index); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de transfer pentru înălțimea totală (HT) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabelul 11). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 23% din variația totală (Adj. R² = 0,23; $p \leq 0,01$), cu valori R² de 0,45 și 0,30 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 10% (Adj. R² = 0,10; $p \leq 0,05$), cu valori R² de 0,18 și 0,8 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Padeș, modelul a explicat 16% din variația HT (Adj. R² = 0,16; $p \leq 0,05$), iar valorile R² au fost de 0,14 și 0,12 pentru cei doi predictorii incluși.

Tab. 12 Modelele funcțiilor de transfer pentru supraviețuire (SV)

Cultura	Modelul	adj. R ²	Partial R ²
Aleșd	14,31 – 1,06 BIO6***	0,36***	0,38
Făget	12,20 – 0,01BIO13 **	0,15*	0,24
Padeș	13,44 – 0,004 BIO19*	0,10*	0,14

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); BIO6 – Temperatura minimă a celei mai reci luni (°C); BIO13 – Precipitațiile din cele mai umede luni (mm); BIO19 – Precipitațiile din cel mai rece trimestru (mm); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de transfer pentru supraviețuire (SV) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabelul 12). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 36% din variația totală (Adj. R² = 0,36; $p \leq 0,001$), cu o valoare a predictorului R² de 0,38. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 15% (Adj. R² = 0,15; $p \leq 0,01$), cu o valoare a predictorului R² de

0,24. În cultura comparativă Padeș, modelul a explicat 10% din variația HT (Adj. $R^2 = 0,14$; $p \leq 0,05$), cu o valoare a predictorului R^2 de 0,14.

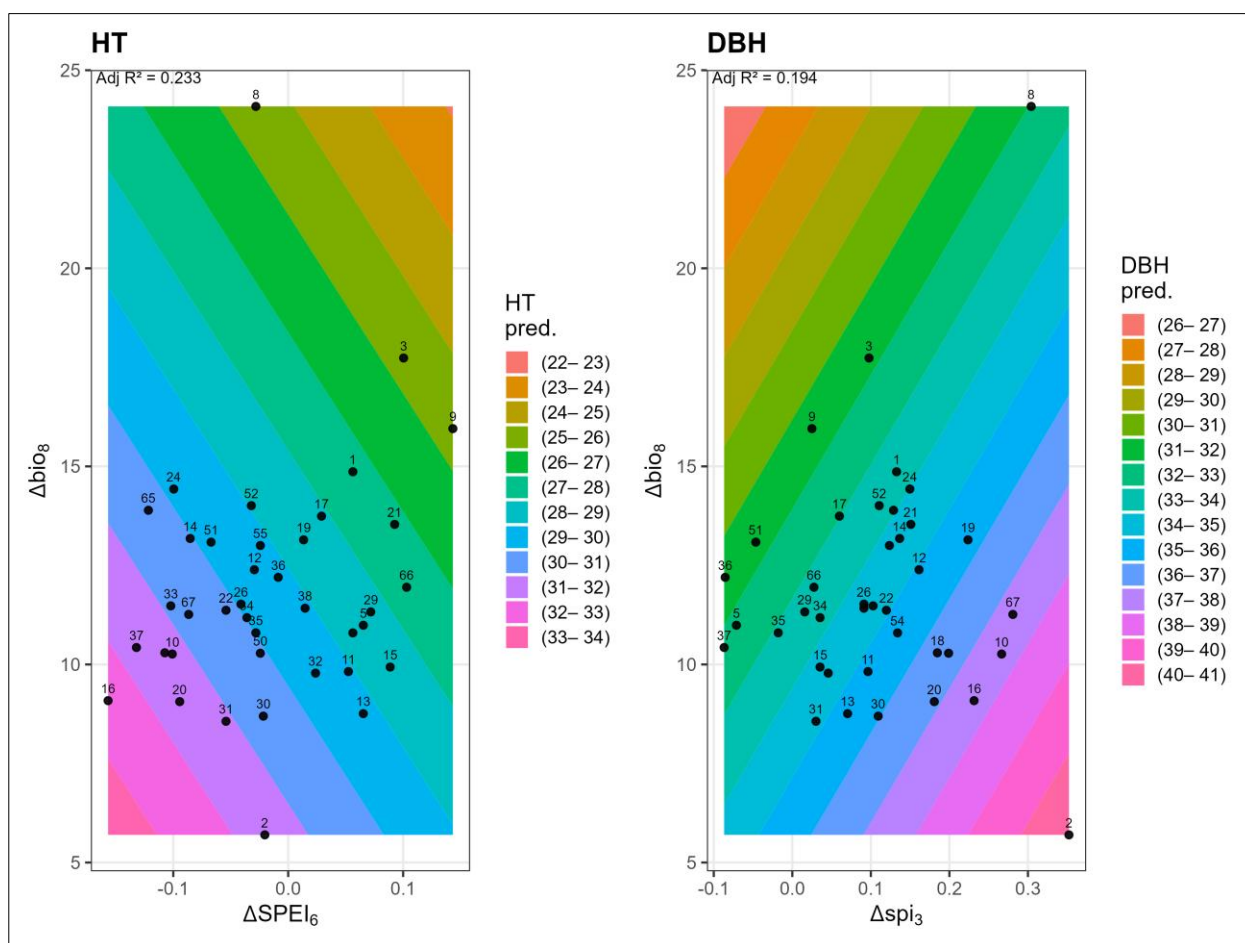


Fig. 21 Funcții de transfer ale înălțimii totale (HT) și ale diametrului la 1,30 m (DBH) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Aleșd

Notă: Figura reprezintă funcțiile de transfer pentru HT și DBH pentru proveniențele de douglas testate în cultura comparativă Aleșd. În panoul din stânga, HT este modelată în funcție de ΔSPEI_6 și Δbio_8 (Adj. $R^2 = 0,23$), iar în panoul din dreapta, DBH este modelat în funcție de Δspi_3 și Δbio_8 (Adj. $R^2 = 0,19$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT și DBH, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

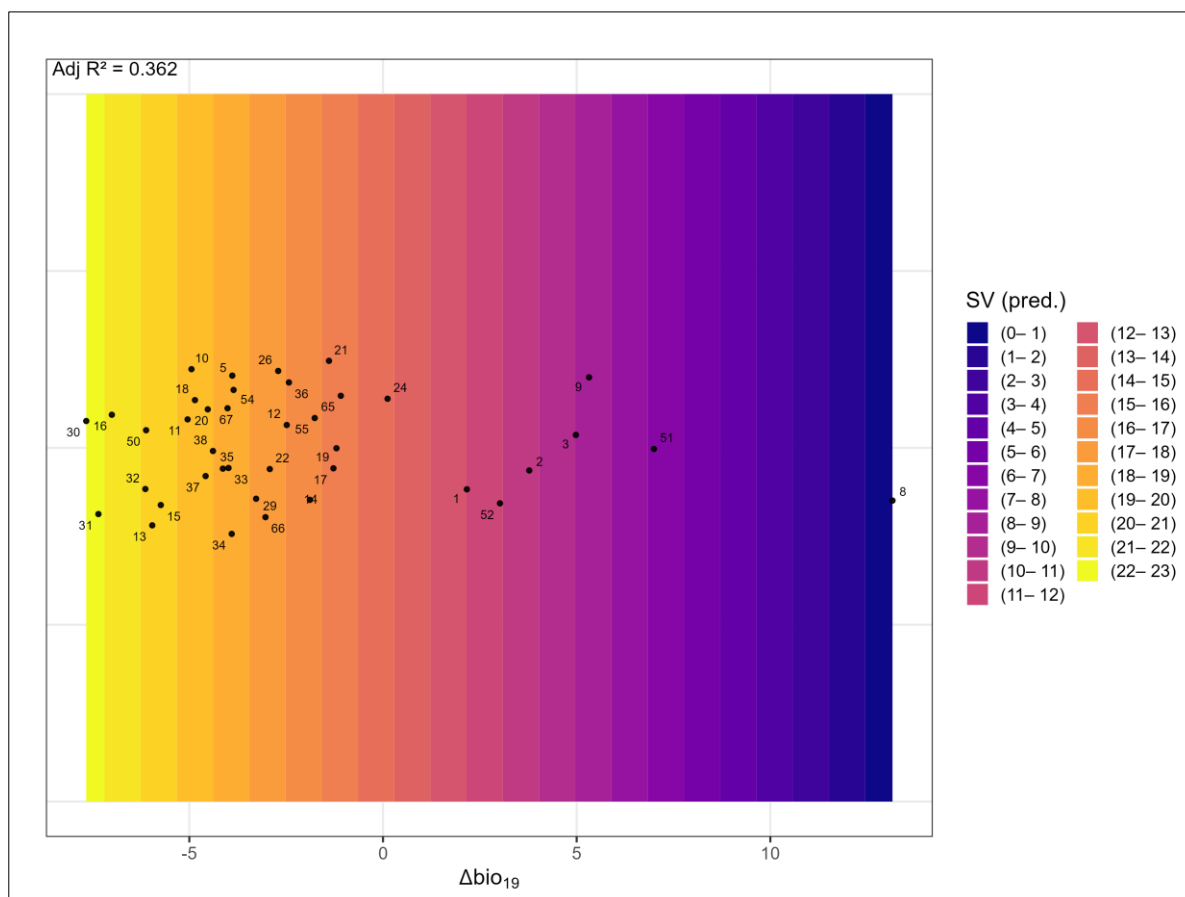


Fig. 22 Funcția de transfer univariată a supraviețuirii (SV) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Aleșd

Notă: Figura reprezintă funcția de transfer univariată a SV pentru proveniențele de douglas testate în cultura comparativă Aleșd în raport cu Δbio_{19} (Adj. $R^2 = 0,36$). Benzile colorate indică valorile prezise ale SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

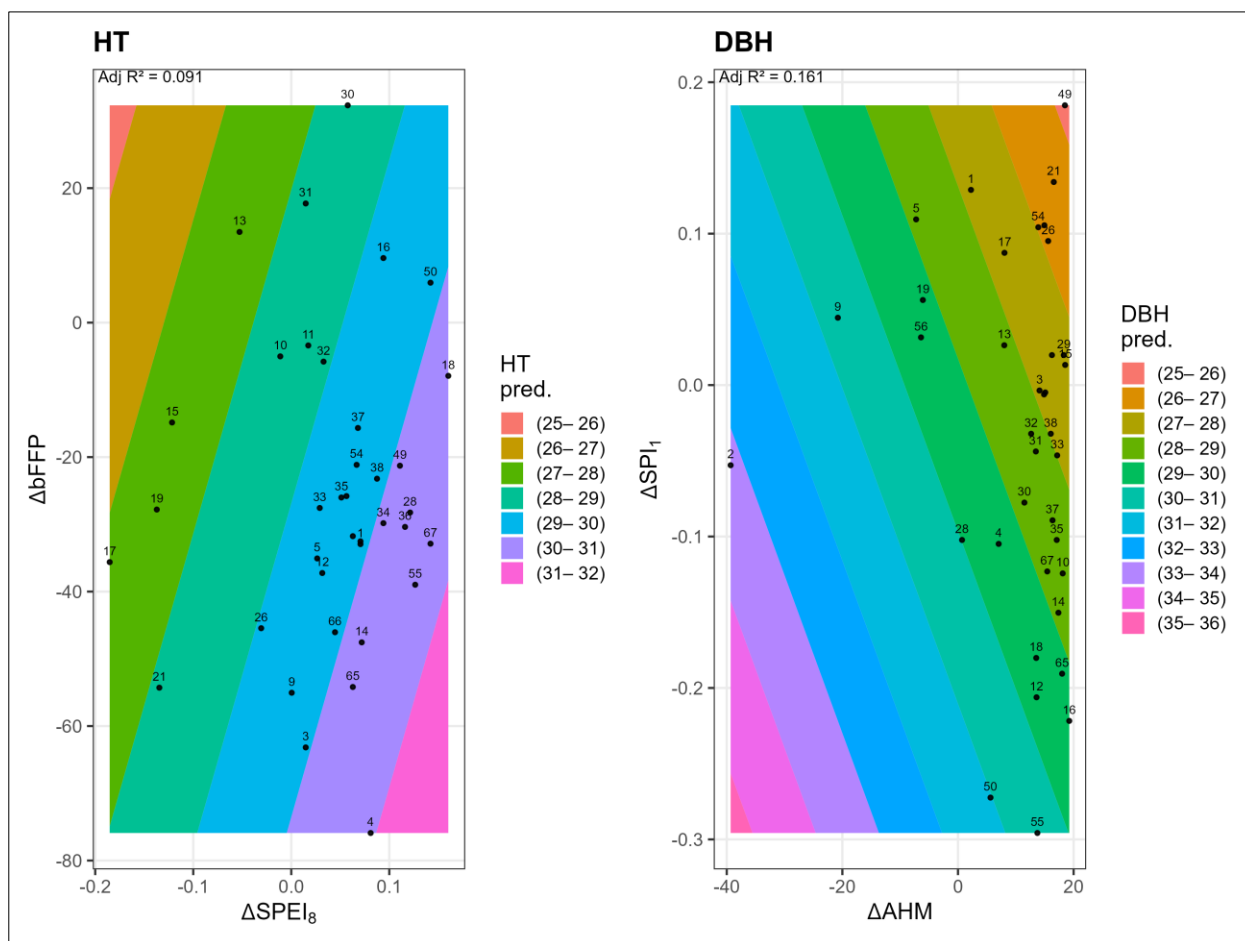


Fig. 23 Funcții de transfer ale înălțimii totale (HT) și ale diametrul la 1,30 m (DBH) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Făget

Notă: Figura reprezintă funcțiile de transfer pentru HT și DBH pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Făget. În panoul din stânga, HT este modelată în funcție de ΔSPEI_8 și $\Delta b\text{FFP}$ (Adj. $R^2 = 0,9$), iar în panoul din dreapta, DBH este modelat în funcție de ΔAHM și ΔSPI_1 (Adj. $R^2 = 0,16$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT și DBH, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

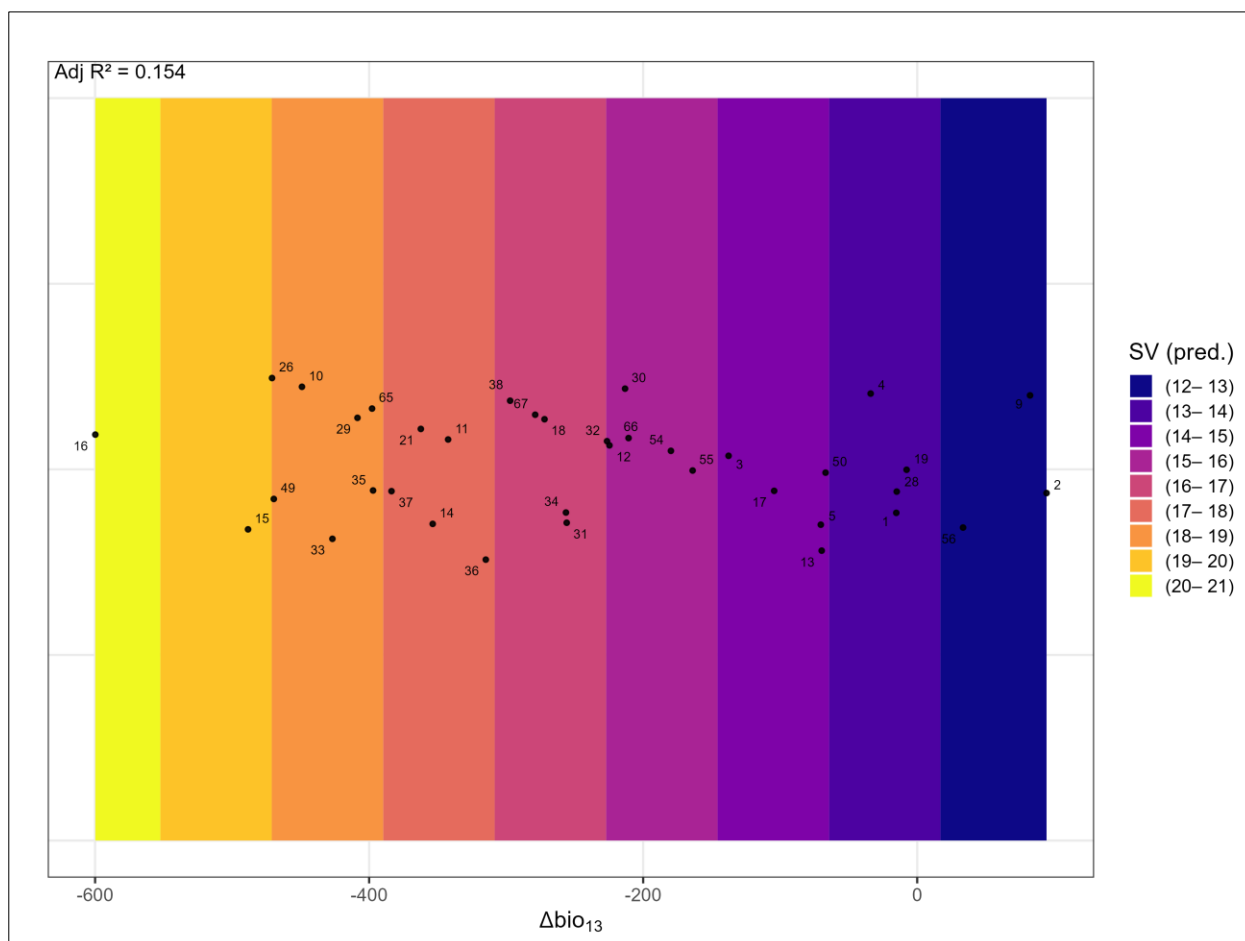


Fig. 24 Funcția de transfer univariată a supraviețuirii (SV) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Făget

Notă: Figura reprezintă funcția de transfer univariată a SV pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Făget în raport cu Δbio_{13} (Adj. $R^2 = 0,15$). Benzile colorate indică valorile prezise ale SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

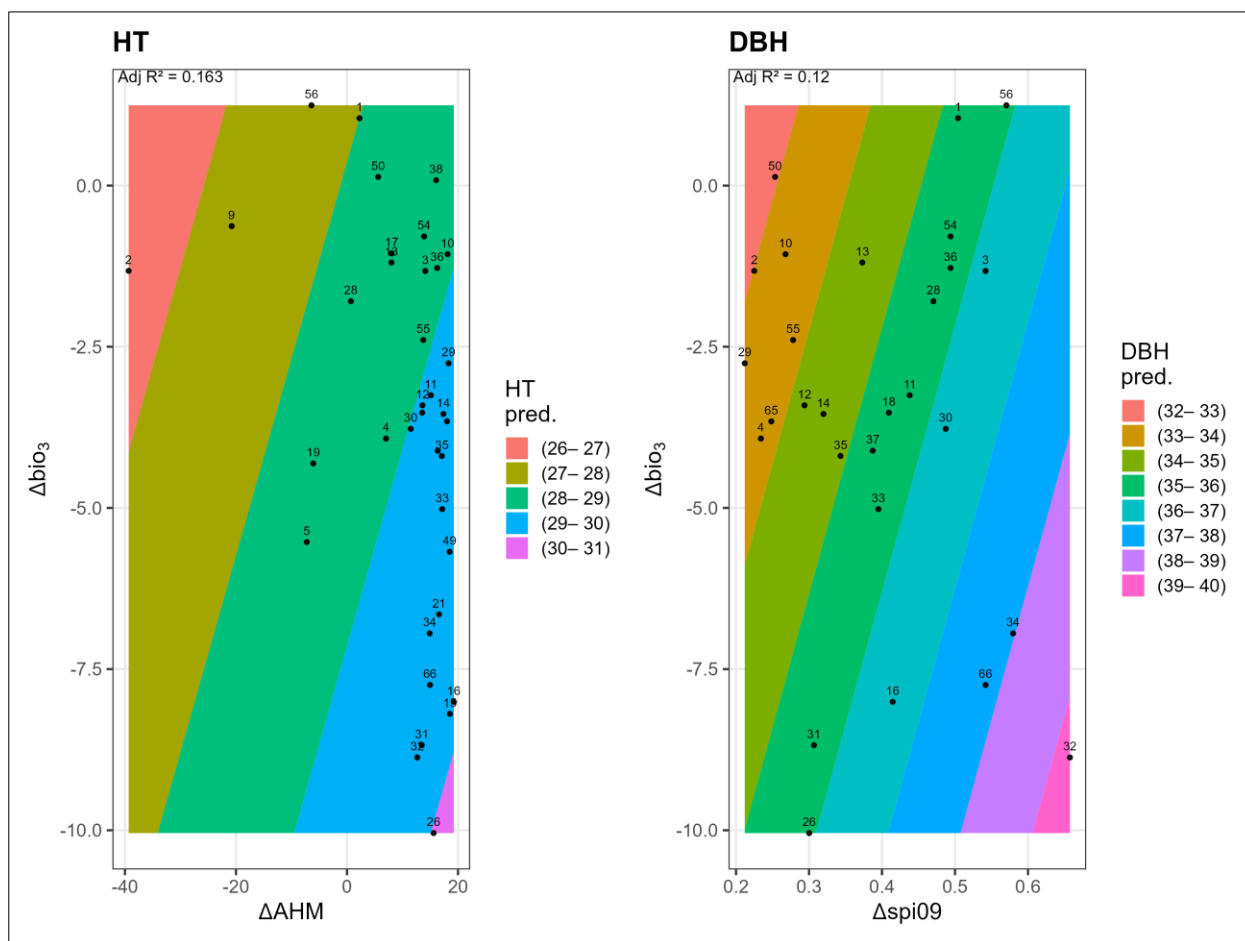


Fig. 25 Funcții de transfer ale înălțimii totale (HT) și ale diametrul la 1,30 m (DBH) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Padeș

Notă: Figura reprezintă funcțiile de transfer pentru HT și DBH pentru proveniențele de douglas testate în cultura comparativă Padeș. În panoul din stânga, HT este modelată în funcție de ΔAHM și Δbio_3 ($\text{Adj. } R^2 = 0,16$), iar în panoul din dreapta, DBH este modelat în funcție de Δspi09 și Δbio_3 ($\text{Adj. } R^2 = 0,12$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT și DBH, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

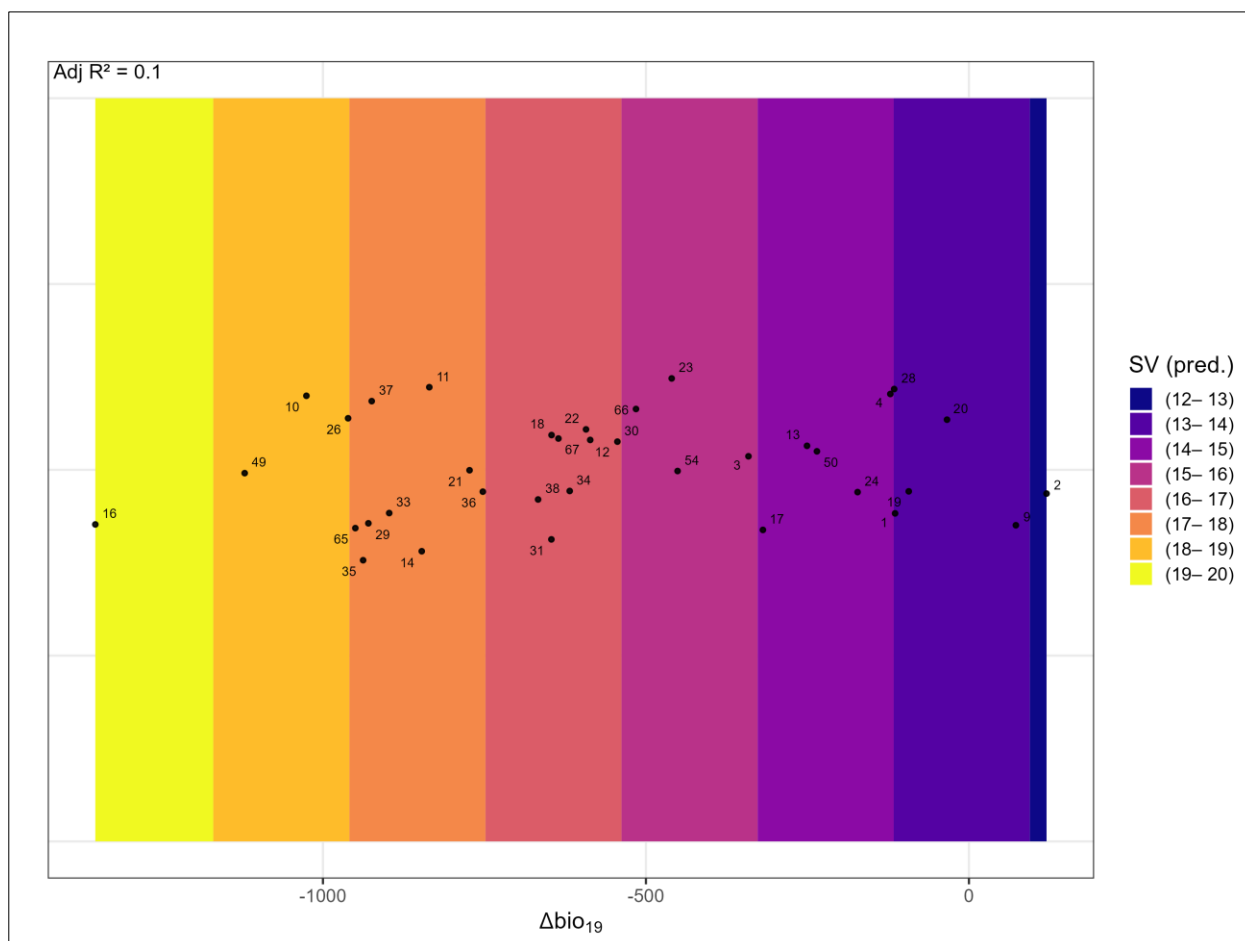


Fig. 26 Funcția de transfer univariată a supraviețuirii (SV) în funcție de diferența climatică dintre locul de origine și Padeș

***Notă:** Figura reprezintă funcția de transfer univariată a SV pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Padeș în raport cu $\Delta bio19$ ($Adj. R^2 = 0,1$). Benzile colorate indică valorile prezise ale SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.*

4.9. Funcțiile de răspuns la condițiile climatice ale locului de testare

Pentru a evalua sensibilitatea proveniențelor de duglas la condițiile climatice din fiecare loc de testare, au fost determinate funcții de răspuns care descriu relația dintre HT, DBH și SV și variabilele climatice ale locului de testare. Spre deosebire de funcțiile de transfer, care integrează diferențele climatice dintre locul de origine și locul de testare, funcțiile de răspuns analizează influența climatului locului de testare asupra performanței proveniențelor.

Tab. 13 Modelele funcțiilor de răspuns pentru diametrul la 1,30 cm (DBH)

Cultura	Modelul	Adj. R^2	Partial R^2	
			Factor 1	Factor 2
Aleșd	$27,84 + 0,35 \text{ BIO9}^* - 14,87 \text{ SPEI03}^*$	0,18**	0,15	0,13

Făget	28,84 + 5,16 SPEI02 – 191,51 SPEI02 ^{2*} + 10,79 SPEI03 + 74,42 SPEI03 ^{2**}	0,21*	0,21	0,19
Padeș	34 – 10,11 SPI09	0,9*	0,15	

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***) ; BIO9 – Temperatura medie a trimestrului celui mai secetos (°C); SPEI02 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 2 luni (index); SPEI03 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 3 luni (index); SPI09 – indicele standardizat al precipitațiilor calculat pe 9 luni (index); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de răspuns pentru diametrul la 1,30 m (DBH) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabelul 13). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 18% din variația totală (Adj. R² = 0,18; $p \leq 0,01$), cu valori R² de 0,15 și 0,13 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 21% (Adj. R² = 0,21; $p \leq 0,05$), cu valori R² de 0,21 și 0,19 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Padeș, modelul a explicat 9% din variația HT (Adj. R² = 0,9; $p \leq 0,05$), cu o valoare a predictorului R² de 0,15.

Tab. 14 Modelele funcțiilor de răspuns pentru înălțimea totală (HT)

Cultura	Modelul	Adj. R ²	Partial R ²	
			Factor 1	Factor 2
Aleșd	27,28 + 0,43 BIO8** – 11,55 SPI03*	0,25 **	0,12	0,11
Făget	28,34 – 10,45 SPEI08 + 16,74 SPEI02* – 160,91 SPEI02 ^{2*}	0,19 *	0,17	0,16
Padeș	-20,80 + 3,69 BIO5** – 0,06 BIO5 ^{2**}	0,21 **	0,25	

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***) ; BIO8 – Temperatura medie a trimestrului celui mai secetos (°C); SPI03 – Indicele standardizat de precipitații calculat pe 3 luni (index); SPEI08 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 3 luni (index); SPEI02 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 2 luni (index); BIO5 – Temperatura maximă a celei mai calde luni (°C); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de răspuns pentru înălțimea totală (HT) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabelul 14). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 25% din variația totală (Adj. R² = 0,25; $p \leq 0,01$), cu valori R² de 0,12 și 0,11 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 19% (Adj. R² = 0,19; $p \leq 0,05$), cu valori R² de 0,17 și 0,16 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Padeș, modelul a explicat 21% din variația HT (Adj. R² = 0,21; $p \leq 0,01$), cu o valoare a predictorului R² de 0,25.

Tab. 15 Modelele funcțiilor de răspuns pentru supraviețuire (SV)

Cultura	Modelul	Adj. R ²	Partial R ²	
			Factor 1	Factor 2
Aleşd	19,05 + 0,96 BIO6*** + 35,34 SPEI06**	0,47 ***	0,36	0,19
Făget	12,98 + 0,002 BIO12* + 19,66 SPEI05	0,29 **	0,37	0,30
Padeș	3,85 + 0,04 SHM* + 0,004 BIO12**	0,19 *	0,18	0,15

Notă: $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**), și $p \leq 0,001$ (***); BIO6 – Temperatura minimă a celei mai reci luni (°C); SPEI06 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 6 luni (index); BIO12 – Precipitațiile medii anuale (mm); SPEI05 – Indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 5 luni (index); SHM – Indicele estival de căldură-umiditate (°C / mm); Adj. R² – proporția variației explicate de model; Partial R² – proporția din variația totală explicată de un predictor.

Modelele funcțiilor de răspuns pentru supraviețuire (SV) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative (Tabelul 15). În cultura comparativă Aleșd, modelul a explicat 47% din variația totală (Adj. R² = 0,36; $p \leq 0,001$), cu valori R² de 0,36 și 0,19 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Făget, proporția variației explicate de model a fost de 29% (Adj. R² = 0,29; $p \leq 0,01$), cu valori R² de 0,37 și 0,30 pentru cei doi predictorii incluși. În cultura comparativă Padeș, modelul univariat a explicat 19% din variația SV (Adj. R² = 0,19; $p \leq 0,05$), cu valori R² de 0,18 și 0,15 pentru cei doi predictorii incluși.

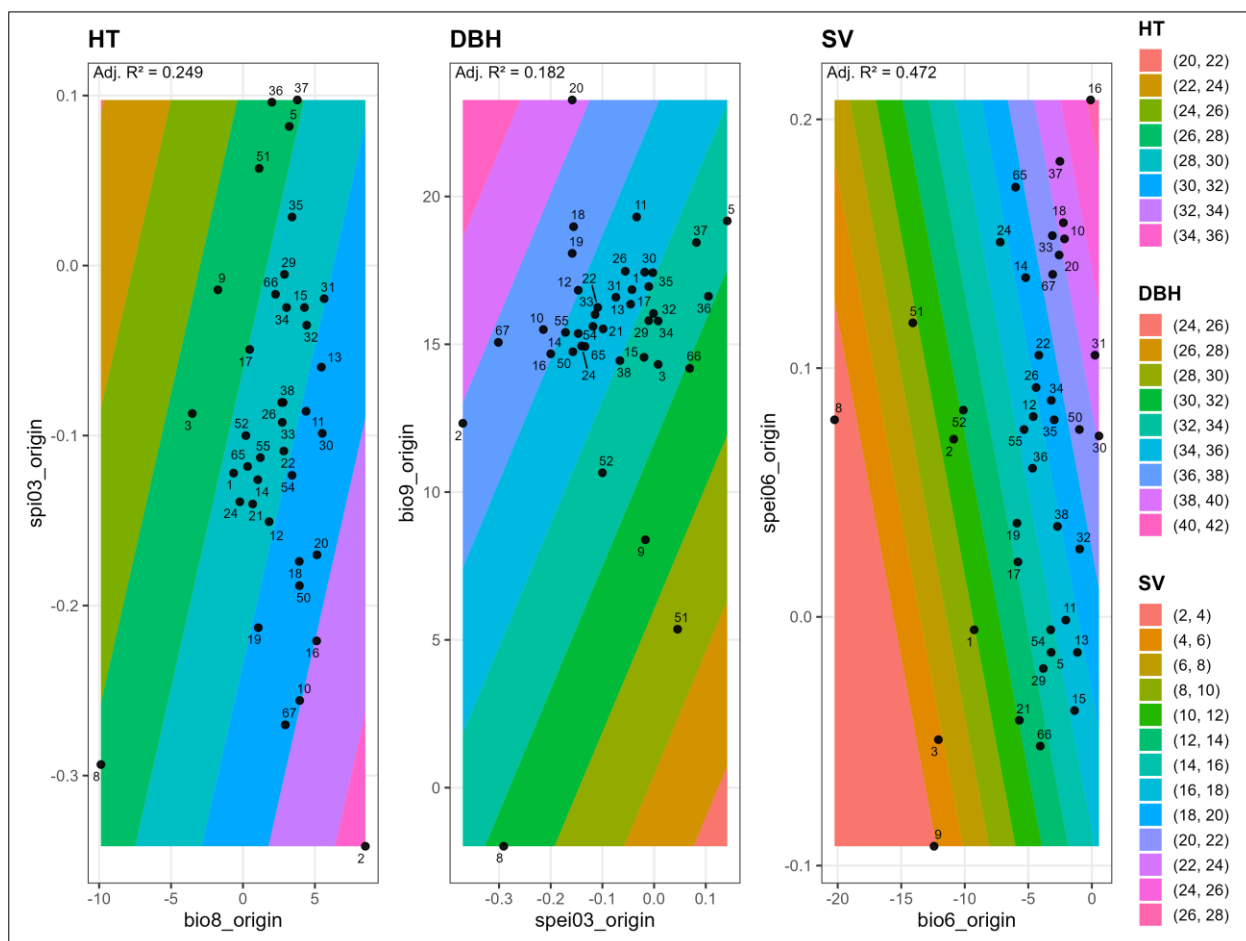


Fig. 27 Funcții de răspuns ale înălțimii totale (HT), diametrul la 1,30 m (DBH) și supraviețuirii (SV) în funcție de condițiile climatice ale locului de origine și Aleșd

Notă: Figura reprezintă funcțiile de răspuns pentru HT, DBH și SV pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Aleșd. În panoul din stânga, HT este modelată în funcție de bio8 și spi03 (Adj. $R^2 = 0,24$). În panoul din mijloc, DBH este modelat în funcție de spei03 și bio9 (Adj. $R^2 = 0,18$). În panoul din dreapta, SV este modelată în funcție de bio6 și spei06 (Adj. $R^2 = 0,47$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT, DBH și SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

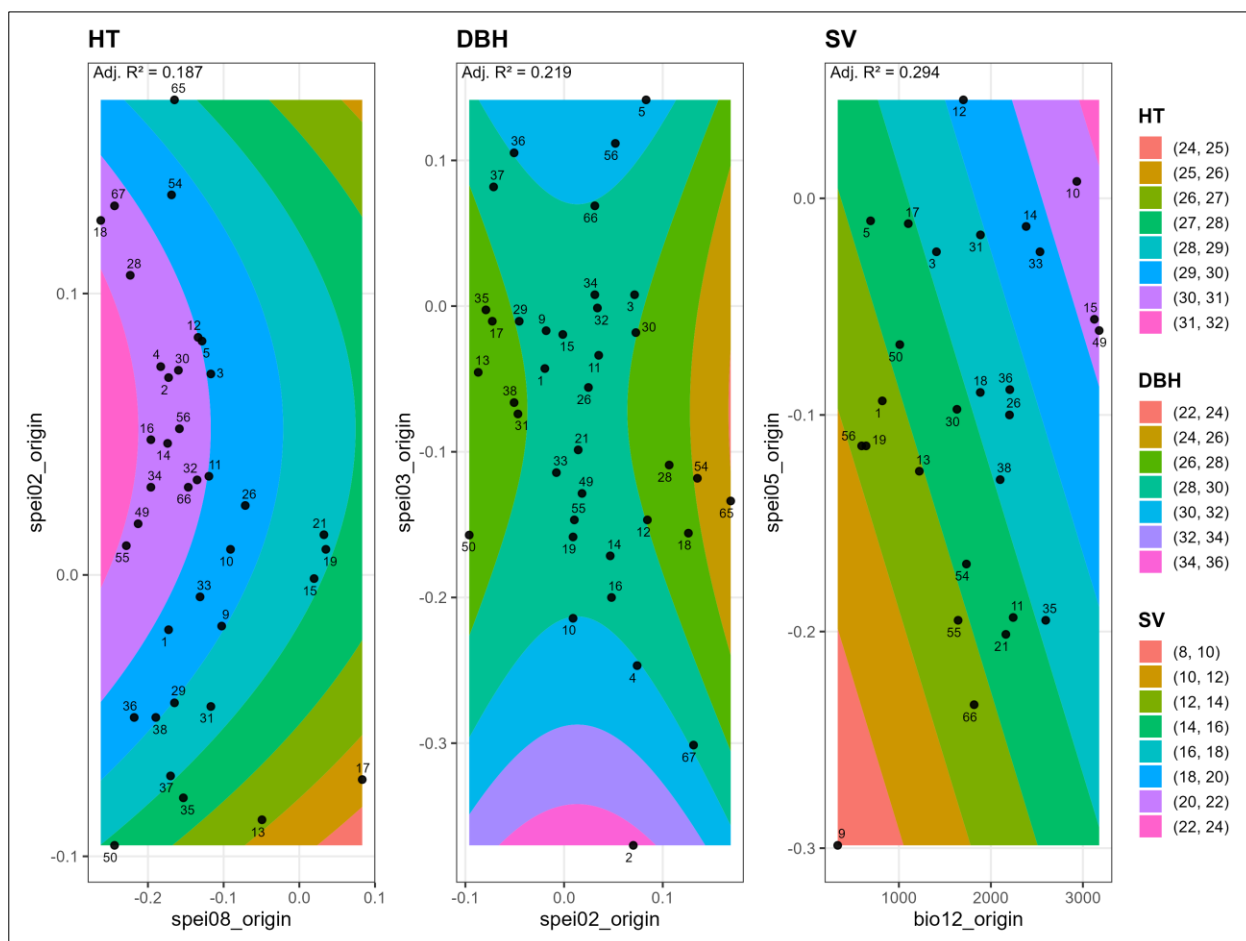


Fig. 28 Funcții de răspuns ale ale înălțimii totale (HT), diametrul la 1,30 m (DBH) și supraviețuirii (SV) în funcție de condițiile climatice ale locului de origine și Făget

Notă: Figura reprezintă funcțiile de răspuns pentru HT, DBH și SV pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Aleșd. În panoul din stânga, HT este modelată în funcție de $spei08$ și $spei02$ ($Adj. R^2 = 0,18$). În panoul din mijloc, DBH este modelat în funcție de $spei02$ și $spei03$ ($Adj. R^2 = 0,21$). În panoul din dreapta, SV este modelată în funcție de $bio12$ și $spei05$ ($Adj. R^2 = 0,29$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT, DBH și SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

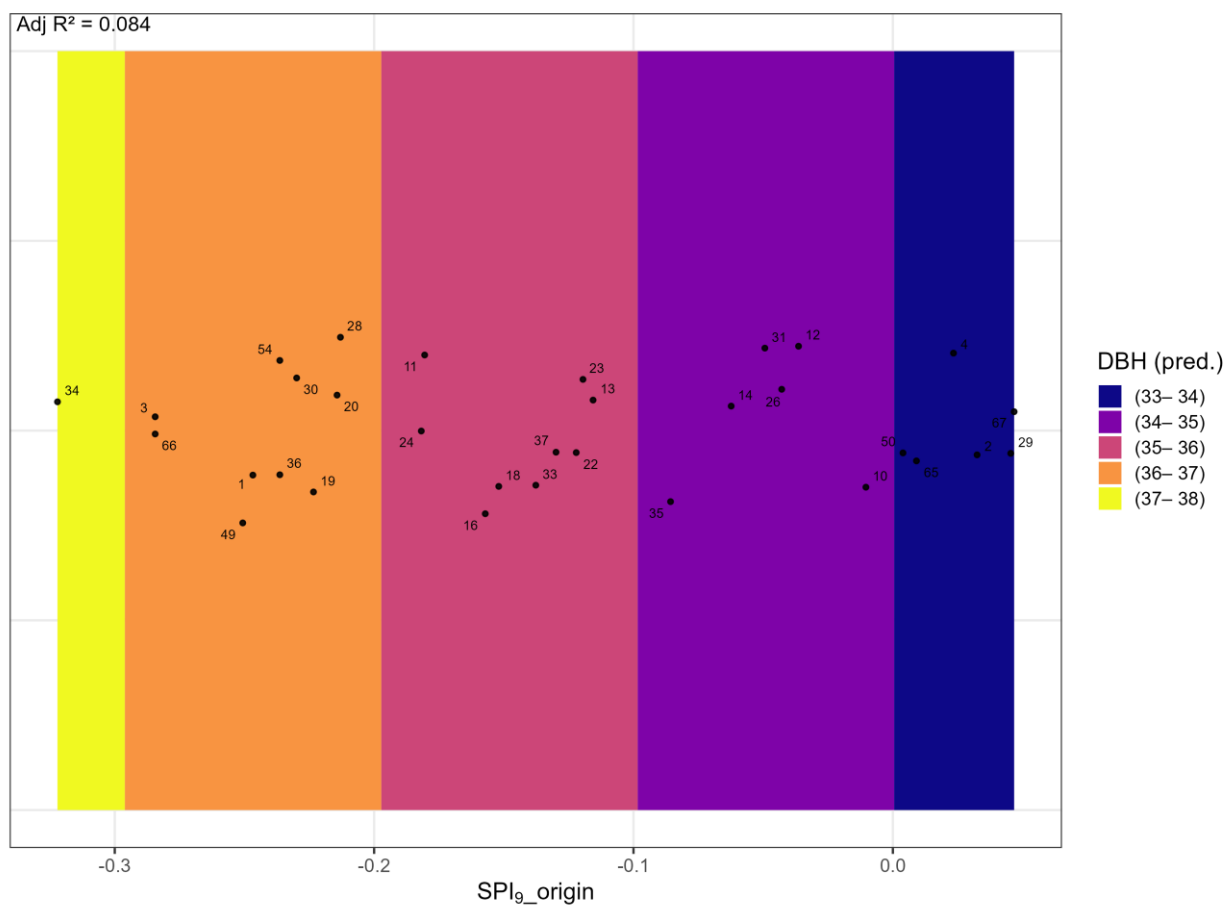


Fig. 29 Funcția de răspuns univariată a diametrului la 1,30 m (DBH) în funcție de condițiile climatice ale locului de origine și Padeș

Notă: Figura reprezintă funcția de răspuns univariată a DBH pentru proveniențele de duglas testate în cultura comparativă Padeș în raport cu SPI₀₃ (Adj. $R^2 = 0,08$). Benzile colorate indică valorile prezise ale DBH, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

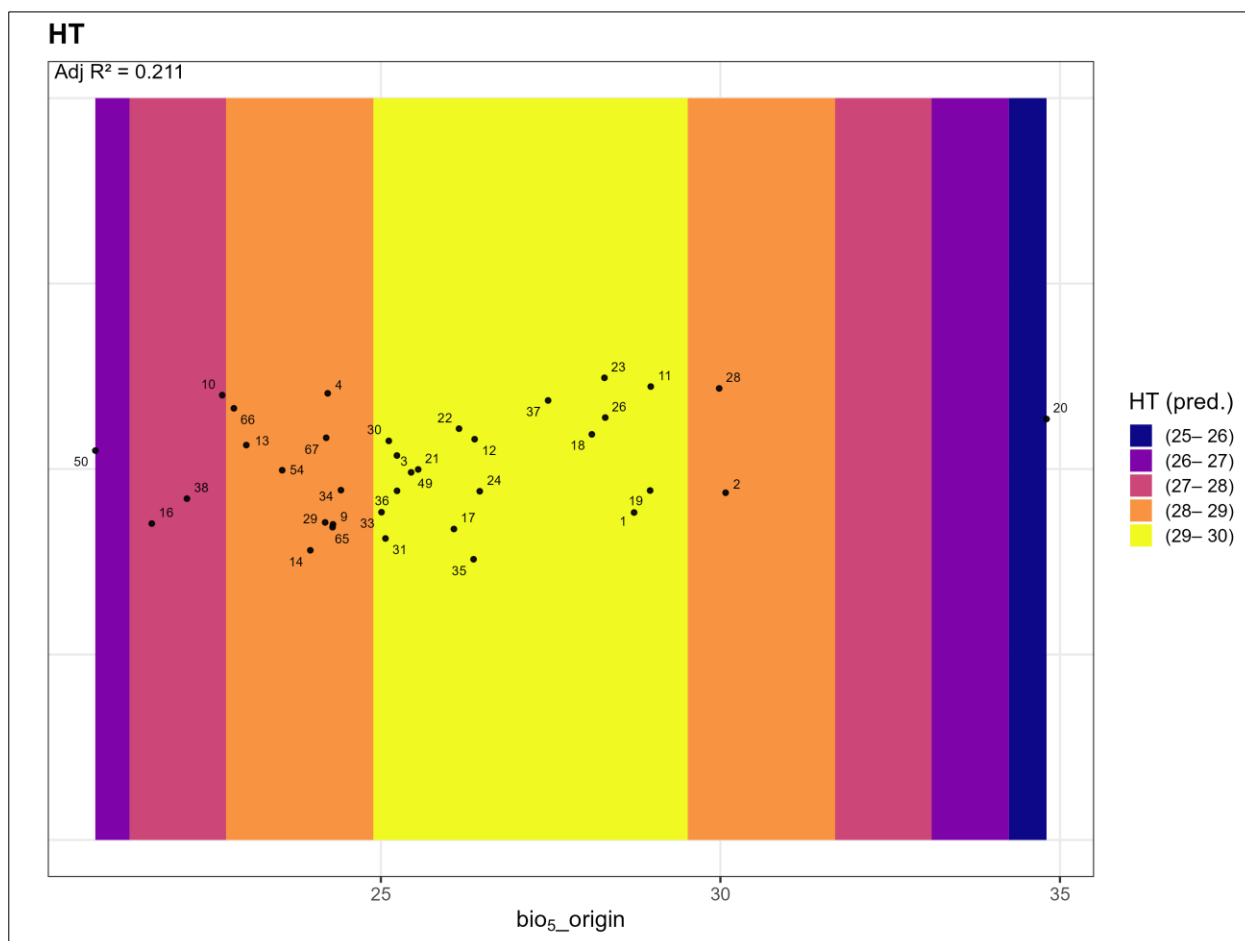


Fig. 30 Funcția de răspuns univariată a înălțimii totale (HT) în funcție de condițiile climatice ale locului de origine și Padeș

Notă: Figura reprezintă funcția de răspuns univariată a HT pentru proveniențele de *duglas* testate în cultura comparativă Padeș în raport cu *bio4* (Adj. $R^2 = 0,21$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

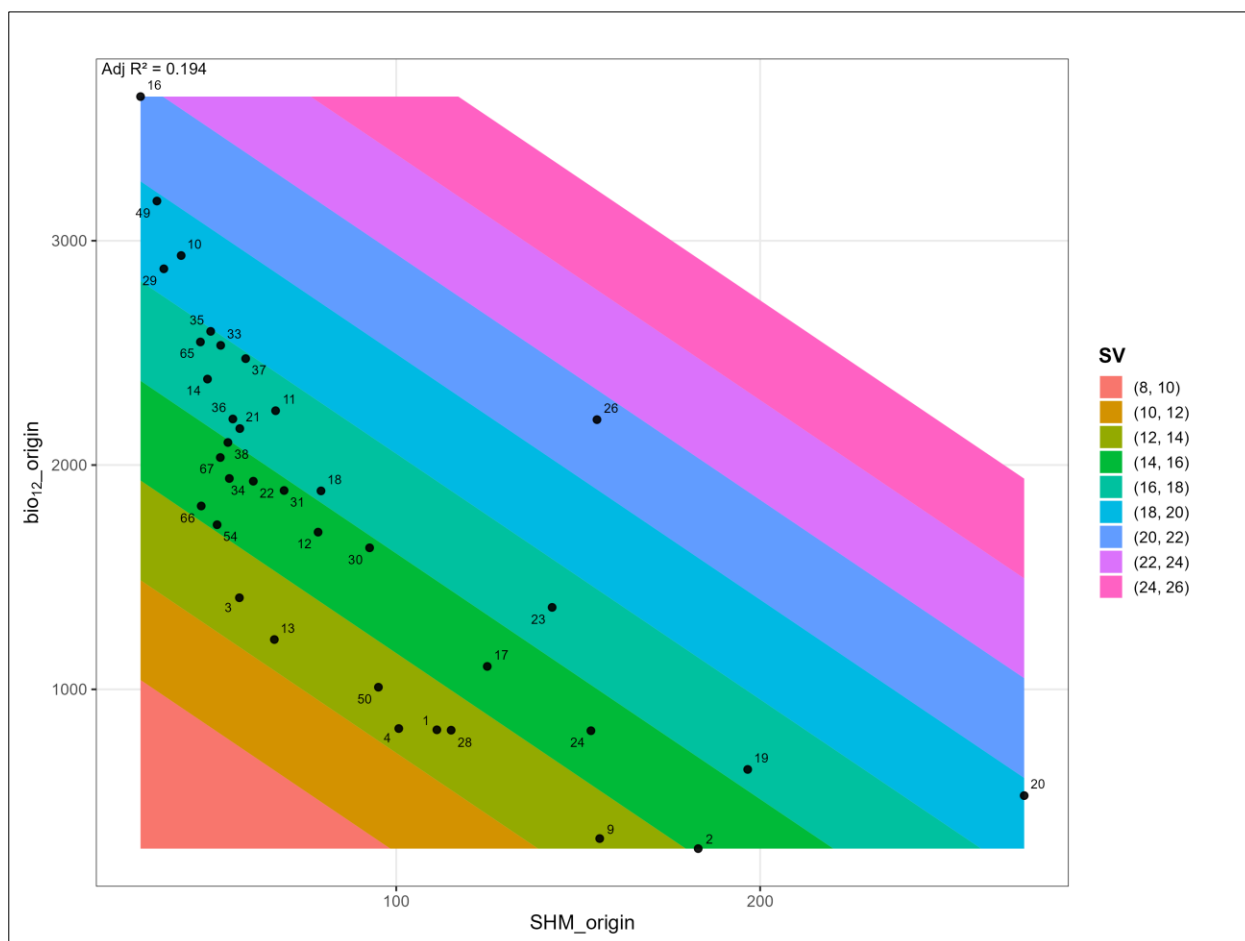


Fig. 11 Funcția de răspuns a supraviețuirii (SV) în funcție de condițiile climatice ale locului de origine și Padeș

Notă: Figura reprezintă funcțiile de răspuns ale SV pentru proveniențele de douglas testate în cultura comparativă Padeș modelată în funcție de SHM și bio12 ($Adj. R^2 = 0,19$). Benzile colorate indică valorile prezise ale HT, DBH și SV, iar punctele negre corespund valorilor proveniențelor.

4.9.1 Discuții asupra funcțiilor de transfer și răspuns

Duglasul prezintă o variabilitate genetică ridicată de-a lungul gradientilor climatici, iar proveniențele sunt adaptate la climatul de origine, ceea ce se reflectă în variația creșterii și a caracteristicilor adaptative (Leites et al. 2012; Neophytou et al. 2016; St. Clair et al. 2005; St. Clair et al. 2007; St. Clair et al. 2020).

În Europa, performanța duglasului depinde de potrivirea climatică proveniență–loc de testare, specia fiind considerată promițătoare în contextul schimbărilor climatice, dar sensibilă la secetă și temperaturi extreme (Bansal et al. 2015; Niemczyk et al. 2021; Dyderski et al. 2018). Proveniențele de coastă au prezentat, în general, performanțe superioare în condiții similare climatului maritim, iar diferențele fiziologice și genetice reflectă mecanisme de adaptare și plasticitate fenotipică (Espinoza et al. 2023; Hess et al. 2016; Riedel et al. 2025).

Modelele funcțiilor de transfer indică o influență moderată a climatului asupra diametrului la 1,30 m și a înălțimii totale și una mai ridicată asupra supraviețuirii, aceasta fiind strâns legată de variabilele termice, în special BIO6 (Leites et al. 2012). La Aleșd, temperatura (BIO8) limitează creșterea, iar disponibilitatea apei (SPI03) o susține, în timp ce supraviețuirea este determinată de temperaturile minime de iarnă. La Făget, creșterea este influențată de ariditate și de regimul hidric (AHM, SPI, SPEI), iar supraviețuirea depinde de precipitații (BIO13). La Padeș, influența climatică este mai redusă, dar rămâne dependentă de disponibilitatea apei (SPI09), de temperatura (BIO3, BIO5) și de precipitații (BIO19).

Modelele funcțiilor de răspuns confirmă influența condițiilor climatice ale locului de testare asupra performanței proveniențelor. La Aleșd, temperaturile mai ridicate favorizează creșterea, dar deficitul de apă o limitează; la Făget, relațiile sunt neliniare, existând intervale optime de umiditate; la Padeș, creșterea este controlată de regimul hidric și de temperatură, cu existența unor valori optime pentru dezvoltare.

În ansamblu, supraviețuirea prezintă cele mai puternice relații cu variabilele climatice, urmate de înălțimea totală și diametrul la 1,30 m, iar răspunsul proveniențelor diferă în funcție de condițiile locale, evidențiind interacțiunea proveniență × mediu și importanța acestora în selecția și utilizarea proveniențelor în condiții climatice viitoare (Chakraborty et al. 2019; Wesselkamp et al. 2024).

5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE. DISEMINAREA REZULTATELOR. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

5.1. Concluzii

Variabilitatea genetică a caracteristicilor cantitative

- Analiza a evidențiat variabilitate genetică între proveniențe pentru caracteristicile cantitative analizate, însă intensitatea acesteia diferă între culturile comparative de douglas.
- În cultura comparativă Aleșd, efectul provenienței a fost foarte semnificativ pentru toate caracteristicile analizate, indicând diferențe genetice clare între proveniențe.
- În cultura comparativă Făget, variabilitatea genetică a fost semnificativă pentru toate caracteristicile biometrice (DBH, HT, VOL, SB), însă ponderea variației genetice a fost redusă.
- În cultura comparativă Padeș, variabilitatea genetică a fost limitată, fiind semnificativă doar pentru înălțimea totală (HT) și volumul mediu/arbore (VOL), în timp ce diametrul la 1,30 m (DBH) și suprafața de bază (SB) nu au prezentat diferențe semnificative între proveniențe.
- Pentru toate culturile comparative, varianța reziduală a avut pondere dominantă, indicând un rol major al factorilor de mediu în expresia fenotipică a caracteristicilor studiate.
- Dintre caracteristicile cantitative analizate, înălțimea totală (HT) și diametrul la 1,30 m (DBH) au prezentat cea mai mare variabilitate genetică între proveniențe, sugerând un potențial superior pentru selecție.
- Proveniențele cu cele mai bune performanțe de creștere provin din vestul Americii de Nord (Washington, Oregon, sudul Columbiei Britanice), precum și din Europa (Germania și Franța), inclusiv din România (Nădrăgel, Toplița, Vârful Dăii și Anina-Buhui).
- Interacțiunea dintre genotip $\times$ mediu este foarte semnificativă pentru toate caracteristicile cantitative analizate, indicând faptul că performanța proveniențelor diferă în funcție de locul de testare.
- Localitatea a avut cel mai mare efect pentru toate caracteristicile, subliniind influența majoră a condițiilor de mediu asupra performanțelor de creștere.
- Efectul provenienței a fost semnificativ pentru toate caracteristicile, confirmând existența unei diferențieri genetice între proveniențe, însă aceasta este puternic influențată de mediu.

Variabilitatea genetică a principalelor caracteristici de calitate a lemnului și adaptative

- Variabilitatea genetică pentru caracteristicile de calitate a lemnului și adaptative a fost, în general, redusă, iar influența mediului a fost semnificativă în toate culturile comparative.

- Dintre caracteristicile de calitate a lemnului analizate, înălțimea elagată (PH) și unghiul de inserție al ramurilor (BA) au prezentat cea mai constantă diferențiere genetică între proveniențe, indiferent de cultura comparativă.
- Forma trunchiului (SF) și înfurcirea (FI) nu au evidențiat diferențe semnificative între proveniențe, indicând o stabilitate ridicată a acestor caracteristici.
- Numărul de ramuri (NB) și grosimea ramurilor (DB) au prezentat diferențe semnificative doar la Aleșd și Făget, sugerând o sensibilitate moderată la condițiile de mediu.
- Indicele de zveltețe (SI) a evidențiat diferențe între proveniențe în culturile Aleșd și Făget, însă nu și în Padeș, ceea ce indică un răspuns dependent de condițiile locului de testare.
- Supraviețuirea (SV) a fost influențată semnificativ de proveniență doar în cultura Aleșd, unde diferențierea genetică a fost mai semnificativă, în timp ce în celelalte culturi comparative influența mediului a fost predominantă.
- Cele mai ridicate valori ale supraviețuirii au fost înregistrate atât pentru proveniențe din SUA (Washington și Oregon), Canada (Columbia Britanică), cât și pentru proveniențe din Europa (Franța și Germania), dar și pentru proveniențe din România (Pădurea Neagră, Piatra Albă, Toplița, Vârful Dăii, Nădrăgel și Anina-Buhui).
- Influența locului de testare a fost, în general, mai pronunțată decât cea a provenienței, subliniind rolul determinant al condițiilor staționale.
- Interacțiunea genotip × mediu a fost limitată, având un efect semnificativ doar pentru grosimea ramurilor (DB) și indicele de zveltețe (SI), ceea ce indică o stabilitate relativă a performanței proveniențelor majorității caracteristicilor analizate.
- În ansamblu, doar anumite caracteristici – înălțimea elagată (PH), unghiul de inserție al ramurilor (BA) și supraviețuirea (SV) în cultura comparativă Aleșd prezintă un potențial pentru selecție, acesta fiind însă puternic condiționat de locul de testare.

Selecția celor mai bune proveniențe cu ajutorul indicilor de selecție MGIDI și MTSI

- Folosirea indicilor multivariați MGDI și MTSI a permis identificarea proveniențelor de douglas cu performanțe superioare, demonstrând utilitatea acestora în procesul de selecție.
- În toate culturile comparative, proveniențele selectate prin MGIDI au înregistrat valori medii superioare mediilor culturilor comparative.
- Cele mai mari câștiguri obținute prin selecția MGIDI au fost observate pentru supraviețuire (SV), cu diferențe de până la 28,1% la Aleșd, 15,1% la Făget și 9,6% la Padeș, indicând un potențial ridicat de îmbunătățire a adaptabilității.

- Creșterile pentru diametrul la 1,30 m (DBH) au fost consistente, cu diferențe maxime de 11,1% la Aleșd, 8,3% la Făget și 2% la Padeș.
- Pentru înălțimea totală (HT), diferențele obținute prin MGIDI au variat între 0 și 7,4%.
- Proveniențele selectate prin MGIDI își au originea în zone geografice diverse, incluzând America de Nord (SUA, Canada) și Europa (Germania, Franța, România).
- Selecția realizată cu ajutorul indicelui MTSI a condus la selectarea unui grup de opt proveniențe considerate optime în toate locurile de testare, provenind din America de Nord (SUA, Canada) și Europa (Franța, Germania și România).
- Comparativ cu MGIDI, diferențele procentuale pentru diametrul la 1,30 m (DBH) și înălțimea totală (HT) ale indicelui MTSI sunt mai moderate, dar câștiguri foarte ridicate pentru supraviețuire (SV), de până la 35% la Aleșd, 22,3% la Făget și 20,2% la Padeș.
- Proveniența 58 – Piatra Albă (OS Aleșd) a fost selectată cu ajutorul indicelui MTSI ca fiind cea mai performantă și stabilă în toate cele trei culturi comparative de duglas.
- În ansamblu, rezultatele evidențiază că selecția multivariată permite identificarea unor proveniențe performante și stabile pentru utilizarea în programe de ameliorare și împădurire.

Corelațiile fenotipice între caracteristicile analizate

- În toate culturile comparative, s-au evidențiat corelații pozitive puternice între diametrul la 1,30 m (DBH) și înălțimea totală (HT).
- Diametrul la 1,30 m (DBH) și înălțimea totală (HT) au prezentat, de asemenea, corelații pozitive moderate cu grosimea ramurilor (DB) și înălțimea elagată (PH), sugerând că arborii cu dimensiuni mai mari tind să dezvolte ramuri mai groase și o înălțime elagată mai mare.
- Corelațiile pozitive între înălțimea totală (HT) și înălțimea elagată (PH) au fost semnificative în toate culturile, indicând că arborii cu o creștere mai viguroasă prezintă o înălțime elagată mai mare.
- Supraviețuirea (SV) este corelată pozitiv cu înălțimea totală (HT) și înălțimea elagată (PH) în cultura comparativă Aleșd și cu forma trunchiului (SF) în cultura Făget, sugerând că proveniențele cu înălțimea totală mai mare sau cu o formă mai bună a trunchiului pot avea o capacitate mai mare de adaptare, în anumite condiții de mediu.
- În cultura Padeș, corelația negativă dintre diametrul la 1,30 m (DBH) și supraviețuirea (SV) indică un posibil compromis între creștere și supraviețuire în condiții mai limitative de mediu.
- Forma trunchiului (SF) și înfurcirea (FI) au prezentat corelații negative constante în toate culturile comparative, indicând că proveniențele cu trunchiuri înfurcate prezintă și defecte de formă.

- Unghiul de inserție al ramurilor (BA) a fost negativ corelat cu supraviețuirea (SV) la Aleșd, sugerând că anumite caracteristici de calitate a lemnului pot influența adaptabilitatea.
- În ansamblu, corelațiile fenotipice indică că selecția pentru creștere poate influența indirect anumite caracteristici de calitate a lemnului, însă direcția și intensitatea acestor relații sunt dependente de locul de testare.

Corelațiile dintre caracterele analizate și gradientii geografici de origine

- Relațiile dintre caracteristicile analizate și gradientii geografici de origine (latitudine, longitudine și altitudine) au variat între culturile comparative, indicând un răspuns dependent de condițiile locale de mediu.
- Cultura comparativă Aleșd a prezentat cele mai semnificative corelații cu gradientii geografici, indicând o influență mai accentuată a originii geografice asupra caracteristicilor analizate.
- Longitudinea de origine a fost gradientul cel mai frecvent corelat cu caracteristicile de creștere și adaptabilitate, în special în culturile Aleșd și Făget, indicând influența diferențelor climatice dintre zonele estice și vestice de origine ale proveniențelor.
- Altitudinea de origine a fost corelată semnificativ cu scăderi ale valorilor pentru caracteristicile de creștere și supraviețuire, în special în culturile Aleșd și Padeș, evidențiind un efect limitativ al condițiilor altitudinale.
- Latitudinea de origine a avut, în general, o influență mai redusă și mai puțin constantă asupra caracteristicilor analizate, comparativ cu longitudinea și altitudinea.
- În cultura comparativă Padeș, corelațiile cu gradientii geografici au fost, în general, slabe, indicând o influență limitată a originii geografice asupra expresiei fenotipice a caracteristicilor analizate.
- În ansamblu, rezultatele sugerează că longitudinea și altitudinea sunt gradientii geografici cu cea mai mare relevanță ecologică, însă efectele acestora sunt dependente de locul de testare și de caracteristica analizată.

Funcțiile de transfer la condițiile climatice ale locului de testare

- Funcțiile de transfer evidențiază faptul că performanța proveniențelor este influențată semnificativ de diferențele climatice dintre locul de origine și locul de testare.
- Modelele de transfer pentru diametrul la 1,30 m (DBH) au fost semnificative în toate cele trei culturi și au explicat o proporție de 12-19% din variație.
- La Aleșd, diametrul la 1,30 m (DBH) este influențat negativ de temperatura medie a celui mai umed trimestru (BIO8) și pozitiv de indicele standardizat al precipitațiilor calculat pe 3 luni (SPI03), sugerând că temperaturile mai ridicate din trimestrul umed pot reduce creșterea în

diametru, în timp ce un regim pluviometric favorabil la începutul sezonului de vegetație contribuie la creșterea în diametru.

- La Făget, ambii predictorii, indicele anual de căldură-umiditate (AHM) și indicele standardizat de precipitații calculat pe 1 lună (SPI01), au un efect negativ, indicând faptul că un regim mai cald și mai arid, precum și variațiile precipitațiilor pe termen scurt pot reduce creșterea în diametru.
- La Padeș, indicele standardizat al precipitațiilor calculat pe 9 luni (SPI09) are un efect pozitiv, iar indicele de izotermalitate (BIO3) are un efect negativ, sugerând că disponibilitatea apei pe termen mai lung favorizează creșterea în diametru, în timp ce stabilitatea termică redusă (izotermalitate mai mare) poate limita creșterea.
- Modelele pentru înălțimea totală (HT) au fost semnificative în toate culturile, explicând între 10% și 23% din variație.
- La Aleșd, atât temperatura medie a celui mai umed trimestru (BIO8), cât și indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 6 luni (SPEI06) au efect negativ, arătând că înălțimea este influențată de temperatură și de disponibilitatea apei.
- La Făget, indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 8 luni (SPEI08) are un efect pozitiv, iar perioada fără îngheț (BFFP) are un efect negativ asupra înălțimii, indicând că un bilanț hidric favorabil pe o perioadă mai lungă din sezonul de vegetație favorizează creșterea în înălțime, în timp ce diferențele mari în perioada fără îngheț pot limita creșterea în înălțime.
- La Padeș, indicele anual de căldură-umiditate (AHM) influențează pozitiv înălțimea totală (HT), iar indicele de izotermalitate (BIO3) influențează negativ, ceea ce evidențiază importanța raportului dintre căldură și umiditate.
- Modele de transfer pentru supraviețuire (SV) au fost semnificative în toate culturile, iar la Aleșd au avut cea mai mare putere explicativă.
- Modelele funcțiilor de transfer pentru supraviețuire (SV) sunt modele univariate, fiecare incluzând un singur predictor climatic semnificativ.
- La Aleșd, temperatura minimă a celei mai reci luni (BIO6) are un efect negativ puternic, indicând sensibilitatea la condițiile de iarnă.
- La Făget, precipitațiile din cea mai umedă lună (BIO13) influențează negativ supraviețuirea.
- La Padeș, precipitațiile din cel mai rece trimestru (BIO19) au un efect negativ, sugerând influența condițiilor hidrice din sezonul rece.
- Comparativ cu diametrul la 1,30 m (DBH) și înălțimea totală (HT), supraviețuirea (SV) prezintă o relație mai clară și mai semnificativă cu variabilele climatice.

- În toate cele trei culturi comparative, proveniențele din vestul Americii de Nord, în special din statul Washington, dar și din Oregon, Idaho și sudul Columbiei Britanice, sunt asociate cu diferențe climatice favorabile, ceea ce explică parțial performanțele superioare ale diametrului la 1,30 m (DBH) și ale înălțimii totale (HT), ale supraviețuirii (SV) și evidențiază o bună potrivire climatică.

Funcțiile de răspuns la condițiile climatice ale locului de testare

- Funcțiile de răspuns indică faptul că performanța proveniențelor este influențată semnificativ de condițiile climatice specifice locului de testare.
- Modele pentru diametrul la 1,30 m (DBH) au fost semnificative în toate cele trei culturi comparative și au explicat o proporție de 9-12% din variație.
- La Aleșd, diametrul la 1,30 m (DBH) este influențat pozitiv de temperatura medie a trimestrului celui mai secetos (BIO9) și negativ de indicele standardizat de precipitații calculat pe 3 luni (SPEI03), ceea ce arată că diametrul la 1,30 m (DBH) este influențat pozitiv de temperaturile din vară, în timp ce cantitățile de apă de la începutul sezonului de vegetație pot limita creșterea diametrului.
- La Făget, diametrul la 1,30 m (DBH) este influențat de indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 2 luni (SPEI02) și 3 luni (SPEI03), relația fiind neliniară, indicând că diametrul la 1,30 m (DBH) crește cel mai bine la un nivel optim de umiditate.
- La Padeș, indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 9 luni (SPEI09) are un efect negativ asupra diametrului la 1,30 m (DBH), iar modelul explică o proporție redusă din variație, sugerând o influență climatică mai slabă comparativ cu Aleșd și Făget.
- Modelele pentru înălțimea totală (HT) au fost semnificative în toate culturile comparative, explicând între 19-25% din variație.
- La Aleșd, înălțimea totală (HT) este influențată pozitiv de temperatura medie a celui mai umed trimestru (BIO8) și negativ de indicele standardizat de precipitații calculat pe 3 luni (SPEI03), indicând importanța regimului termic și a condițiilor hidrice de la începutul sezonului de vegetație.
- La Făget, înălțimea totală (HT) este influențată de indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 2 luni (SPEI02) și 8 luni (SPEI08), cu relații neliniare, sugerând că înălțimea totală atinge valori mai mari în condiții climatice moderate, fără excese termice și hidrice.
- La Padeș, înălțimea totală (HT) este influențată de temperatura minimă a celei mai calde luni (BIO5), sugerând că există un optim termic peste care temperaturile prea ridicate reduc creșterea.

- Modelele funcțiilor de răspuns pentru supraviețuire (SV) sunt multivariate la Aleșd și Făget și univariat la Padeș, incluzând predictorii semnificativi.
- La Aleșd, temperatura minimă a celei mai reci luni (BIO6) și indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 6 luni (SPEI06) au un efect pozitiv, indicând că iernile mai blânde și suficientă apă contribuie la o supraviețuire cât mai ridicată.
- La Făget, precipitațiile medii anuale (BIO12) și indicele standardizat de precipitații și evapotranspirație calculat pe 5 luni (SPEI05) influențează pozitiv supraviețuirea, subliniind rolul disponibilității apei în menținerea unui procent de supraviețuire cât mai ridicat.
- La Padeș, indicele estival de căldură-umiditate (SHM) și precipitațiile medii anuale (BIO12) influențează pozitiv supraviețuirea, evidențiind importanța echilibrului termic și hidric.
- Comparativ cu diametrul la 1,30 m (DBH) și înălțimea totală (HT), supraviețuirea (SV) prezintă cea mai puternică relație cu variabilele climatice, în special în cultura comparativă Aleșd.
- În toate cele trei locuri de testare (Aleșd, Făget și Padeș), funcțiile de răspuns arată că proveniențele din vestul Americii de Nord, în special din statul Washington, dar și din Oregon, Idaho și sudul Columbiei Britanice, prezintă performanțe ridicate, ceea ce sugerează că climatul de origine este favorabil exprimării potențialului de creștere.

5.2. Contribuții personale

- Au fost dezvoltate și aplicate funcții de transfer și de răspuns climatic pentru fiecare loc de testare, care au evidențiat sensibilități diferite ale diametrului la 1,30 m, înălțimii totale și supraviețuirii la variabilele climatice de origine și caracterul complex al relației climă-creștere.
- A fost aplicată selecția multivariată a proveniențelor de duglas utilizând indicii MGIDI și MTSI, demonstrând eficiența acestora în identificarea proveniențelor performante și stabile.
- Rezultatele oferă o bază științifică pentru înființarea unor plantaje ca surse de semințe din categoria „*testat*”.
- Au fost identificate proveniențe de duglas cu performanțe superioare, care pot constitui material de bază pentru relansarea programelor de ameliorare și pentru producerea materialului forestier de reproducere în România.
- Rezultatele contribuie la fundamentarea deciziilor privind utilizarea duglasului în condiții ecologice similare celor analizate în vestul și sud-vestul României.

5.3. Diseminarea rezultatelor

A. Lucrări științifice publicate în reviste indexate în Web of Science (ISI)

În calitate de prim autor:

Stoica, E.; Alexandru, A.M.; Mihai, G.; Scarlatescu, V.; Curtu, A.L. Evaluating Douglas Fir's Provenances in Romania Through Multi-Trait Selection. *Plants* 2025, 14, 1347. <https://doi.org/10.3390/plants14091347>

Stoica, E.; Alexandru, A. M.; Mihai, G.; Curtu, A. L. Variation in Survival and Stem Quality of Douglas-Fir Provenances: Insights from 47-Year-Old Common Garden Experiments in Romania. *Not Bot Horti Agrobo* 2025, 53, 14695. <https://doi.org/10.15835/nbha53314695>

În calitate de coautor:

Alexandru, A.-M.; Mihai, G.; **Stoica, E.**; Curtu, A.L. Multi-Trait Selection and Stability in Norway Spruce (*Picea abies*) Provenance Trials in Romania. *Forests* 2023, 14, 456. <https://doi.org/10.3390/f14030456>

Mihai, G.; Alexandru, A.M.; **Stoica, E.**; Birsan, M.V. Intraspecific Growth Response to Drought of *Abies alba* in the Southeastern Carpathians. *Forests* 2021, 12, 387. <https://doi.org/10.3390/f12040387>

B. Lucrări științifice publicate în reviste indexate în baze de date internaționale (BDI)

În calitate de autor principal:

Stoica E., Alexandru A.M., Mihai G., Curtu A.L., Douglas Fir Performance in Romania: Growth Insights from Common Garden Experiments, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov*. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, Vol. 18(67) No. 2 – 2025. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.2>

C. Lucrări prezentate la simpozioane și conferințe naționale sau internaționale

Stoica, E.; Alexandru, A.M.; Mihai, G.; Scarlatescu, V.; Curtu, A.L. Analysis of Wind breakage of Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) Provenance Trials Established in Romania. 9th International Symposium Forest and Sustainable Development, 17-18 octombrie 2024, Brașov, România. Poster.

Stoica, E., Alexandru, A.M., Mihai, G., Assessment of genetic variability in Scot spine (*Pinus sylvestris* L.) provenance trials in Romania. 10th International Symposium Forest and Sustainable Development, 14-15 octombrie 2022, Brașov, România. Poster.

5.4. Direcții viitoare de cercetare

- Integrarea unor variabile suplimentare (caracteristici ale solului) pentru îmbunătățirea capacității explicative a modelelor climat-performanță.
- Analizarea detaliată a impactului evenimentelor climatice extreme (secete severe, înghețuri târzii sau timpurii, valuri de căldură) asupra caracteristicilor de creștere, de calitate a lemnului și adaptative ale proveniențelor pe baza analizelor dendrocronologice.
- Extinderea funcțiilor de transfer și de răspuns prin includerea scenariilor climatice viitoare pentru evaluarea riscurilor asociate schimbărilor climatice.
- Testarea aplicabilității indicilor MGIDI și MTSI în alte experimente și pentru alte specii de arbori, în vederea selecției multivariate pentru programele de ameliorare.
- Elaborarea de recomandări privind utilizarea duglasului în vestul și sud-vestul României.
- Analizarea corelațiilor *age to age* pentru evaluarea potențialului de selecție timpurie.

Bibliografie

1. Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723.
2. Alberto, F. J., Aitken, S. N., Alía, R., González-Martínez, S. C., Hänninen, H., Kremer, A., Lefèvre, F., 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>
3. Alexandru, A.-M., Mihai, G., Stoica, E., & Curtu, A. L. (2023). Multi-trait selection and stability in Norway spruce (*Picea abies*) provenance trials in Romania. *Forests*, 14(3), 456. <https://doi.org/10.3390/f14030456>
4. Alfaro, R. I., Fady, B., Vendramin, G. G., Dawson, I. K., Fleming, R. A., Sáenz-Romero, C., Lindig-Cisneros, R. A., 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>
5. Alizoti, P., Bastien, J.-C., Chakraborty, D., Klisz, M. M., Kroon, J., Neophytou, C., Schueler, S., et al. (2022). Non-native forest tree species in Europe: The question of seed origin in afforestation. *Forests*, 13(2), 273. <https://doi.org/10.3390/f13020273>
6. Avram, C. (1960). Consfătuirea C.A.E.R. de la Budapesta în problema speciilor forestiere repede crescătoare. *Revista Pădurilor*, (11), 692–696.
7. Bailey, T. G., Harrison, P. A., Davidson, N. J., Weller-Wong, A., Tilyard, P., Steane, D. A., Vaillancourt, R. E., & Potts, B. M. (2021). Embedding genetics experiments in restoration to guide plant choice for a degraded landscape with a changing climate. *Ecological Management & Restoration*, 22(S2), 92–105. <https://doi.org/10.1111/emr.12474>
8. Bansal, S., Harrington, C. A., Gould, P. J., & St. Clair, J. B. (2015). Climate-related genetic variation in drought-resistance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Global Change Biology*, 21(2), 947–958. <https://doi.org/10.1111/gcb.12719>
9. Bastien, J.-C., Sanchez, L., & Michaud, D. (2013). Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*(Mirb.) Franco). În L. E. Pâques (Ed.), *Forest tree breeding in Europe: Current state-of-the-art and perspectives*.
10. Bauhus, J., Puettmann, K., & Kühne, C. (2013). Close-to-nature forest management in Europe: Does it support complexity and adaptability of forest ecosystems? În *Managing forests as complex adaptive systems: Building resilience to the challenge of global change* (pp. 187–213). <https://doi.org/10.4324/9780203122808>
11. Benito Garzón, M., Robson, T. M., & Hampe, A. (2019). Δtrait 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>

12. Beugnon, R., Albert, G., Hähn, G., Yu, W., Haider, S., Hättenschwiler, S., Davrinche, A., et al. (2025). Improving forest ecosystem functions by optimizing tree species spatial arrangement. *Nature Communications*, 16(1), 6286. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61389-7>
13. Bindewald, A. (2021). *Assessment of the invasiveness of non-native tree species in European forests* (Teză de doctorat, în engleză).
14. Bonamour, S., Chevin, L.-M., Charmantier, A., & Teplitsky, C. (2019). Phenotypic plasticity in response to climate change: The importance of cue variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 374(1768), 20180178. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0178>
15. Breed, M. F., Harrison, P. A., Bischoff, A., Durruty, P., Gellie, N. J. C., Gonzales, E. K., Havens, K., et al. (2018). Priority actions to improve provenance decision-making. *BioScience*, 68(7), 510–516. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy050>
16. Briggs, D. G., Ingaramo, L., & Turnblom, E. C. (2007). Number and diameter of breast-height region branches in a Douglas-fir spacing trial and linkage to log quality. *Forest Products Journal*, 57, 28–34.
17. Brus, R., Pötzelsberger, E., Lapin, K., Brundu, G., Orazio, C., Straigyte, L., & Hasenauer, H. (2019). Extent, distribution and origin of non-native forest tree species in Europe. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34(7), 533–544. <https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1676464>
18. Camenen, E., Porté, A. J., & Benito Garzón, M. (2016). American trees shift their niches when invading Western Europe: Evaluating invasion risks in a changing climate. *Ecology and Evolution*, 6, 7263–7275. <https://doi.org/10.1002/ece3.2419>
19. Campbell, R. K. (1992). Genotype × environment interaction: A case study for Douglas-fir in western Oregon. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station*.
20. Cappa, E. P., Muñoz, F., & Sanchez, L. (2019). Performance of alternative spatial models in empirical Douglas-fir and simulated datasets. *Annals of Forest Science*, 76(2), 53. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0836-9>
21. Carr, A., Apoznański, G., Dobrowolska, D., & Rachwald, A. (2025). Outbreaks of European spruce bark beetle dramatically altered Norway spruce-dominated stands with implications for volant wildlife in the Białowieża Forest, Poland. *Annals of Forest Science*, 82(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s13595-025-01301-x>
22. Castaldi, C., Marchi, M., Vacchiano, G., & Corona, P. (2020). Douglas-fir climate sensitivity at two contrasting sites along the southern limit of the European planting range. *Journal of Forestry Research*, 31(6), 2193–2204. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01041-5>
23. Čater, M. (2021). Microsites influence the light response of young Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Forests*, 12(6), 687. <https://doi.org/10.3390/f12060687>

24. Chakraborty, D., Ciceu, A., Ballian, D., Benito Garzón, M., Bolte, A., Bozic, G., Buchacher, R., 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>
25. Chakraborty, D., Matulla, C., Andre, K., Weissenbacher, L., & Schueler, S. (2019). Survival of Douglas-fir provenances in Austria: Site-specific late and early frost events are more important than provenance origin. *Annals of Forest Science*, 76(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0883-2>
26. Charlet de Sauvage, J., Bugmann, H., Bigler, C., & Lévesque, M. (2023). Species diversity and competition have minor effects on the growth response of silver fir, European larch and Douglas fir to drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 341, 109664. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109664>
27. Chauvin, T., Cochard, H., Segura, V., & Rozenberg, P. (2019). Native-source climate determines the Douglas-fir potential of adaptation to drought. *Forest Ecology and Management*, 444, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.054>
28. Chen, P.-Y., Welsh, C., & Hamann, A. (2010). Geographic variation in growth response of Douglas-fir to interannual climate variability and projected climate change. *Global Change Biology*, 16, e02166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02166.x>
29. Cheval, S., Dumitrescu, A., & Bîrsan, M.-V. (2017). Variability of the aridity in south-eastern Europe over 1961–2050. *CATENA*, 151, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.029>
30. Ching, K. K. (1965). Early growth of Douglas-fir in a reciprocal planting. *Oregon Forest Research Center*.
31. Climent, J., Alía, R., Kärkkäinen, K., Bastien, C., Benito-Garzón, M., Bouffier, L., De Dato, G., et al. (2024). Trade-offs and trait integration in tree phenotypes: Consequences for the sustainable use of genetic resources. *Current Forestry Reports*, 10(3), 196–222. <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00217-5>
32. Clinovschi, F. (2005). *Dendrologie*. Editura Universității Suceava, Suceava, România, p. 299.
33. Coopérative Forestière Bois Limousin. (2016). *Douglas-fir: A chance for France and for foresters*. CFBL Editions.
34. Čortan, D., Nonić, M., & Šijačić-Nikolić, M. (2019). Phenotypic plasticity of European beech from international provenance trial in Serbia. În M. Šijačić-Nikolić, J. Milovanović, & M. Nonić (Eds.), *Forests of Southeast Europe under a changing climate: Conservation of genetic resources* (pp. 333–351). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95267-3_29
35. Costello, A., Abbas, M., Allen, A., Ball, S., Bell, S., Bellamy, R., Friel, S., et al. (2009). Managing the health effects of climate change. *The Lancet*, 373(9676), 1693–1733. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)60935-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60935-1)
36. Craney, T. A., & Surles, J. G. (2002). Model-dependent variance inflation factor cutoff values. *Quality Engineering*, 14(3), 391–403.

37. Di Fabio, A., Buttò, V., Chakraborty, D., O'Neill, G. A., Schueler, S., & Kreyling, J. (2024). Climatic conditions at provenance origin influence growth stability to changes in climate in two major tree species. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1422165>
38. Dimitrova, A., Csilléry, K., Klisz, M., Lévesque, M., Heinrichs, S., Cailleret, M., Andivia, E., et al. (2022). Risks, benefits, and knowledge gaps of non-native tree species in Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.908464>
39. Drewett, T. A. (2015). *The growth and quality of UK-grown Douglas-fir* (Teză de doctorat). Edinburgh Napier University.
40. Ducci, F., De Cuyper, B., Pâques, L. E., Proietti, R., & Wolf, H. (Eds.). (2012). *Reference protocols for assessment of traits and reference genotypes to be used as standards in international research projects (TreeBreedex EU Project)*. CRA SEL.
41. Ducci, F., Heois, B., De Rogatis, A., & Proietti, R. (2003). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, 1969/1970 IUFRO field experiment results in Europe and Italy (în italiană). În *Atti del IV Congresso Nazionale SISEF "Meridiani Foreste"* (pp. 101–109). Rifreddo (PZ), Italia.
42. Dumitrescu, A., & Bîrsan, M.-V. (2015). ROCADA: A gridded daily climatic dataset over Romania (1961–2013) for nine meteorological variables. *Natural Hazards*, 78, 1045–1063. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1757-z>
43. Dungey, H. S., Low, C. B., Lee, J., Miller, M. A., Fleet, K., & Yanchuk, A. D. (2012). Developing breeding and deployment options for Douglas-fir in New Zealand: Breeding for future forest conditions. *Silvae Genetica*, 61(1–6), 104–115. <https://doi.org/10.1515/sg-2012-0013>
44. Dyderski, M. K., Paź, S., Frelich, L. E., & Jagodziński, A. M. (2018). How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global Change Biology*, 24(3), 1150–1163. <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>
45. Eckhart, T., Pötzelsberger, E., Koeck, R., Thom, D., Lair, G. J., van Loo, M., & Hasenauer, H. (2019). Forest stand productivity derived from site conditions: An assessment of old Douglas-fir stands (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) in Central Europe. *Annals of Forest Science*, 76(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0805-3>
46. Eilmann, B., & Rigling, A. (2012). Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiology*, 32(2), 178–187. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps004>
47. Eilmann, B., de Vries, S. M. G., den Ouden, J., Mohren, G. M. J., Sauren, P., & Sass-Klaassen, U. (2013). Origin matters! Differences in drought tolerance and productivity of coastal Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) provenances. *Forest Ecology and Management*, 302, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.031>

48. El-Kassaby, Y. A., Mansfield, S., Isik, F., & Stoehr, M. (2011). In situ wood quality assessment in Douglas-fir. *Tree Genetics & Genomes*, 7(3), 553–561. <https://doi.org/10.1007/s11295-010-0355-1>
49. Enescu, V. (1975). *Ameliorarea principalelor specii forestiere*. Editura Ceres.
50. Enescu, V. (1982). *Producerea semințelor forestiere genetic ameliorate*. Editura Ceres.
51. Enescu, V. (1984). *Cercetări de proveniență la duglas și larice*. Redacția de Propagandă Tehnică Agricolă, ICAS (Seria II).
52. Enescu, V. (1984). *Cercetări de proveniență la duglas și larice*. Redacția de Propagandă Tehnică Agricolă.
53. Ennos, R., Cottrell, J., Hall, J., & O'Brien, D. (2019). Is the introduction of novel exotic forest tree species a rational response to rapid environmental change? A British perspective. *Forest Ecology and Management*, 432, 718–728. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.018>
54. Espinoza, S., Quiroz, I., Magni, C., Yáñez, M., Ivkovic, M., & Ipinza, R. (2023). Douglas-fir exhibits high growth performance and survival in southern Chile. *Forest Science*, 69. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxad030>
55. Essl, F., Mang, T., Dullinger, S., Moser, D., & Hulme, P. E. (2011). Macroecological drivers of alien conifer naturalizations worldwide. *Ecography*, 34(6), 1076–1084. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.06943.x>
56. Experts Forestiers de Belgique. (2022). *Tableau des prix du bois 2021–2022* (în franceză). <https://www.experts-forestiers.be/Tableauprixbois.pdf>
57. Feng, Y., Schmid, B., Loreau, M., Forrester, D., Fei, S., Zhu, J., Tang, Z., et al. (2022). Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions. *Science*, 376, 865–868. <https://doi.org/10.1126/science.abm6363>
58. Fletcher, A. M., & Barner, H. (1978). The procurement of seed for provenance research with particular reference to collections in NW America. În K. Ching & O. Sziklai (Eds.), *Proceedings of the IUFRO Joint Meeting of Working Parties* (pp. 141–154). Ministry of Forests, British Columbia.
59. Fletcher, A. M., & Barner, H. (1987). *The IUFRO Douglas-fir provenance experiment 1966–1970: Results and conclusions based on the evaluation of 20-year-old field tests* (Raport tehnic). Danida Forest Seed Centre.
60. Fletcher, A. M., & Samuel, C. J. A. (2010). *Choice of Douglas fir seed sources for use in British forests*. Forestry Commission.
61. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *The second report on the state of the world's forest genetic resources*. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture. <https://doi.org/10.4060/cd4838en>

62. Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (3rd ed.). SAGE Publications. <https://www.john-fox.ca/Companion/>
63. Franklin, J. F., Cromack, K., Jr., Denison, W., McKee, A., Maser, C., Sedell, J., Swanson, F., & Juday, G. (1981). *Ecological characteristics of old-growth Douglas-fir forests* (General Technical Report PNW-GTR-118). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://doi.org/10.2737/PNW-GTR-118>
64. Frei, E. R., Moser, B., & Wohlgemuth, T. (2022). Competitive ability of natural Douglas fir regeneration in central European close-to-nature forests. *Forest Ecology and Management*, 503, 119767. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119767>
65. Frothingham, E. H. (1909a). *Douglas fir: A study of the Pacific Coast and Rocky Mountain forms*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service. <http://archive.org/details/douglasfirststudyo15frot>
66. Frothingham, E. H. (1909). *Douglas fir: A study of the Pacific Coast and Rocky Mountain forms* (No. 150). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/133359>
67. Fulé, P. Z., & Covington, W. W. (1999). Fire regime changes in La Michilía Biosphere Reserve, Durango, Mexico. *Conservation Biology*, 13(3), 640–652. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97512.x>
68. Fulín, M., Dostál, J., Čáp, J., & Novotný, P. (2023). Evaluation of silver fir provenances at 51 years of age in provenance trials in the Předhoří Hrubý Jeseník and Nízký Jeseník Mts. regions, Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 69(2), 44–59. <https://doi.org/10.17221/181/2022-JFS>
69. Gamble, W. E., Adams, W. T., & Tappeiner, J. (1996). *Survival and growth of Douglas-fir seed sources in the Hospital Tract range-wide source archive plantation* (Research contribution). Forest Research Laboratory, Oregon State University.
70. Georgieva, M., Petkova, K., & Molle, E. (2024). Effects of needle cast diseases on the growth of a 33-year-old Douglas-fir provenance plantation in northwestern Bulgaria. *Folia Oecologica*, 51, 175–184. <https://doi.org/10.2478/foecol-2024-0017>
71. Giagli, K., Timko, L., Gryc, V., & Vavrčík, H. (2019). Is the quality of the non-native Douglas-fir wood produced in the Czech forests comparable to native softwoods? *BioResources*, 14(2), 2931–2945. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2931-2945>
72. Giurgiu, V., Decei, I., & Drăghiciu, D. (2004). *Metode și tabele dendrometrice* (în română). Editura Ceres.
73. González-Elizondo, M., Jurado, E., Návar, J., González-Elizondo, M. S., Villanueva, J., Aguirre, O., & Jiménez, J. (2005). Tree-rings and climate relationships for Douglas-fir chronologies from the Sierra Madre Occidental, Mexico: A 1681–2001 rain reconstruction. *Forest Ecology and Management*, 213(1), 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.012>

74. Greiser, C., Huo, L., Ghaly, M., Brown, I., Metsu, C., Van Meerbeek, K., & Lehmann, P. (2025). Bark beetles as microclimate engineers – thermal characteristics of infested spruce trees at the canopy surface and below the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 375, 110796. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2025.110796>
75. Gričar, J., Arnič, D., Krajnc, L., Prislan, P., Božič, G., Westergren, M., Mátyás, C., & Kraigher, H. (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>
76. Guijarro, J. A., & Guijarro, M. J. A. (2019). *climatol: Climate tools* (R package). <https://cran.r-project.org/web/packages/climatol/>
77. Gülcü, S., & Bilir, N. (2015). Provenance variations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the southern part of Turkey. *Pakistan Journal of Botany*, 47, 1883–1893.
78. Halbritter, A. H., Fior, S., Keller, I., Billeter, R., Edwards, P. J., Holderegger, R., Karrenberg, S., et al. (2018). Trait differentiation and adaptation of plants along elevation gradients. *Journal of Evolutionary Biology*, 31(6), 784–800. <https://doi.org/10.1111/jeb.13262>
79. Hankin, L. E., Leger, E. A., & Bisbing, S. M. (2023). Reforestation of high elevation pines: Direct seeding success depends on seed source and sowing environment. *Ecological Applications*, 33(6), e2897. <https://doi.org/10.1002/eap.2897>
80. Haralamb, A. (1967). *Cultura speciilor forestiere* (Editia a III-a). Editura Agro-Silvică.
81. Haralamb, A. M. (1963). *Cultura speciilor forestiere* (în română). Editura Agro-Silvică.
82. Hayatgheibi, H., Fries, A., Kroon, J., & Wu, H. X. (2019). Estimation of genetic parameters, provenance performances, and genotype-by-environment interactions for growth and stiffness in lodgepole pine (*Pinus contorta*). *Scandinavian Journal of Forest Research*, 34(1), 1–11. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1542025>
83. Henin, J.-M., Pollet, C., Schmitt, U., Blohm, J.-H., Koch, G., Melcher, E., Welling, J., et al. (2019). Technological properties of Douglas-fir wood. În H. Spiecker, M. Lindner, & J. K. Schuler (Eds.), *Douglas-fir: An option for Europe* (pp. 89–97). European Forest Institute.
84. Hermann, R. K., & Lavender, D. P. (1990). *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco: Douglas-fir. În R. M. Burns & B. H. Honkala (Eds.), *Silvics of North America* (Vol. 1, Conifers, pp. 527–540). U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
85. Hess, M., Wildhagen, H., Junker, L. V., & Ensminger, I. (2016). Transcriptomic responses to temperature, water availability, and photoperiod are conserved among mature trees of two divergent Douglas-fir provenances from a coastal and an interior habitat. *BMC Genomics*, 17(1), 682. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3022-6>

86. Howe, G. T., Jayawickrama, K., Cherry, M., Johnson, G. R., & Wheeler, N. C. (2006).
87. Huang, W., Fonti, P., Larsen, J. B., Ræbild, A., Callesen, I., Pedersen, N. B., & Hansen, J. K. (2017). Projecting tree-growth responses into future climate: A study case from a Danish-wide common garden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 240–251. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.016>
88. Illingworth, K., & St. Pierre, D. (1975). *Coastal Douglas-fir provenance study*. British Columbia Forest Service, Forest Research Division.
89. Institutul Național de Statistică. (2025). *Statistica activităților din silvicultură în anul 2024*. Institutul Național de Statistică.
90. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Global warming of 1.5°C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press.
91. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. 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 & J. Romero, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
92. Isaac-Renton, M., Moore, B., Degner, J., Bealle Statland, C., Bogdanski, B., Sun, L., & Stoehr, M. (2025). Economic gain of genetically selected coastal Douglas-fir: Timber, log and carbon value at varying planting densities. *Forest Policy and Economics*, 171, 103397. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2024.103397>
93. Kantor, P. (2008). Production potential of Douglas fir at mesotrophic sites of Křtiny Training Forest Enterprise. *Journal of Forest Science*, 54(7), 321–332. <https://doi.org/10.17221/35/2008-JFS>
94. Kantor, P., & Mareš, R. (2009). Production potential of Douglas fir in acid sites of Hůrky Training Forest District, Secondary Forestry School in Písek. *Journal of Forest Science*, 55(7), 312–322. <https://doi.org/10.17221/2/2009-JFS>
95. Kelleher, C. T., de Vries, S. M. G., Baliuckas, V., Bozzano, M., Frydl, J., Goicoechea, P. G., et al. (2015). *Implicațiile politicilor globale, europene și naționale pentru conservarea și utilizarea resurselor genetice forestiere în Europa*. Programul european de resurse genetice forestiere (EUFORGEN). Bioversity International.
96. Kerns, B. K., Day, M. A., & Ikeda, D. (2020). Long-term seeding outcomes in slash piles and skid trails after conifer removal. *Forests*, 11(8), 839. <https://doi.org/10.3390/f11080839>

97. Kirby, J. W. (2016). *Stem and branch diameter response in pruned Douglas-fir plantations (Pseudotsuga menziesii var. menziesii): Implications for volume and clearwood production in the U.S. Pacific Northwest* (Teză de doctorat). <https://hdl.handle.net/1773/36692>
98. Kirkwood, J. E. (1922). *Forest distribution in the northern Rocky Mountains*. State University.
99. Kjær, E., Lobo, A., & Myking, T. (2014). The role of exotic tree species in Nordic forestry. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 29. <https://doi.org/10.1080/02827581.2014.926098>
100. Konnert, M., Alizoti, P., Bastien, J.-C., Chakraborty, D., Cvjetković, B., Klisz, M., Kroon, J., et al. (2019). *European provenance recommendations for selected non-native tree species* (WG2 raport). European Forest Genetic Resources Programme (EUFORGEN).
101. Konnert, M., & Bastien, J.-C. (2019). Genecology of Douglas-fir and tree improvement strategies. În H. Spiecker, M. Lindner, & J. Schuler (Eds.), *Douglas-fir: An option for Europe* (pp. 46–58). European Forest Institute. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_wsctu9_2019.pdf
102. Korecký, J., Čepl, J., Stejskal, J., Faltinová, Z., Dvořák, J., Lstibůrek, M., & El-Kassaby, Y. A. (2021). Genetic diversity of Norway spruce ecotypes assessed by GBS-derived SNPs. *Scientific Reports*, 11(1), 23119. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02545-z>
103. Kupka, I., Podrázský, V., & Kubeček, J. (2013). Soil-forming effect of Douglas fir at lower altitudes: A case study. *Journal of Forest Science*, 59(9), 345–351. <https://doi.org/10.17221/27/2013-JFS>
104. Kurjak, D., Petřík, P., Sliacka Konôpková, A., Link, R. M., Gömöry, D., Hajek, P., Liesebach, M., Leuschner, C., & Schuldt, B. (2024). Inter-provenance variability and phenotypic plasticity of wood and leaf traits related to hydraulic safety and efficiency in seven European beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances differing in yield. *Annals of Forest Science*, 81(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01227-w>
105. Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., Christensen, R. H. B., & Jensen, S. P. (2020). *lmerTest: Tests in linear mixed effects models* (R package version 3.1-3). <https://CRAN.R-project.org/package=lmerTest>
106. Langlet, O. (1971). Two hundred years genecology. *Taxon*, 20, 653–721. <https://doi.org/10.2307/1218596>
107. Lavender, D. P., & Hermann, R. K. (2014). *Douglas-fir: The genus Pseudotsuga*. Forest Research Laboratory.
108. Lăzărescu, C., & Ionescu, C. (1964). *Cultura duglasului verde și a pinului strob* (în română). Editura Agro-Silvică.
109. Leites, L. P., Robinson, A. P., Rehfeldt, G. E., Marshall, J. D., & Crookston, N. L. (2012). Height-growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir: A novel analysis of historic data. *Ecological Applications*, 22(1), 154–165. <https://doi.org/10.1890/11-0150.1>

110. Leites, L. P., Robinson, A. P., Rehfeldt, G. E., Marshall, J. D., & Crookston, N. L. (2012). Height-growth response to climatic changes differs among populations of Douglas-fir: A novel analysis of historic data. *Ecological Applications*, 22(1), 154–165. <https://doi.org/10.1890/11-0150.1>
111. Leites, L., & Benito Garzón, M. (2023). Forest tree species adaptation to climate across biomes: Building on the legacy of ecological genetics to anticipate responses to climate change. *Global Change Biology*, 29(17), 4711–4730. <https://doi.org/10.1111/gcb.16711>
112. Levanič, T., & Štraus, H. (2022). Effects of climate on Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*(Mirb.) Franco) growth southeast of the European Alps. *Plants*, 11(12), 1571. <https://doi.org/10.3390/plants11121571>
113. Li, Y., Suontama, M., Burdon, R. D., & Dungey, H. S. (2017). Genotype by environment interactions in forest tree breeding: Review of methodology and perspectives on research and application. *Tree Genetics & Genomes*, 13(3), 60. <https://doi.org/10.1007/s11295-017-1144-x>
114. Liao, J., Hang, J., Luo, Q., Luo, H., Ma, T., Wei, Z., & Yuan, H. (2023). Seasonal variability of forest cooling and warming effects and response to drought in mid-to-high latitudes of the Northern Hemisphere. *Forest Ecology and Management*, 546, 121324. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121324>
115. Liao, J., Zheng, W., Liao, Q., & Lu, S. (2024). Global latitudinal patterns in forest ecosystem nitrous oxide emissions are related to hydroclimate. *Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 187. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00737-8>
116. Liepe, K. J., van der Maaten, E., van der Maaten-Theunissen, M., Kormann, J. M., Wolf, H., & 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>
117. Littell, J. S., Peterson, D. L., & Tjoelker, M. (2008). Douglas-fir growth in mountain ecosystems: Water limits tree growth from stand to region. *Ecological Monographs*, 78(3), 349–368. <https://doi.org/10.1890/07-0712.1>
118. Longo, B. L., Brüchert, F., Becker, G., & Sauter, U. H. (2019). Validation of a CT knot detection algorithm on fresh Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*(Mirb.) Franco) logs. *Annals of Forest Science*, 76(2), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0812-4>
119. Low, C., Shelbourne, T., & Henley, D. (2012). Effect of seed source of Douglas-fir at high-elevation New Zealand sites: Performance at age eight years.
120. Lowell, E., Maguire, D., Briggs, D., Turnblom, E., Jayawickrama, K., & Bryce, J. (2014). Effects of silviculture and genetics on branch/knot attributes of coastal Pacific Northwest Douglas-fir and implications for wood quality—A synthesis. *Forests*, 5(7), 1717–1736. <https://doi.org/10.3390/f5071717>

121. Macdonald, E., & Hubert, J. (2002). A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 75(2), 107–138. <https://doi.org/10.1093/forestry/75.2.107>
122. Magalska, L., & Howe, G. T. (2014). Genetic and environmental control of Douglas-fir stem defects. *Forest Ecology and Management*, 318, 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.01.002>
123. Malmqvist, C., Wallertz, K., & Johansson, U. (2018). Survival, early growth and impact of damage by late-spring frost and winter desiccation on Douglas-fir seedlings in southern Sweden. *New Forests*, 49, 543–560. <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9635-7>
124. Marchi, M., Bucci, G., Iovieno, P., & Ray, D. (2024). ClimateDT: A global scale-free dynamic downscaling portal for historic and future climate data. *Environments*, 11(4), 82. <https://doi.org/10.3390/environments11040082>
125. Matyas, C. (1994). Modeling climate change effects with provenance test data. *Tree Physiology*, 14(7–9), 797–804. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.797>
126. Mátyás, C., Balázs, P., & Nagy, L. (2023). Climatic stress test of Scots pine provenances in northeastern Europe reveals high phenotypic plasticity and quasi-linear response to warming. *Forests*, 14(10), 1950. <https://doi.org/10.3390/f14101950>
127. McDonough MacKenzie, C., Primack, R. B., & Miller-Rushing, A. J. (2018). Local environment, not local adaptation, drives leaf-out phenology in common gardens along an elevational gradient in Acadia National Park, Maine. *American Journal of Botany*, 105(6), 986–995. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1108>
128. Mejnartowicz, J., & Szmidt, A. (1978). Investigations into the resistance of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) populations to the Douglas fir woolly aphid (*Gilletteella cooleyi* Gill.). *Silvae Genetica*, 27(2), 59–62.
129. Mejnartowicz, L. (1976). Genetic investigations on Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) populations. *Arboretum Kórnickie*, 21, 125–187.
130. Menzies, A. (1923). *Menzies' journal of Vancouver's voyage, April to October, 1792* (C. F. Newcombe, Ed.; with botanical and ethnological notes; biographical note by J. Forsyth). <https://open.library.ubc.ca/collections/bcbooks/items/1.0226118>
131. Merlo, E. (2002). *Optimización del proceso de obtención de semilla y su aplicación en el ciclo de mejora genética de Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco* (Teză de doctorat, în spaniolă). Universidad Politécnica de Madrid.
132. Mihai, G., Alexandru, A., Niță, I.-A., & Bîrsan, M.-V. (2022). Climate change in the provenance regions of Romania over the last 70 years: Implications for forest management. *Forests*, 13, 1203. <https://doi.org/10.3390/f13081203>

133. Mihai, G., Bîrsan, M.-V., Dumitrescu, A., Alexandru, A., Mirancea, I., Ivanov, P., Stuparu, E., Teodosiu, M., & Daia, M. (2018). Adaptive genetic potential of European silver fir in Romania in the context of climate change. *Annals of Forest Research*, 61. <https://doi.org/10.15287/afr.2018.1021>
134. Mihai, G., Curtu, A.-L., Alexandru, A.-M., Niță, I.-A., Ciocîrlan, E., & Bîrsan, M.-V. (2022). Growth and adaptive capacity of Douglas fir genetic resources from western Romania under climate change. *Forests*, 13(5), 805. <https://doi.org/10.3390/f13050805>
135. Mihăilescu, G., Tăut, R.-M., TâmpEANU, R., & Nicolescu, V.-N. (2022). Durata și costurile aferente elagajului artificial la duglasul verde (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco): Studiu de caz în arborete din Ocolul Silvic Călimănești (în română). *Bucovina Forestieră*, 22(2), 157–166. <https://doi.org/10.4316/bf.2022.019>
136. Milenkova, A., Konnert, M., Fussi, B., & Petkova, K. (2018). Identification of varieties and genetic diversity of Douglas-fir stands in the region of Osogovo, southwest Bulgaria. *Forestry Ideas*, 24, 37–50.
137. Minore, D. (1979). *Comparative autecological characteristics of northwestern tree species: A literature review* (General Technical Report PNW-GTR-087). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. <https://research.fs.usda.gov/treearch/25175>
138. Moise, M. (1998). *Studiul variabilității genetice interpopulaționale la larice (Larix decidua Mill.) și duglas (Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco) în culturi comparative multistaționale din România* (Teză de doctorat, în română). Academia de Științe Agricole și Silvici.
139. Montwé, D., Spiecker, H., & Hamann, A. (2015). Five decades of growth in a genetic field trial of Douglas-fir reveal trade-offs between productivity and drought tolerance. *Tree Genetics & Genomes*, 11(2), 29. <https://doi.org/10.1007/s11295-015-0854-1>
140. Moser, B., Frei, E. R., Bachofen, C., Wohlgemuth, T., & Scherrer, D. (2025). Non-native Douglas-fir seedlings outcompete native Norway spruce, silver fir and Scots pine under dry and nutrient-poor conditions. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1546250>
141. Nabais, C., Hansen, J. K., David-Schwartz, R., Klisz, M., López, R., & 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>
142. Nanson, A. (2004). *Génétique et amélioration des arbres forestiers* (în franceză). Agronomiques de Gembloux Publishing House.
143. Negulescu, E. G., & Săvulescu, A. (1957). *Dendrologie*. Editura Agro-Silvică de Stat, București.
144. Negulescu, E. G. (1959). Regime și tratamente. În E. G. Negulescu & Gh. Ciurac (Eds.), *Silvicultura* (pp. 598–773). Editura Agro-Silvică de Stat, București, România.

145. Neophytou, C., Hasenauer, H., & Kroon, J. (2022). Molecular genetic identification explains differences in budburst timing among progenies of selected trees of the Swedish Douglas-fir breeding programme. *Forests*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/f13060895>
146. Neophytou, C., Weisser, A.-M., Landwehr, D., Šeho, M., Kohnle, U., Ensminger, I., & Wildhagen, H. (2016). Assessing the relationship between height growth and molecular genetic variation in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) provenances. *European Journal of Forest Research*, 135(3), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0946-y>
147. Nicolescu, V. N. (2016). *Silvicultură. Vol. I: Biologia pădurii*. Editura Aldus, Braşov.
148. Nicolescu, V.-N., Mason, W. L., Bastien, J.-C., Vor, T., Petkova, K., Podrázský, V., Đodan, M., et al. (2023). Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) in Europe: An overview of management practices. *Journal of Forestry Research*, 34(4), 871–888. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01607-4>
149. Niemczyk, M., Chmura, D. J., Socha, J., Wojda, T., Mroczek, P., Gil, W., & Thomas, B. R. (2021). How geographic and climatic factors affect the adaptation of Douglas-fir provenances to the temperate continental climate zone in Europe. *European Journal of Forest Research*, 140(6), 1341–1361. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01398-5>
150. Novák, J., Dušek, D., Kacálek, D., Slodiák, M., Šimerda, L., & Leugner, J. (2018). Optimized measures for silviculture of Douglas-fir in mixture with other tree species. In J. Novák, D. Kacálek, V. Podrázský, & L. Šimerda (Eds.), *Applying Douglas-fir use in forest management of the Czech Republic* (pp. 166–183).
151. Olivoto, T., & Dal'Col Lúcio, A. (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>
152. Olivoto, T., & Nardino, M. (2021). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics*, 37(10), 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>
153. Olivoto, T., Dal'Col Lúcio, A., Gonzales da Silva, J. A., Sari, B. G., & Diel, M. I. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials II: Selection based on multiple traits. *Agronomy Journal*, 111(6), 2961–2969. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0221>
154. Osborne, N. L., & Maguire, D. A. (2016). Modelling knot geometry from branch angles in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Canadian Journal of Forest Research*, 46(2), 215–224. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0145>
155. Paligi, S. S., Lichter, J., Kotowska, M., Schwutke, R. L., Audisio, M., Mrak, K., Penanhoat, A., et al. (2024). Water status dynamics and drought tolerance of juvenile European beech, Douglas fir and Norway spruce trees as dependent on neighbourhood and nitrogen supply. *Tree Physiology*, 44(5), tpae044. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpae044>

156. Park, A., & Rodgers, J. (2023). Provenance trials in the service of forestry assisted migration: A review of North American field trials and experiments. *Forest Ecology and Management*, 537, 120854. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120854>
157. Pâques, L. E. (2013). *Forest tree breeding in Europe: Current state-of-the-art and perspectives*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9_1
158. Pearson, G. A. (1931). *Forest types in the Southwest as determined by climate and soil* (Technical Bulletin). United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.163077>
159. Pedlar, J. H., McKenney, D. W., & Allen, D. J. (2024). Effect of tree species and seed origin on climate change trial outcomes in southern Ontario. *New Forests*, 55(1), 63–79. <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09965-x>
160. Peláez, P., Lorenzana, G. P., Baesen, K., Montes, J. R., & De La Torre, A. R. (2024). Spatially heterogeneous selection and inter-varietal differentiation maintain population structure and local adaptation in a widespread conifer. *BMC Ecology and Evolution*, 24(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s12862-024-02304-4>
161. Peterson, D., & Arbaugh, M. (2011). Estimating post-fire survival of Douglas-fir in the Cascade Range. *Canadian Journal of Forest Research*, 19, 530–533. <https://doi.org/10.1139/x89-084>
162. Petkova, K., Georgieva, M., & Uzunov, M. (2014). Investigation of Douglas-fir provenance test in north-western Bulgaria at the age of 24 years. *Journal of Forest Science*, 60(7), 288–296. <https://doi.org/10.17221/12/2014-JFS>
163. Peuke, A. D., Schraml, C., Hartung, W., & Rennenberg, H. (2002). Identification of drought-sensitive beech ecotypes by physiological parameters. *New Phytologist*, 154(2), 373–387. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00400.x>
164. Podrázský, V., Fulin, M., Prknová, H., Beran, F., & Třeštík, M. (2016). Changes of agricultural land characteristics as a result of afforestation using introduced tree species. *Journal of Forest Science*, 62, 72–79. <https://doi.org/10.17221/96/2015-JFS>
165. Podrázský, V., Kupka, I., & Prknová, H. (2020). Substitution of Norway spruce for Douglas-fir: Changes of soil microbial activities as climate change-induced shift in species composition – A case study. *Central European Forestry Journal*, 66, 71–77. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0007>
166. Podrázský, V., Martiník, A., Matějka, K., & Viewegh, J. (2014). Effects of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) on understorey layer species diversity in managed forests. *Journal of Forest Science*, 60(7), 263–271.
167. Pollet, C., Henin, J.-M., Hébert, J., & Jourez, B. (2017). Effect of growth rate on the physical and mechanical properties of Douglas-fir in western Europe. *Canadian Journal of Forest Research*, 47, 1056–1065. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0290>

168. Popa-Costea, V. (1973). Cercetări privind comportarea unor proveniențe comerciale de duglas verde în condițiile țării noastre (în română). *Studii și Cercetări (Seria I)*, XXIX(1), 249–305. ICAS.
169. Popov, E. B. (2014). Results of 20-year-old Douglas-fir provenance experiment established on the northern slopes of the Rila Mountain in Bulgaria.
170. Pötzelsberger, E., Spiecker, H., Neophytou, C., Mohren, F., Gazda, A., & Hasenauer, H. (2020). Growing non-native trees in European forests brings benefits and opportunities but also has its risks and limits. *Current Forestry Reports*, 6(4), 339–353. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00129-0>
171. Poupon, V., Gezan, S., Schueler, S., & Lstibůrek, M. (2023). Genotype × environment interaction and climate sensitivity in growth and wood density of European larch. *Forest Ecology and Management*, 545, 121259. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121259>
172. Pulkrab, K., Sloup, M., & Zeman, M. (2014). Economic impact of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) production in the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 60(7), 297–306. <https://doi.org/10.17221/27/2014-JFS>
173. Purcelean, Șt., & Pașcovișchi, S. (1954). Bradul duglas *Pseudotsuga taxifolia* Britt. (*P. douglasii* Carr.). În Z. Spârchez, Al. Beldie, S. Rădulescu, & T. Cocalcu (Eds.), *Îndrumări tehnice pentru cultura speciilor lemnoase exotice* (pp. 3–9). Editura Agro-Silvică de Stat.
174. R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
175. Ræbild, A., Hansen, C. P., & Kjær, E. D. (2002). *Statistical analysis of data from provenance trials*. Danida Forest Seed Centre. https://curis.ku.dk/ws/files/20711576/gtn_63_int.pdf
176. Rais, A., Poschenrieder, W., Pretzsch, H., & van de Kuilen, J.-W. G. (2014). Influence of initial plant density on sawn timber properties for Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). *Annals of Forest Science*, 71(5), 617–626. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0362-8>
177. Remeš, J., Pulkrab, K., Bílek, L., & Podrázský, V. (2020). Economic and production effect of tree species change as a result of adaptation to climate change. *Forests*, 11(4), 431. <https://doi.org/10.3390/f11040431>
178. Restaino, C. M., Peterson, D. L., & Littell, J. S. (2016). Increased water deficit decreases Douglas-fir growth throughout western U.S. forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(34), 9557–9562. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602384113>
179. Riedel, V. P., Engel, P., Waite, P.-A., Link, R. M., Schirmer, R., Hamberger, J., & Schuldt, B. (2025). The effect of climate at origin on Douglas-fir growth, leaf traits, and embolism resistance along a rainfall gradient in Central Europe. *Trees*, 39(2), Article 42. <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02605-1>

180. Robinson, A. R., Ukrainetz, N. K., Kang, K.-Y., & Mansfield, S. D. (2007). Metabolite profiling of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) field trials reveals strong environmental and weak genetic variation. *New Phytologist*, 174(4), 762–773. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02046.x>
181. Ronch, F. D., Caudullo, G., & de Rigo, D. (2016). *Pseudotsuga menziesii* in Europe: Distribution, habitat, usage and threats. European Forest Institute.
182. Ross, R. J. (Ed.). (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (FPL-GTR-282). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
183. Stănescu, V. (1979). *Dendrologie*. Editura Didactică și Pedagogică, București.
184. Stănescu, V., Șofletea, N., & Popescu, O. (1997). *Flora forestieră lemnoasă a României*. Editura Ceres, București.
185. Schermann, N., Adams, W. T., & Aitken, S. N. (1977). Genetic parameters of stem form traits in a 9-year-old coastal Douglas-fir progeny test in Washington. *Silvae Genetica*.
186. Schmidt, U., Nyssen, B., Muys, B., Lei, P., & Pyttel, P. (2016). The history of introduced tree species in Europe in a nutshell. În F. Krumm (Ed.), *Introduced tree species to European forests: Challenges and opportunities* (pp. 423). European Forest Institute.
187. Schorn, H. E., & Thompson, A. (1998). The genus *Pseudotsuga*: A revision of the fossil record and inferred paleo-biogeographical and migrational patterns. În *UCMP 75th/125th Anniversary: Integrative Palaeontology and the Future* (February 28, 1998). University of California, Berkeley.
188. Schueler, S., George, J.-P., Karanitsch-Ackerl, S., Mayer, K., Klumpp, R., & Grabner, M. (2021). Evolvability of drought response in four native and non-native conifers: Opportunities for forest and genetic resource management in Europe. *Frontiers in Plant Science*, 12, 648312. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.648312>
189. Schütz, J.-P., Ammann, P., & Zingg, A. (2015). Optimising the yield of Douglas-fir with an appropriate thinning regime. *European Journal of Forest Research*, 134, 469–480. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0865-3>
190. Schwinning, S., Lortie, C. J., Esque, T. C., & DeFalco, L. A. (2022). What common-garden experiments tell us about climate responses in plants. *Journal of Ecology*.
191. Šeho, M., & Kohnle, U. (2014). The international Douglas-fir provenance test 1958: Differences in branch and stem characteristics on trials in south-western Germany. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 185, 27–42.
192. Sierra-de-Grado, R., Pando, V., Voltas, J., Zas, R., Majada, J., & Climent, J. (2021). Straightening the crooked: Intraspecific divergence of stem posture control and associated trade-offs in a model conifer. *Journal of Experimental Botany*, 73(4), 1222–1235. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab535>

193. Silen, R. R. (1978). *Genetics of Douglas-fir*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
194. Smolnikar, P., Brus, R., & Jarni, K. (2021). Differences in growth and log quality of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) provenances. *Forests*, 12(3), 287. <https://doi.org/10.3390/f12030287>
195. Spellmann, H., Weller, A., Brang, P., Michiels, H. G., & Bolte, A. (2015). Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco). În T. Vor, H. Spellmann, A. Bolte, & C. Ammer (Eds.), *Potentials and risks of introduced tree species* (pp. 187–217). Göttinger Forstwissenschaften.
196. St. Clair, J. B., & Howe, G. T. (2007). Genetic maladaptation of coastal Douglas-fir seedlings to future climates. *Global Change Biology*, 13(7), 1441–1454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01385.x>
197. St. Clair, J. B., Howe, G. T., & Kling, J. G. (2020). The 1912 Douglas-fir heredity study: Long-term effects of climatic transfer distance on growth and survival. *Journal of Forestry*, 118(1), 1–13. <https://doi.org/10.1093/jofore/fvz064>
198. St. Clair, J. B., Mandel, N. L., & Vance-Borland, K. W. (2005). Genecology of Douglas-fir in western Oregon and Washington. *Annals of Botany*, 96(7), 1199–1214. <https://doi.org/10.1093/aob/mci278>
199. Stănescu, V. (1979). *Dendrologie*. Editura Didactică și Pedagogică.
200. Stoica, E., Alexandru, A. M., Mihai, G., & Curtu, A. L. (2025). Douglas fir performance in Romania: Growth insights from common garden experiments. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 18(67), 2, Article 5. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2025.18.67.2.5>
201. Stoica, E., Alexandru, A. M., Mihai, G., & Curtu, A. L. (2025). Variation in survival and stem quality of Douglas-fir provenances: Insights from 47-year-old common garden experiments in Romania. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(3), Article 14695. <https://doi.org/10.15835/nbha53314695>
202. Stoica, E., Alexandru, A. M., Mihai, G., Scarlatescu, V., & Curtu, A. L. (2025). Evaluating Douglas-fir provenances in Romania through multi-trait selection. *Plants*, 14(9), 1347. <https://doi.org/10.3390/plants14091347>
203. Stokes, V., Kerr, G., & Connolly, T. (2020). Underplanting is a practical silvicultural method for regenerating and diversifying conifer stands in Britain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa027>
204. Štraus, H., & Bončina, A. (2025). The vulnerability of four main tree species in European forests to seven natural disturbance agents: Lessons from Slovenia. *European Journal of Forest Research*, 144(2), 267–282. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01754-1>

205. Șofletea, N., & Curtu, L. (2007). *Dendrologie*. Editura Universității „Transilvania”, Brașov.
206. Thomas, F., Rzepecki, A., & Werner, W. (2022). Non-native Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Central Europe: Ecology, performance and nature conservation. *Forest Ecology and Management*, 506, 119956. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119956>
207. Thompson, C. G., Kim, R. S., Aloe, A. M., & Becker, B. J. (2017). Extracting the variance inflation factor and other multicollinearity diagnostics from typical regression results. *Basic and Applied Social Psychology*, 39(2), 81–90.
208. Thompson, D., & Pfeifer, A. R. (1995). IUFRO Douglas-fir provenance trial – 24 years Irish results. În *Proceedings of the Joint Meeting of the IUFRO Working Parties S2.02.05, S2.02.06, S2.02.12 and S2.02.14*. Limoges, France.
209. Thurm, E. A., Hernández, L., Baltensweiler, A., Ayan, S., Rasztovits, E., Bielak, K., Zlatanov, T. M., et al. (2018). Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management*, 430, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>
210. Todoroki, C. L., Monserud, R. A., & Parry, D. L. (2005). Predicting internal lumber grade from log surface knots: Actual and simulated results. *Forest Products Journal*, 55(6), 38–46.
211. Tsuyama, I., Ishizuka, W., Kitamura, K., Taneda, H., & Goto, S. (2020). Ten years of provenance trials and application of multivariate random forests predicted the most preferable seed source for silviculture of *Abies sachalinensis* in Hokkaido, Japan. *Forests*, 11(10), 1058. <https://doi.org/10.3390/f11101058>
212. van Loo, M., & Dobrowolska, D. (2019). History of introducing Douglas-fir to Europe. În H. Spiecker, M. Lindner, & J. Schuler (Eds.), *Douglas-fir: An option for Europe* (pp. 21–25). European Forest Institute. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_wsctu9_2019.pdf
213. van Loo, M., Lazic, D., Chakraborty, D., Hasenauer, H., & Schüller, S. (2019). North American Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) in Europe: Establishment and reproduction within new geographic space without consequences for its genetic diversity. *Biological Invasions*, 21(11), 3249–3267. <https://doi.org/10.1007/s10530-019-02045-2>
214. Vejpustková, M., & Čihák, T. (2019). Climate response of Douglas-fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/f10020097>
215. Vitali, V., Büntgen, U., & Bauhus, J. (2018). Seasonality matters—The effects of past and projected seasonal climate change on the growth of native and exotic conifer species in Central Europe. *Dendrochronologia*, 48, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.001>
216. Walter, H., & Lieth, H. (1967). *Klimadiagramm-Weltatlas* (în germană). Gustav Fischer Verlag.

217. Wang, T., Hamann, A., Yanchuk, A., O'Neill, G. A., & Aitken, S. N. (2006). Use of response functions in selecting lodgepole pine populations for future climates. *Global Change Biology*, 12(12), 2404–2416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01271.x>
218. Wang, Y., Titus, S. J., & LeMay, V. M. (1998). Relationships between tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(8), 1171–1183. <https://doi.org/10.1139/x98-092>
219. Waring, B., Neumann, M., Prentice, I. C., Adams, M., Smith, P., & Siebert, M. (2020). Forests and decarbonization – Roles of natural and planted forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 58. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00058>
220. Wei, T., & Simko, V. (2021). *corrplot: Visualization of a correlation matrix*. <https://doi.org/10.32614/cran.package.corrplot>
221. Wesselkamp, M., Roberts, D. R., & Dormann, C. F. (2024). Identifying potential provenances for climate-change adaptation using spatially variable coefficient models. *BMC Ecology and Evolution*, 24(1), 70. <https://doi.org/10.1186/s12862-024-02260-z>
222. White, T. L., & Ching, K. K. (1985). Provenance study of Douglas-fir in the Pacific Northwest region. IV. Field performance at age 25 years. *Silvae Genetica*, 34(2/3), 84–90.
223. White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (2007). *Forest genetics*. CABI.
224. Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer.
225. Wu, X., Wang, Y., Lyu, Y., Chen, W., Li, M., Sun, S., et al. (2025). Provenance-specific height-diameter modeling for Chinese fir: A clustered mixed-effects approach. *Biology*, 14(9), 1301. <https://doi.org/10.3390/biology14091301>
226. Ye, T. Z., & Jayawickrama, K. J. S. (2024). Predicted responses of genetically improved populations to climate changes based on second-cycle Douglas-fir progeny tests. *Forests*, 15(9), 1610. <https://doi.org/10.3390/f15091610>
227. Yin, M., Wang, C., Wang, H., Han, Q., Zhao, Z., Tang, C., Guo, J., & Zeng, J. (2023). Modeling and evaluating site and provenance variation in height-diameter relationships for *Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don in southern China. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1248278>
228. Ying, C. C. (1990). Adaptive variation in Douglas-fir, Sitka spruce and true fir: A summary of provenance research in coastal British Columbia. In *Proceedings of the Joint Meeting of the Western Forest Genetics Association and IUFRO Working Parties S2.02-05, 06, 12 and 14*. Olympia, WA, USA.
229. Zeidler, A., Borůvka, V., Černý, J., & Baláš, M. (2022). Douglas-fir outperforms most commercial European softwoods. *Industrial Crops and Products*, 181, 114828. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114828>