



Universitatea  
Transilvania  
din Brașov

ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Silvicultură și Exploatări Forestiere

Ing. Andrei POPA

# **Adaptarea și reziliența ecosistemelor forestiere de molid din nordul Carpaților Orientali în contextul schimbărilor climatice**

REZUMAT

Conducător științific

CS I. dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA

Membru corespondent al Academiei Române

BRAȘOV, 2024

# Teză de doctorat

**Adaptation and resilience of Norway spruce forest ecosystems in the northern part of Eastern Carpathians in the context of climate change**

**Adaptarea și reziliența ecosistemelor forestiere de molid din nordul Carpaților Orientali în contextul schimbărilor climatice**

**Domeniul de doctorat: Silvicultură**

## Comisia de susținere:

Prof. Dr. Ing. Alexandru Lucian CURTU	Președinte, Universitatea Transilvania din Brașov
CS I Dr. Ing. Nicolae Ovidiu BADEA	Conducător științific, Universitatea Transilvania din Brașov
Conf. Dr. Ing. Petru Tudor STĂNCIOIU	Referent oficial, Universitatea Transilvania din Brașov
Prof. Dr. Ing. Cătălin Constantin ROIBU	Referent oficial, Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava
CS I Dr. Ing. Cristian Gheorghe SIDOR	Referent oficial, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură "Marin Drăcea"

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 23.09.2024, ora 11, sala S.I.2 corp S, la Facultatea de Silvicultură și Exploatare Forestiere din Brașov.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa [andrei-i.popa@unitbv.ro](mailto:andrei-i.popa@unitbv.ro)

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim.

*"In a forest of a hundred thousand trees, no two leaves are alike, and no two journeys are alike. Find your own path."*

Shirley Bassey

## CUPRINS

PREFAȚĂ.....	5
LISTĂ DE ABREVIERI.....	7
1. INTRODUCERE .....	9
2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR.....	13
3. OUTLINE OF THE RESEARCH (SCHIȚA LUCRĂRII DE DOCTORAT).....	14
4. DINAMICA CREȘTERILOR MOLIDULUI ÎN CARPAȚII ORIENTALI ÎN FUNCȚIE DE ALTITUDINE ȘI VÂRSTĂ.....	17
4.1 Introducere .....	17
4.2 Material și metode .....	19
4.2.1 Zona de studiu.....	19
4.2.2 Datele de creștere .....	20
4.2.3 Semnale de avertizare timpurie.....	20
4.3 Rezultate.....	21
4.3.1 Tendințe pe termen lung privind creșterea molidului .....	21
4.3.2 Schimbări în variabilitatea și sincronia creșterilor .....	23
4.4 Discuții.....	24
4.4.1 Declinul creșterilor molidului în Carpații Orientali .....	24
4.4.2 Arboretele tinere sunt mai vulnerabile la schimbările climatice .....	25
4.4.3 Tendințe constante în alte semnale de avertizare timpurie .....	25
4.5 Concluzii .....	26
5. COMPONENTELE REZILIENȚEI MOLIDULUI ÎN ANII SECETOȘI DE-A LUNGUL GRADIENTILOR DE VÂRSTĂ ȘI ALTITUDINALI.....	27
5.1 Introducere .....	27
5.2 Material și metode .....	28
5.2.1 Datele climatice și selecția anilor secetoși .....	28
5.2.2 Componentele rezilienței și analizele statistice .....	28
5.3 Rezultate.....	30
5.3.1 Reziliența de-a lungul gradientilor altitudinali și de vârstă.....	30
5.3.2 Efectele disponibilității apei asupra rezilienței molidului.....	30

5.3.3	Linia de reziliență integrală.....	31
5.4	Discuții.....	32
5.4.1	Molidul de la altitudini joase are cea mai redusă rezistență.....	32
5.4.2	Arbori bătrâni au nevoie de un timp mai îndelungat pentru a se recupera.....	34
5.4.3	Reziliența molidului determinată în principal de intensitatea secetei .....	35
5.4.4	Concluzii și perspective de viitor.....	36
6.	RELAȚIA DINTRE FACTORII CLIMATICI ȘI PROCESELE DE CREȘTERE RADIALĂ ALE MOLIDULUI ȘI NON-STAȚIONARITATEA ACESTORA ÎN ULTIMUL SECOL .....	37
6.1	Introducere .....	37
6.2	Material și metode .....	38
6.2.1	Baza de date climatice și de creștere radială.....	38
6.2.2	Analizele statistice .....	39
6.3	Rezultate.....	40
6.3.1	Schimbarea sensibilității climatice în baza metodei statice.....	40
6.3.2	Schimbări temporale ale sensibilității la factorii climatici în baza metodei dinamice .....	41
6.3.3	Tendențe spațiale în schimbările temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS).....	41
6.4	Discuții.....	44
6.4.1	Tendența continuă de încălzire a schimbat răspunsul molidului la temperatură la altitudini înalte .....	44
6.4.2	Efecte variabile ale schimbărilor climatice asupra sensibilității molidului la disponibilitatea apei .....	45
6.4.3	Altitudinea și continentalitatea influențează schimbările temporale a sensibilității la factorii climatici (TSCS) în Carpații Orientali.....	45
6.5	Concluzii .....	46
7.	NON-LINEARITATE ÎN RĂSPUNSUL MOLIDULUI LA FACTORII CLIMATICI.....	47
7.1	Introducere .....	47
7.2	Material și metode .....	48
7.2.1	Date climatice.....	48
7.2.2	Analiza statistică.....	48

7.3 Rezultate.....	49
7.3.1 Non-linearitate în creșterea arborilor și relațiile cu factorii climatici .....	49
7.4 Discuții.....	50
7.4.1 Răspunsul non-linear al molidului la factorii climatici este specific unor sezoane .....	50
7.5 Concluzii .....	53
8. CUANTIFICAREA RELAȚIILOR DIN FACTORII CLIMATICI ȘI PROCESELE DE CREȘTERE RADIALĂ CU AJUTORUL DIFERIȚILOR PARAMETRII AI INELELOR ANUALE .....	54
8.1 Introducere .....	54
8.2 Material și metode .....	55
8.2.1 Zona de studiu.....	55
8.2.2 Colectarea probelor de creștere și procesarea datelor .....	55
8.2.3 Setul de date climatice .....	56
8.2.4 Cuantificarea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere radială	56
8.3 Rezultate și discuții.....	56
8.3.1 Relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere pentru trei parametri ai inelelor anuale .....	56
8.4 Concluzii .....	59
9. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DISEMINAREA REZULTATELOR .....	61
9.1 Concluzii .....	61
9.2 Contribuții originale.....	65
9.3 Diseminarea rezultatelor .....	66
BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ .....	68

## PREFAȚĂ

Această teză de doctorat este rezultatul cercetărilor mele desfășurate în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea”, Stațiunea de Cercetare-Dezvoltare și Experimentare-Producție Câmpulung Moldovenesc. În această teză, am analizat modelele de creștere anuală ale molidului în pădurile gestionate din Carpații Orientali, de-a lungul gradientelor de altitudine și vârstă, pentru a înțelege mai bine care sunt condițiile de creștere a acestei specii la limita sud-estică a distribuției sale naturale și cum a fost afectată de schimbările climatice. Această cercetare nu ar fi fost posibilă fără ajutorul, sprijinul și încurajările unui număr mare de persoane. În cele ce urmează, aș dori să le mulțumesc și să îmi exprim recunoștința.

În primul rând, aș dori să-i mulțumesc domnului CS I, Dr. Ing. Nicolae Ovidiu Badea, membru corespondent al Academiei Române, pentru oportunitatea de a desfășura această cercetare sub îndrumarea sa, pentru susținerea activităților desfășurate, pentru feedback-ul său critic și constructiv, pentru ajutorul acordat în dezvoltarea abilităților necesare unui cercetător și pentru obținerea fondurilor necesare pentru proiecte, stagii de cercetare și oportunități de diseminare a rezultatelor.

Aș dori să-i mulțumesc domnului Prof. Dr. Ing. Alexandru Lucian Curtu de la Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Silvicultură și Exploatare Forestiere, pentru că a acceptat să fie președintele comisiei de suținere publică a tezei de doctorat.

În același timp, doresc să îmi exprim aprecierea față de domnul Conf. Dr. Ing. Petru Tudor Stăncioiu de la Universitatea Transilvania din Brașov, domnul Prof. Dr. Ing. Cătălin Constantin Roibu de la Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava și domnul CS I Dr. Ing. Cristian Gheorghe Sidor de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură „Marin Drăcea” pentru analiza tezei în calitate de referenți oficiali în comisia de susținere publică a tezei de doctorat.

Aprecieri și recunoștință specială sunt adresate domnului CS I Dr. Ing. Ioan Seceleanu, domnului Prof. Dr. Ing. Iosif Vorovenci, domnului Prof. Dr. Ing. Mihai Daniel Niță și domnului Conf. Dr. Ing. Gheorghe Marian Tudoran, în calitate de membri în comisia de îndrumare, pentru sugestiile și sfaturile oferite în timpul studiilor doctorale, care m-au ajutat să îmbunătățesc această cercetare.

Printre cele mai importante persoane care au ghidat îndeaproape cercetarea desfășurată în această teză de doctorat se numără tatăl meu, CS I Dr. Ing. Ionel Popa, cel care mi-a arătat și primii pași în cercetarea dendrocronologică. În ultimii ani, domnul Dr. Ing. Ionel Popa a fost mai mult decât un lider de proiect sau de echipă; a devenit un mentor, un exemplu de rigurozitate științifică și dedicație. Aș dori să-i mulțumesc pentru sprijinul acordat, pentru încurajările din cele mai dificile momente și pentru ajutorul oferit în analizele statistice sau pentru revizuirea manuscriselor; fără contribuția sa, această lucrare nu ar fi fost în această formă.

Aș dori să-i mulțumesc domnului Prof. Dr. Ing. Cătălin-Constantin Roibu, profesorul meu de dendrocronologie din timpul studiilor de masterat și coordonatorul tezei mele de master, care a reprezentat punctul de plecare al acestei cercetări complexe. Sugestiile și recomandările sale m-au ajutat să îmbunătățesc această lucrare.

Doresc să-i mulțumesc domnului Prof. Dr. Ing. Michal Bosela de la Universitatea Tehnică din Zvolen, care a fost gazda primului meu stagiu de cercetare în străinătate în timpul doctoratului. Săptămâna petrecută în laboratorul său în primăvara anului 2022 m-a ajutat să îmi îmbunătățesc abilitățile în modelarea non-linearității în relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere și nu numai.

Aș dori să exprim mulțumiri speciale doamnei Prof. Dr. Ing. Marieke van der Maaten-Theunissen și domnului Prof. Dr. Ing. Ernst van der Maaten pentru sprijinul și ajutorul oferit în evaluarea rezilienței și a semnalelor de avertizare timpurie ale declinului molidului. Colaborarea noastră a început cu un stagiu de cercetare de două săptămâni în laboratorul lor de la Universitatea Tehnică din Dresden în toamna anului 2022 și a continuat de atunci. Discuțiile fructuoase cu ei m-au ajutat să îmi îmbunătățesc abilitățile de scriere și evaluarea critică a articolelor științifice, abilități care sunt esențiale pentru cercetători. Ei sunt un exemplu de dedicație pentru știință și reprezintă modele pentru viitorul meu parcurs în cercetarea științifică în deomeniul silviculturii.

În același timp, aș dori să exprim mulțumiri speciale domnului Dr. Ing. Jernej Jevšenak și domnului Prof. Dr. Ing. Allan Buras de la Universitatea Tehnică din München. Ei m-au găzduit pentru un stagiu de cercetare de două săptămâni în laboratorul de Land Surface-Atmosphere Interactions, în toamna anului 2023. Această colaborare m-a ajutat să îmi îmbunătățesc abilitățile în analiza statistică, proiectarea unui studiu metodologic și evaluarea critică a muncii mele. Am început să colaborez cu domnul Dr. Jernej Jevšenak încă de la începutul doctoratului; sfaturile și recomandările sale m-au ajutat în multe situații. Vreau să îi mulțumesc pentru toate contribuțiile și încurajările continue, dar cel mai important, pentru că a fost un exemplu de tânăr cercetător dedicat și pentru că mi-a devenit un bun prieten.

Domnul Ing. Mihai Balabașciuc a avut o contribuție importantă la această cercetare. M-a ajutat în teren cu colectarea probelor și în laborator cu pregătirea și măsurarea acestora. Împreună, am colectat carote de creștere de la peste 3000 de arbori, ceea ce a reprezentat un efort uriaș. De asemenea, aș dori să mulțumesc celorlalți colegi de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură "Marin Drăcea" pentru ajutorul pe teren sau pentru sugestiile critice aduse acestei lucrări.

Aș dori să mulțumesc proiectului RESCARPATHFOR (finanțat de Ministerul Cercetării, Dezvoltării și Digitalizării, România) pentru sprijinul financiar. Toate cercetările desfășurate în această teză fac parte din proiectul RESCARPATHFOR (PN-III-P4PCE-2021-1002): "Adaptare și reziliență la schimbări climatice în pădurile din Carpați. Abordare interspecifică și la diferite nivele temporale". În același timp, aș dori să mulțumesc proiectului CresPerInst (contract 34PFE/30.12.2021) pentru sprijinul financiar în oportunitățile de diseminare pe parcursul doctoratului.

Sunt recunoscător și apreciez sprijinul primit din partea familiei și prietenilor mei. Aș dori să îi mulțumesc mamei și surorii mele pentru încurajare și sprijin moral și pentru că au crezut în mine de-a lungul anilor.

Nu în ultimul rând, aș dori să îi mulțumesc soției mele, Magdalena, pentru dragostea și sprijinul ei. În timpul doctoratului, au fost multe momente când eram descurajat sau îmi puneam la îndoială abilitățile, dar ea a crezut în mine și m-a susținut continuu. Mai mult decât atât, au fost momente când m-a ajutat cu munca pe teren sau la birou. Discuțiile nesfârșite despre muncă sau despre progresul meu au fost de mare ajutor în atingerea acestui obiectiv. Împreună, am făcut față cu brio acestei provocări și am finalizat doctoratul.

*Andrei Popa,*

*Brașov, Iulie 2024*



## LISTĂ DE ABREVIERI

$\hat{a}_c$  – sincronia creșterilor;

adj  $r^2$  – varianță explicată ajustată;

AGR – rata de creștere medie;

ANCOVA – analiza covarianței;

ANOVA – analiza varianței;

AR1 – autocorelația de ordinul 1;

BAI – creșterea în suprafața de bază;

BI – reflectanța în albastru pe baza imaginilor scanate – intensitatea în albastru;

Cond.  $R^2$  – coeficient de determinare pentru efectele fixe și random;

CRU – Unitatea de Cercetare Climatică;

CSD – încetinirea critică;

CWB – bilanțul mediu de apă;

$CWB_{după}$  – bilanțul mediu de apă din doi ani după anul secetos;

$CWB_{înainte}$  – bilanțul mediu de apă din doi ani înainte de anul secetos;

DBH – diametrul trunchiului la înălțimea pieptului;

DOY – ziua din an;

E-OBS – baza de date climatice tip grid cu rezoluție zilnică;

EPS – semnalul populației;

EWS – semnale de avertizare timpurie;

GAMM – model aditiv generalizat mixt;

GAMs – model aditiv generalizat;

GDP – produs intern brut;

Gini – coeficient Gini al inelelor anuale;

ICC – coeficient de corelație intra-clasă;

ICP Forests – Programul internațional de cooperare pentru evaluarea și monitorizarea efectelor poluării aerului asupra pădurilor;

IPCC – Comisia interguvernamentală pentru schimbările climatice;

LMMs – modele lineare cu efecte mixte;

LULUCF – utilizarea terenurilor, schimbarea utilizării terenurilor și silvicultură;

MAP – media precipitațiilor anuale;

Marg.  $R^2$  – coeficientul de determinare pentru efectele fixe;

MAT – temperatura medie anuală;

$MSR_{OOB}$  – media valorilor reziduale pătrate pentru principiul out-of-bag în analiza Random Forest;

MXD – densitatea maximă a lemnului târziu;

OOB – principiul out-of-bag;

PC1 – prima componentă principală;

PC2 – a doua componentă principală;

PCGA – analiza gradientului componentelor principale;

PET – evapotranspirația potențială;

r – coeficient de corelație;

$R^2$  – coeficient de determinare;

rbar – corelația între serii;

RFA – analiza Random Forest;

RWI – cronologia indicilor reziduali ai inelelor anuale;

SD – abaterea standard;

SPEI – Indicele Standardizat al precipitațiilor-Evapotranspirației;

TRI – serie de indici ai inelelor anuale;

TRW – lățimea inelului anual;

TSCS – schimbare temporală a sensibilității la factori climatici;

VI – importanța variabilelor;

VIF – factor de inflație al varianței;

$\sigma^2$  – varianța valorilor reziduale;

%IncMSE – creșterea erorii medii pătratice;

%VarExp – procentul de varianță explicat de modelul Random Forest;

## 1. INTRODUCERE

Schimbările climatice globale reprezintă o provocare importantă a secolului XXI și necesită o atenție imediată din partea societății umane. Atenuarea efectelor adverse ale schimbărilor climatice, atingerea neutralității carbonului și conservarea biodiversității sunt priorități cheie pe agenda publică și politică la nivel european și global. Principalele efecte ale schimbărilor climatice sunt legate de creșterea frecvenței evenimentelor climatice extreme. De exemplu, studii recente au evidențiat faptul potrivit căruia la nivel european a avut loc o creștere semnificativă a intensității și frecvenței secetei în ultimele decenii (Ionita și Nagavciuc, 2021). Principalul factor declanșator al acestor evenimente climatice extreme este încălzirea globală. S-a raportat o creștere cu 1,8°C a temperaturii medii globale la sfârșitul anului 2023 comparativ cu perioada preindustrială (Programul Națiunilor Unite pentru Mediu, 2023). Pe lângă aceste evenimente de secetă tot mai intense și mai frecvente, alte evenimente extreme (ex., valuri de căldură, furtuni, inundații) vor continua să aibă un impact semnificativ asupra societății și mediului din Europa.

În acest context, pădurile sunt printre cele mai vulnerabile ecosisteme. Numeroase studii au evidențiat o creștere a mortalității arborilor indusă de secetă la scară globală (Allen et al., 2015). La nivel european, evenimentele de secetă recente (2018) au avut un efect negativ semnificativ asupra creșterii pădurilor, ratele mortalității depășindu-le pe cele determinate de secetele anterioare (Schuldt et al., 2020). Pe lângă mortalitatea datorată evenimentelor climatice extreme (secetă, valuri de căldură), schimbările condițiilor climatice (creșterea temperaturii medii anuale sau reducerea precipitațiilor anuale) interferează cu procesele fiziologice ale arborilor și capacitatea acestora de a stoca carbon, și astfel se reduce abilitatea lor de a furniza servicii ecosistemice. Declinul pădurilor la scară largă a condus la o creștere a atenției acordate mecanismelor declanșatoare ale acestor evenimente. Înțelegerea tendințelor pe termen lung în ceea ce privește creșterea pădurilor și a răspunsurilor la evenimente extreme sau la climat în general reprezintă un punct de plecare pentru prognoza stării viitoare a ecosistemelor forestiere și, prin urmare, reprezintă o bază științifică pentru gestionarea durabilă a pădurilor în contextul schimbărilor climatice.

Deși pădurile sunt predispuse să fie semnificativ afectate în contextul scenariilor climatice extreme, acestea reprezintă și un instrument cheie pentru atenuarea efectelor negative ale schimbărilor climatice, evenimentelor extreme, pierderea biodiversității sau degradarea terenurilor. La nivel european, pădurile sechestrează 10% din emisiile brute de gaze cu efect de seră (FOREST EUROPE, 2020). Mai mult de atât, Strategia Uniunii Europene privind Adaptarea la Schimbările Climatice (2021), bazată pe Pactul Verde European, impune ca țările europene să atingă neutralitatea climatică până în 2050. Mai exact, obiectivul Uniunii Europene este de a sechestra aproximativ 310 milioane de tone de CO<sub>2</sub> în rezervoare naturale, așa cum se prevede în Regulamentul LULUCF revizuit (Land-Use, Land-Use Change, and Forestry). Pentru a atinge aceste obiective, trebuie implementate practici durabile de gestionare a pădurilor, în concordanță cu provocările climatice actuale. Silvicultura inteligentă din punct de vedere climatic, un concept recent, subliniază necesitatea implementării „unui management

forestier adaptativ, durabil, pentru a proteja și îmbunătăți potențialul pădurii de a se adapta la schimbările climatice și de a le atenua (*sustainable adaptive forest management and governance to protect and enhance the potential of forest to adapt to, and mitigate climate change*)' (Bowditch et al., 2020). Aceste măsuri adaptative de practică forestieră necesită cunoștințe actualizate și relevante la nivel regional privind starea reală a pădurilor și modul în care speciile de arbori reacționează la noile condiții de mediu. Informațiile din trecut privind adaptabilitatea speciilor de arbori, condițiile de creștere și reziliența lor nu mai sunt actuale în contextul schimbărilor rapide ale condițiilor de mediu (Kijowska-Oberc et al., 2020).

În Europa, pădurile acoperă până la 32% din suprafața terestră (Hanewinkel et al., 2013). Mai mult, sectorul forestier contribuie cu aproximativ 0,7% la PIB-ul Europei (European Environment Agency, 2024). Una dintre cele mai importante specii comerciale de conifere este molidul (*Picea abies*(L.) Karst.) (Caudullo et al., 2016). Această specie este foarte populară în domeniul forestier datorită cantității mari de lemn utilizat pentru construcții, cherestea, hârtie și mobilă. Capacitatea molidului de a crește rapid și de a produce lemn de calitate în diverse condiții de mediu îl face una dintre cele mai răspândite specii de arbori din pădurile gestionate. În Europa, molidul a fost cultivat pe scară largă atât în interiorul, cât și în afara arealului său natural, în arborete mono-specifice echiene.

În ceea ce privește prezența naturală a speciei, molidul poate vegeta de la nivelul mării până la limita superioară a pădurii la 2400 m altitudine (Caudullo et al., 2016). În Europa, Carpații reprezintă cea mai sudică parte a distribuției naturale a acestei specii de conifere (Caudullo et al., 2017). Molidul se găsește în Carpați în proporții variate, de la peste 80% în Carpații Occidentali, la mai puțin de 70% în Carpații Orientali și până la aproximativ 30% în Carpații Meridionali (Kholiavchuk et al., 2023). În România, molidul este cea mai comună specie de conifere, reprezentând 19,49% din totalul suprafeței pădurilor și 23,78% din volumul total de lemn pe picior, conform Inventarului Forestier Național, ciclul doi (<https://roifn.ro/site/rezultate-ifn-2/>).

În ultimele decenii, molidul s-a confruntat cu evenimente de declin la scară largă în Europa Centrală (T. Hlásny et al., 2021; Netherer et al., 2019). Aceste evenimente fără precedent au fost cauzate în principal de stresul indus de secetă, care a afectat capacitatea arborilor de a rezista atacurilor de gândaci de scoarță (Netherer et al., 2015). Zonele întinse de păduri de molid afectate în ultimul deceniu reprezintă pierderi economice și ecologice substanțiale. În plus, cantitatea mare de lemn recoltat într-un timp scurt a dus la un dezechilibru pe piața economică. Conform scenariilor climatice actuale, se preconizează că zone vaste din Europa vor fi afectate de atacurile gândacilor de scoarță în viitorul apropiat (Hlásny et al., 2021). Cu toate acestea, în prezent, declinul molidului în Europa de Est a fost raportat la o scară mai redusă comparativ cu cea din zonele centrale ale Europei (Synek et al., 2020). Având în vedere acest aspect, există o nevoie urgentă de informații actualizate privind starea pădurilor de molid din Europa de Est pentru a înțelege pe deplin și a putea prognoza viitorul pădurilor bazate pe molid din Carpați.

Sezonalitatea condițiilor climatice induce o variabilitate în modele de creștere ale arborilor (Fritts, 1976). În același timp, alți factori, cum ar fi evenimentele perturbatoare, intervențiile de management

forestier și potențialul genetic, pot contribui la variabilitatea creșterilor arborilor. Creșterea radială a arborilor (creștere secundară) este înregistrată cu rezoluție anuală în inelele anuale. Informațiile derivate din inelele anuale de creștere au fost deja utilizate la scară globală pentru a evidenția consecințele încălzirii globale asupra ecosistemelor forestiere, inclusiv evenimentele de mortalitate (Cailleret et al., 2019), modificările dinamicii carbonului și apei (Babst et al., 2019) și reacțiile la variabilitatea climatică din trecut (Esper et al., 2016). Deși la nivel european sau global s-au înregistrat realizări semnificative în evaluarea modelelor de creștere sau a rezilienței pădurilor pe baza inelelor de creștere, studiile demonstrează importanța condițiilor locale/regionale și a impactului definitiv pe care acestea le au asupra răspunsului arborilor la factorii climatici (Lebourgeois et al., 2014). Prin urmare, studiile efectuate la nivel regional sunt capabile să evidențieze particularități importante ale rezilienței și adaptabilității arborilor la schimbările climatice.

Studii privind influența factorilor climatici asupra creșterii molidului au fost realizate în majoritatea zonelor montane din Europa, de la sudul Europei (Begović et al., 2020) până la Alpi (Schuster și Oberhuber, 2013), Europa Centrală (Bošel'a et al., 2014) și Europa de Est (Schurman et al., 2019; Sidor et al., 2015). Majoritatea studiilor au concluzionat că la altitudini joase, creșterea molidului este limitată în principal de disponibilitatea apei, în timp ce la altitudini înalte, factorii limitativi principali sunt temperaturile și lungimea sezonului de vegetație. În contextul schimbărilor climatice, factorii limitativi ai creșterii arborilor sunt susceptibili să se schimbe, iar relațiile dintre procesele de creștere și factorii climatici nu sunt stabile în timp (Wilmking et al., 2020). Fenomenul de non-staționalitate a fost deja raportat la nivel global (Jevšenak et al., 2024). Prin urmare, cunoștințele din trecut despre factorii limitativi care restricționează creșterea molidului nu mai sunt actuale. Astfel, pentru a putea implementa o gestionare adaptativă, inteligentă din punct de vedere climatic și durabilă a pădurilor, sunt necesare informații actualizate.

În Carpați, studiile dendrocronologice sistematice se desfășoară de peste două decenii (Popa, 2004). Datorită faptului că molidul este una dintre principalele specii de conifere din regiune au fost analizate modelele de creștere și răspunsul la factorii climatici al acestei specii (Schurman et al., 2019; Sidor et al., 2015). Totuși, majoritatea studiilor recente au fost efectuate în păduri virgine (Schurman et al., 2019). Pe baza acestui fapt, a fost identificat un gol de cunoștințe legat de condițiile de creștere ale molidului în pădurile supuse managementului activ. La nivelul Carpaților, majoritatea pădurilor sunt supuse managementului forestier activ, iar în contextul schimbărilor climatice, aceste păduri sunt cele mai vulnerabile. Prin metodologia complexă și inovatoare aplicată în această teză de doctorat, s-au obținut informații valoroase care pot fi utilizate în diferite cadre conceptuale pentru a facilita dezvoltarea și implementarea practicilor de management forestier durabil.

Cercetările s-au desfășurat într-o rețea dendrocronologică nou implementată, formată din 158 de suprafețe de cercetare amplasate în arborete pure de molid, cu vârste diferite, distribuite de-a lungul unui gradient altitudinal (de la 475 m până la limita superioară a pădurii la 1675 m) în Carpații Orientali. În total, au fost analizate 3032 de carote de creștere. În baza obiectivelor specifice avute în vedere, s-au utilizat valorile brute ale lățimii inelelor anuale, indici standardizați sau serii de creștere în suprafața

de bază. Pentru analiza statistică, s-au folosit abordări clasice (corelația Pearson sau Spearman), dar și metode noi bazate pe tehnici de învățare automată (de exemplu, analiza Random Forest), modele cu efecte mixte liniare (LMM) sau modele aditive generalizate (GAM). Mai mult de atât, în cadrul tezei a fost dezvoltată o metodologie nouă pentru a analiza non-staționaritatea relațiilor dintre procesele de creștere radială și factorii climatici pe baza regresiei liniare a coeficienților de corelație.

## **2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR**

Această teză de doctorat prezintă o evaluare cuprinzătoare a dinamicii creșterii molidului (*Picea abies* (L.) H. Karst.) în Carpații Orientali (România) folosind inelele anuale de creștere radială ale arborilor din păduri supuse managementului forestier activ, distribuite de-a lungul unor gradienti altitudinali și de vârstă. Scopul cercetărilor este actualizarea cunoștințelor privind reziliența și adaptabilitatea ecosistemelor gestionate de molid la schimbările climatice, drept suport științific pentru o silvicultură inteligentă din punct de vedere climatic.

Obiectivele generale și specifice ale cercetărilor din această teză de doctorat sunt:

### **OG1. Cuantificarea dinamicii creșterii radiale la molid în ultimul secol, cu accent specific pe:**

OS1.1 Tendințe pe termen lung privind creșterea în suprafața de bază (BAI);

OS1.2 Schimbări în sensibilitatea și sincronia creșterilor;

OS1.3 Semnale de avertizare timpurie (EWS) a declinului molidului;

### **OG2. Evaluarea componentelor rezilienței în anii secetoși, cu accent specific pe:**

OS2.1 Variabilitatea componentelor rezilienței de-a lungul gradientilor altitudinali;

OS2.2 Influența vârstei arborilor asupra răspunsului molidului la secetă;

OS2.3 Impactul disponibilității apei înainte, în timpul și după secetă asupra rezilienței;

### **OG3. Relațiile dintre procesele de creștere radială a molidului și factorii climatici, cu accent specific pe:**

OS3.1 Schimbări temporale în sensibilitatea la factorii climatici a molidului;

OS3.2 Non-liniaritate în răspunsul molidului la factorii climatici;

OS3.3 Semnale climatice cuantificate prin diferiți parametri ai inelelor anuale (TRW, BAI și BI).

### 3. STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Această teză de doctorat este structurată în cinci capitole în format tipic pentru articolele de cercetare (capitolele 4-8). Trei capitole (capitolele 4, 7 și 8) au fost publicate în reviste indexate WOS (ISI), iar două (capitolele 5 și 6) sunt în evaluare. Informații referitoare la datele publicării, reviste și coautori sunt prezentate la începutul fiecărui capitol.

În capitolul 4, dinamica creșterilor molidului a fost evaluată pe baza unei rețele dendrocronologice formată din 157 de suprafețe experimentale (peste 3000 de arbori) amplasate în arborete pure de molid de diferite vârste, distribuite de-a lungul transectelor altitudinale din Carpații Orientali, România. Pentru a analiza tendințele pe termen lung ale ratelor de creștere a fost folosită creșterea în suprafața de bază (BAI) la nivel de suprafață de cercetare. În plus, a fost aplicat conceptul privind semnalele de avertizare timpurie (EWS) pentru evaluarea declinului datorat stresului indus de schimbările climatice. Aceste semnale au fost definite astfel: (1) reducerea creșterilor, (2) creșterea variabilității BAI (evaluată prin autocorelația de ordinul întâi și abaterea standard) și (3) intensificarea sincroniei creșterilor în suprafața de bază. S-a observat o reducere a creșterilor în suprafața de bază în ultimele două decenii, fiind mai accentuată la altitudini joase și în arborete tinere. Totuși, variabilitatea și sincronia creșterilor nu au prezentat tipare constante, sugerând că declinul pădurii nu este iminent. Per ansamblu, rezultatele noastre evidențiază totuși o vulnerabilitate crescută a molidului în Carpații Orientali. Odată cu schimbările climatice, declinul molidului se poate produce și în această parte a Europei.

Conținutul acestui capitol a fost publicat în revista *Science of The Total Environment* (Andrei Popa, Ernst van der Maaten, Ionel Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, 2024a, *Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the Eastern Carpathians*, *Science of The Total Environment*, Volumul 912, 169167, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169167>, Q1; IF=8,2). Obiectivul general 1 (OG.1) și obiectivele sale specifice (OS1.1 - 1.3) au fost pe deplin realizate.

În capitolul 5 a fost realizată o analiză a rezilienței molidului în contextul creșterii intensității și frecvenței secetelor din ultimele decenii și a declinului la scară largă a acestuia din Europa Centrală. S-au analizat diferențele dintre componentele rezilienței (rezistență, recuperare, reziliență și perioadă de recuperare) de-a lungul gradientului altitudinal și de vârstă. Conceptul „liniei de reziliență integrale” a fost utilizat pentru o interpretare integrată a componentelor rezilienței. Influența disponibilității apei înainte, în timpul și după secetă asupra rezilienței molidului a fost evaluată folosind modele cu efecte liniare mixte. Rezultatele au arătat că molidul de la altitudini joase (<800 m) a înregistrat cea mai mică rezistență la secetă, însă aceasta a fost asociată cu o rată mare de recuperare, în timp ce rezistența crescută la altitudini mari (>1400 m) a fost asociată cu o rată scăzută de recuperare. În ceea ce privește vârsta arborilor, s-a demonstrat că arborii mai bătrâni înregistrează cea mai lungă perioadă pentru a se recupera după secetă. Severitatea secetei are cel mai mare impact asupra rezilienței molidului. Per ansamblu, rezultatele obținute oferă cunoștințe actuale despre capacitatea uneia dintre cele mai importante specii de conifere din Europa de a face față secetei – informații care ar putea fi integrate în managementul forestier durabil al acestei specii vulnerabile.



Conținutul acestui capitol a fost prezentat în lucrarea Andrei Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Ernst van der Maaten, *Spruce suffers most from drought at low elevations in the Carpathians, though shows high resilience*, (*Forest Ecology and Management*, Q1, IF=3.7, în curs de evaluare). Obiectivul general 2 (OG. 2) și obiectivele sale specifice (SO2.1 -2.3) au fost pe deplin atinse.

În capitolul 6, a fost evaluat răspunsul molidului la factorii climatici în contextul schimbărilor climatice. În cea mai mare parte a Europei, schimbările climatice au cauzat o modificare majoră a condițiilor de creștere a molidului și, implicit, în răspunsul acestuia la factorii climatici. Analizarea schimbărilor temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS) poate evidenția gradul în care molidul va fi vulnerabil la schimbările de mediu în deceniile următoare. TSCS a fost definit matematic ca parametrul pantei regresiei sensibilității molidului la factorii climatici (coeficientul de corelație) în timp. Având în vedere variabilitatea sensibilității la factorii climatici de la altitudini joase la altitudini înalte, s-a realizat analiza variabilității TSCS de-a lungul gradientelor altitudinali și spațiali. Rezultatele obținute indică că în Carpații Orientali au fost observate multiple schimbări temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS) pentru molid. La altitudini mari (>1100 m), s-a constatat că legătura corelativă pozitivă între temperaturile de vară și creșterea molidului a scăzut semnificativ pe parcursul perioadei analizate. În schimb, creșterea arborilor de la aceste altitudini prezintă o corelație pozitivă cu temperaturile de la sfârșitul iernii. La altitudini joase (<800 m), corelația pozitivă cu Indicele Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirației (SPEI) din vară a devenit mai frecventă, în timp ce intensitatea corelației pozitive între SPEI din iarnă și procesele de creștere radială a scăzut. În același timp, rezultatele au arătat că TSCS a fost determinat de gradientul climatic altitudinal și gradientul de continentalitate longitudinal. În general, concluziile indică faptul că molidul este din ce în ce mai limitat de disponibilitatea apei la altitudini joase. Astfel, se evidențiază un potențial risc al declinului acestei specii în Carpații Orientali, pe fondul intensificării secetelor.

Conținutul acestui capitol a fost prezentat în Andrei Popa, Jernej Jevšenak, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Allan Buras, *In pursuit of change: Divergent temporal shifts in climate sensitivity of Norway spruce along an elevational and continentality gradient in the Carpathians*, (*Agricultural and Forest Meteorology*, Q1, IF=5.6, în curs de evaluare). În acest capitol obiectivul specific 3.1 (OS3.1) a fost pe deplin realizat.

În capitolul 7, a fost analizată non-linearitatea în răspunsul molidului la factorii climatici. Dinamica creșterii arborilor și acumularea biomasei sunt determinate în principal de factorii de mediu, competiția interspecifică și perturbări. De obicei, relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere sunt evaluate prin corelație liniară datorită simplității modelului matematic. Cu toate acestea, aplicarea acestei metode poate distorsiona rezultatele, deoarece răspunsurile ecologice și fiziologice ale arborilor la factorii de mediu sunt nelineare, de obicei în formă de clopot. În acest capitol s-a realizat o evaluare neliniară a relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere folosind tehnici de învățare automată. Rezultatele au arătat că non-linearitatea în răspunsul molidului la factorii climatici era specifică unor sezoane: temperaturile din toamna precedentă și sezonul de vegetație actual, respectiv

disponibilitatea apei din timpul iernii. În plus, s-a constatat că la altitudini joase, creșterea molidului a fost puternic limitată de disponibilitatea apei, în timp ce temperaturile din iarnă au o influență redusă de-a lungul întregului gradient altitudinal. Mai mult, la altitudini joase, arborii tineri au fost mai sensibili la secetă comparativ cu arborii bătrâni. În general, rezultatele obținute au adus o nouă perspectivă asupra răspunsului molidului la factorii climatici în Carpați, ceea ce poate ajuta în deciziile de management.

Conținutul prezentat în acest capitol a fost publicat în revista *Environmental Research* (Andrei Popa, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Michal Bosela, 2024b, *Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians*, *Environmental Research*, 119073, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119073>, Q1; IF=7,7). În acest capitol obiectivul specific 3.2 (OS3.2) a fost pe deplin realizat.

În capitolul 8, au fost evaluate relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială pe baza diferiților parametri ai inelelor anuale. Parametrii inelelor anuale oferă cunoștințe valoroase despre modul în care arborii răspund și se adaptează la schimbările de mediu. Arborii înregistrează toate schimbările de mediu în diferiți parametri ai inelelor anuale. Acest studiu a analizat modul în care temperatura aerului este înregistrată în diferiți parametri ai inelelor anuale ale molidului de-a lungul unui gradient altitudinal într-o depresiune intramontană din Carpații Orientali. Relația dintre factorii climatici și procesele de creștere radială a fost analizată pentru două altitudini contrastante: altitudine joasă, sub 1000 m, și altitudine ridicată, peste 1500 m. Datele climatice cu rezoluție zilnică au fost furnizate de două stații meteorologice locale, una în depresiune și cealaltă în partea superioară a versantului (Joseni, 750 m și Bucin, 1282 m). Pentru fiecare serie a fost calculată corelația Pearson între datele climatice cumulate (temperatură) și trei parametri ai inelelor anuale (lățimea inelului anual – TRW, creșterea în suprafața de bază – BAI și intensitatea în albastru – BI). Rezultatele au evidențiat că altitudinea modulează tiparul de răspuns în cazul BI, în timp ce pentru TRW și BAI a fost observat un model similar de-a lungul gradientului de altitudine. Influența pozitivă a temperaturilor de iarnă asupra creșterii molidului a fost observată în cazul parametrilor TRW și BAI. În plus, în cazul creșterilor în suprafața de bază (BAI) a fost evidențiată o relație pozitivă cu temperatura de vară. Cel mai ridicat coeficient de corelație ( $r = 0.551$ ,  $p < 0.05$ ,  $n = 41$ ) a fost înregistrat între cronologia reziduală BI din seria de la altitudine înaltă și temperaturile de vară/toamnă de la stația meteorologică Bucin pentru o perioadă cumulativă de 59 de zile (a doua jumătate a lunii august până la începutul lunii octombrie). Rezultatele arată că, în această depresiune intramontană din Carpații Orientali, diferiți parametri ai inelelor anuale cuantifică diferite semnale climatice.

Conținutul prezentat în acest capitol a fost publicat în revista *Plants* (Andrei Popa, Ionel Popa, Cătălin-Constantin Roibu, Ovidiu Nicolae Badea, 2022, *Do Different Tree-Ring Proxies Contain Different Temperature Signals? A Case Study of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the Eastern Carpathians*, *Plants* 11, 18: 2428. <https://doi.org/10.3390/plants11182428>, Q1; IF = 4.5). În cadrul capitolului 8 obiectivul specific 3.3 (OS3.3) a fost pe deplin realizat.

## 4. DINAMICA CREȘTERILOR MOLIDULUI ÎN CARPAȚII ORIENTALI ÎN FUNCȚIE DE ALTITUDINE ȘI VÂRSTĂ

Andrei Popa, Ernst van der Maaten, Ionel Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, 2024a, *Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the Eastern Carpathians*, Science of The Total Environment, Volume 912, 169167, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169167>, Q1; IF=8,2

### 4.1 Introducere

Schimbările climatice afectează ecosistemele forestiere din întreaga lume, în special prin creșterea temperaturilor, precum și prin creșterea frecvenței și intensității secetei. Încălzirea globală, cuplată cu secete severe în perioada de vegetație, determină condiții de stres pentru ecosistemele forestiere. Impactul variază de la reducerea furnizării serviciilor ecosistemice, cum ar fi sechestrarea carbonului (Kolus et al., 2019), până la mortalitatea arborilor (Camarero et al., 2015). Tendința constantă de încălzire din ultimele decenii a dus la intensificarea pierderilor de apă din cauza intensificării transpirației și respirației și, în final, la mortalitatea arborilor atunci când este cuplată cu perioadele de secetă. Declinul pădurilor la scară largă a determinat o atenție sporită a cercetătorilor asupra mecanismelor fiziologice ale arborilor pentru a face față secetei și efectelor acesteia asupra capacității de supraviețuire a acestora. Prin urmare, înțelegerea modului în care speciile de arbori sunt afectate de schimbările climatice este importantă pentru gestionarea durabilă a pădurilor și creșterea capacității de a atenua schimbările de mediu.

Declinul și uscarea pădurilor reprezintă un fenomen complex care rezultă dintr-un cumul de factori care contribuie la diferite nivele temporale și spațiale (McDowell et al., 2008), făcându-le dificil de prognozat. Mortalitatea arborilor reprezintă unul dintre principalii factori care contribuie la dinamica pădurilor. Evenimentele extreme de scurtă durată (ex. furtuni, incendii) cauzează perturbări rapide, cu efecte vizibile la nivelul ecosistemului (Seidl et al., 2011). O condiție de mediu extremă pe termen lung (de exemplu, valuri de căldură, secetă) induce mai întâi schimbări la nivel fiziologic (ex. conductanță hidraulică, transpirație, fotosinteză) înainte să apară declinul și mortalitatea (McDowell et al., 2013). Semnalele de avertizare timpurie (EWS), așa cum au fost propuse de Scheffer et al. (2009), caracterizează sistemele aflate în diferite stadii de tranziție critică. Reducerea capacității de reziliență a unui sistem, după o perturbare, poate fi asociată cu încetinirea critică a sistemului (CSD) (Dakos et al., 2012). Acest proces de CSD a fost identificat în populații cu un nivel ridicat de stres, înainte de extincția acestora. Reducerea proceselor de acumulare a biomasei în ecosistemele forestiere poate fi asociată cu o condiție de CSD (Cailleret et al., 2019). De obicei, CSD-ul creșterii arborilor este asociat cu o creștere a autocorelației și a variabilității parametrilor inelului anual, precum și cu o scădere a sincronizării acestora cu mediul exterior (Cailleret et al., 2019).

Sincronia creșterilor poate fi utilizată ca un semnal de avertizare timpurie pentru a prognoza condițiile stresante din ecosistemele forestiere (Shestakova et al., 2018). Drept rezultat al schimbărilor în regimul de temperatură și umiditate, s-a raportat că sincronia creșterii arborilor devine mai mare pe distanțe lungi (Shestakova et al., 2016). Sincronia spațială în creșterea radială și identificarea factorilor determinanți exogeni reprezintă un element cheie în prognoza efectelor schimbărilor climatice asupra ecosistemelor forestiere și, în același timp, poate servi drept un important EWS (Shestakova et al., 2018).

Molidul (*Picea abies* (L.) Karst.) este specia principală de conifere în Europa, care crește rapid și are o tradiție îndelungată în silvicultura europeană (Klimo et al., 2000). Specia acoperă o arie vastă de-a lungul unui interval altitudinal de la nivelul mării până la 2400 m altitudine (Caudullo et al., 2016). Acesta are o valoare economică substanțială datorită capacității sale de a produce lemn de înaltă calitate în condiții de mediu moderate. În contextul actual al schimbărilor climatice, în special creșterea severității și frecvenței secetelor, molidul este probabil să fie în pericol. Molidul este cunoscut ca o specie sensibilă la secetă (Lévesque et al., 2013; van der Maaten-Theunissen et al., 2013; Vitali et al., 2017). Evenimentele severe de secetă în momente critice în timpul perioadei de vegetație contribuie la reducerea rezilienței molidului și a capacității sale de a rezista atacurilor gândacilor de scoarță (Netherer et al., 2015; Ryan et al., 2015).

În ultimii ani, evenimentele extreme de căldură și secetă din Europa Centrală au fost factori declanșatori pentru uscarea pe scară largă a pădurilor de molid (Hlásny et al., 2021; Netherer et al., 2019). În părțile estice ale Europei, nu s-a înregistrat până acum un declin extensiv al molidului (Synek et al., 2020). Principalul risc pentru molid în această zonă sunt furtunile, care pot provoca daune coroanei, ruperea tulpinii și deștrădăcinarea, în timp ce, la o scară mai mică, atacurile gândacilor de scoarță reprezintă agenți perturbatori importanți (Synek et al., 2020). Având în vedere situația molidului în Europa Centrală, este necesară evaluarea stării viitoare a speciei în Europa de Est. Prin urmare, acest studiu evaluează semnalele de avertizare timpurie ale declinului molidului utilizând o rețea de suprafețe de cercetare dendrocronologice cuprinzând peste 3000 de arbori din 157 de arborete de productivitate moderată până la ridicată. Arboretele analizate sunt de vârste diferite și sunt distribuite de-a lungul unui gradient altitudinal în Carpații Orientali, situându-se în aria naturală de distribuție a molidului. Studiul își propune să evidențieze schimbările în tendințele de creștere, variabilitatea și sincronia creșterilor în suprafața de bază în contextul schimbărilor climatice.

Ipotezele de cercetare au fost: (i) molidul la altitudini joase prezintă o tendință descrescătoare în creșterea în suprafața de bază, în timp ce la altitudini intermediare și înalte, se înregistrează o tendință crescătoare, (ii) arboretele bătrâne sunt caracterizate de un declin al creșterii mai pronunțat comparativ cu arboretele tinere și (iii) pentru toate arboretele, sincronia creșterii în suprafața de bază a crescut în ultimele decenii.

## 4. 2 Material și metode

### 4.2.1 Zona de studiu

În Carpații Orientali din România se află cele mai întinse păduri de molid din Europa de Est (Ilichim, 1990). Zona de studiu este situată de-a lungul unui gradient latitudinal ( $46^{\circ}36'23''$  N până la  $47^{\circ}53'56''$  N și  $24^{\circ}55'24''$  E până la  $26^{\circ}00'46''$  E) și altitudinal (de la 475 m până la limita pădurii până la 1675 m; Fig. 4.1) în arealul natural al molidului. Pentru a cuantifica dinamica creșterilor molidului, au fost prelevate carote de creștere din 157 de arborete echiene aflate sub management silvic activ. Majoritatea arboretelor sunt constituite exclusiv din molid, un număr relativ redus fiind dominate de molid în proporție de cel puțin 80%, respectiv 20% amestec de alte specii, iar vârsta medie variind de la 40 la 180 de ani. În amestec, molidul era în principal însoțit de fag (*Fagus sylvatica* L.) și brad (*Abies alba* Mill.) la altitudini joase și intermediare, și de scoruș (*Sorbus aucuparia* L.) și mesteacăn (*Betula pendula* L.) la altitudini înalte. Temperatura medie anuală variază de la  $6,8^{\circ}\text{C}$  la altitudini joase până la  $3,2^{\circ}\text{C}$  la altitudini înalte, în timp ce precipitațiile anuale variază de la 620 mm la 870 mm.

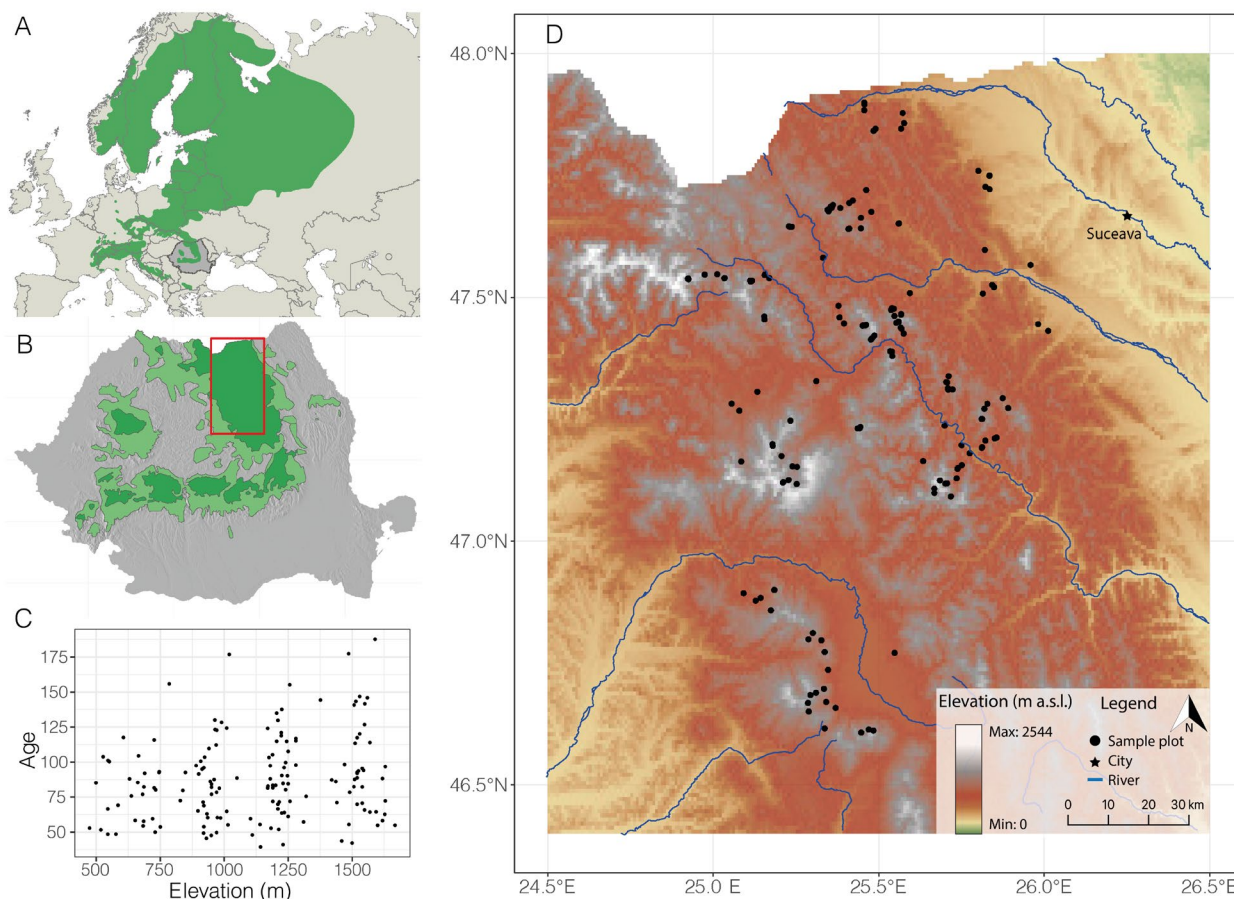


Figura 4.1 Distribuția molidului în A. Europa (culoare verde închis) (Caudullo et al., 2017) și B. România (distribuție naturală – verde închis, distribuție în afara arealului natural – verde deschis, zona de studiu – caseta roșie) (Stănescu et al., 1997); C. Vârsta medie și altitudinea arboretelor incluse în studiu; D. Localizarea suprafețelor de cercetare în Carpații Orientali (cercuri negre).

#### 4.2.2 Datele de creștere

În anii 2021 și 2022, cel puțin 20 de arbori dominanți fără defecte vizibile au fost selectați în fiecare suprafață de cercetare. Arborii preexistenți au fost excluși. Pentru fiecare arbore, s-a colectat câte o carotă de creștere la înălțimea de 1,3 m cu ajutorul burghiului Pressler. Diametrul trunchiului a fost măsurat folosind ruleta forestieră. Carotele au fost pregătite urmând procedurile dendrocronologice standard (Speer, 2010) și scanate cu un scanner Epson Expression 12000 XL la o rezoluție optică de 2400 dpi. Măsurarea lățimii inelelor anuale s-a efectuat pe imagini scanate în programul informatic Coorecorder/CDendro (Versiunea 9.6, Cybis Elektronik & Data AB, Suedia). Acestea au fost inter-datate vizual și statistic (Grissino-Mayer, 2001). În cazul carotelor fără măduvă, vârsta arborilor a fost estimată în raport cu numărul probabil de inele lipsă stabilit cu ajutorul unui localizator geometric al măduvei.

În timpul proceselor de validare, un arbore a fost exclus din analizele ulterioare dacă vârsta acestuia diferă cu mai mult de 30 de ani față de vârsta medie a arboretului. Baza de date finală conține 3012 carotele validate. Din cauza faptului că în timpul colectării probelor de creștere în 2021 creșterea radială nu era încă finalizată, acest an a fost exclus din analiză pentru 11% dintre suprafețele de cercetare.

Tendențele de creștere au fost cuantificate utilizând creșterea în suprafața de bază (BAI). BAI a fost calculat pentru fiecare an pe baza lățimii anuale a inelelor (TRW) și a DBH. Seriile individuale de creștere în suprafața de bază au fost standardizate printr-un proces de standardizare dublă utilizând mai întâi, o ecuație Hughschhoff, și apoi o funcție de tip spline de 30 de ani cu o frecvență de 50%. Prin standardizare sunt eliminate influențele induse de dimensiunea trunchiului, precum și a intervențiilor silviculturale, competiției sau a perturbărilor (Cook și Kairiukstis, 1990; Thurm et al., 2016). Pentru fiecare suprafață de cercetare, au fost calculate cronologiile medii ale BAI și indicii BAI folosind media robustă ponderată pentru a reduce influența valorilor extreme (Cook și Kairiukstis, 1990).

Pentru a analiza posibilele diferențe în modelele de creștere în raport cu altitudinea, suprafețele de cercetare au fost grupate în patru clase altitudinale: <800 m (30 de sondaje și 549 de arbori), 800-1100 m (40 de sondaje și 782 de arbori), 1100-1400 m (45 de sondaje și 884 de arbori) și >1400 m (42 de sondaje și 797 de arbori). S-a calculat creșterea în suprafața de bază medie pentru fiecare clasă de altitudine. Creșterea în suprafața de bază a fost modelată cu un Model Generalizat Additiv Mixt (GAMM), în care BAI mediu la nivel de suprafață de cercetare a fost calculat în funcție de an, iar suprafața de cercetare a fost definită ca efect random.

#### 4.2.3 Semnale de avertizare timpurie

În acest studiu, au fost utilizate trei semnale de avertizare timpurie, utilizate pentru a cuantifica stresul indus de schimbările climatice: (i) tendințe negative în BAI, (ii) creșterea variabilității creșterii arborilor (evaluată prin autocorelația de ordinul întâi și abaterea standard), și (iii) intensificarea sincroniei creșterilor în suprafața de bază (Cailleret et al., 2019; Camarero et al., 2015; Shestakova et al., 2018). Începutul trendului continuu de încălzire a avut loc în anii 1980. Prin urmare pentru a cuantifica posibilele efecte ale încălzirii recente, EWS au fost analizate pentru trei perioade, respectiv o perioadă pre-încălzire, o perioadă timpurie de încălzire și o perioadă târzie de încălzire (1962-1981, 1982-2001

și 2002–2021). În perioada timpurie și în cea târzie de încălzire, au fost analizate toate suprafețele de cercetare, în timp ce în perioada pre-încălzire, au fost incluse în analiză doar arboretele bătrâne, ale căror cronologii sunt suficient de lungi.

În acest studiu, tendințele de creștere au fost evaluate cu ajutorul cronologiilor brute ale creșterilor în suprafața de bază. Semnificația tendinței pentru fiecare suprafață de cercetare și perioadă a fost testată folosind testul de tendință Mann-Kendall. Valorile Tau  $<0$  indică o tendință negativă și  $>0$  o tendință pozitivă. Schimbarea în variabilitatea creșterii a fost cuantificată cu ajutorul a doi parametri statistici: autocorelația de ordinul întâi (AR1) și abaterea standard (SD). AR1 și SD au fost calculate la nivel de arbore, iar în baza valorilor individuale s-a calculat media la nivel de suprafață de cercetare. Pentru fiecare perioadă, a fost calculat un model liniar și au fost utilizate valorile lui  $R^2$  și  $p$  pentru a evalua modelul ajustat. Pentru a compara diferențele între perioade, s-a aplicat analiza covarianței (ANCOVA). ANCOVA este o metodă statistică care permite testarea diferențelor în pante și termenii liberi ale modelelor de regresie liniară prin examinarea efectului unei variabile categorice asupra unei variabile dependente, în timp ce se controlează impactul unei covariabile continue. Valorile EWS (Tau, AR1 și SD) au fost utilizate ca variabile dependente, în timp ce perioada (pre-încălzire, încălzire timpurie, încălzire târzie) a fost utilizată drept variabilă categorică, iar vârsta medie a sondajului a fost definită drept covariabilă continuă. Pentru a aplica ANCOVA, s-a verificat distribuția normală a valorilor reziduale a regresiei folosind testul Shapiro–Wilk, în timp ce omogenitatea varianțelor a fost verificată cu testul Levene. O valoare nesemnificativă a testului Shapiro-Wilk și a testului Levene confirmă ipoteza generală a modelului ANCOVA. În cazul în care modelul ANCOVA a indicat diferențe semnificative între cele trei perioade considerate, a fost utilizat testul Tukey-Kramer HSD drept test post-hoc.

Pentru a evalua sincronia creșterilor în suprafața de bază, au fost utilizate două metode diferite. În primul rând, au fost calculate corelațiile Pearson între cronologiile medii ale indicilor BAI pentru toate suprafețele de cercetare (cross-correlation) din cadrul fiecărei clase altitudinale. A doua metodă constă în aplicarea un model de varianță-covarianță pe cronologiile indicilor BAI. A fost utilizată varianta homoscedastică a modelului complet definit de Shestakova et al. (2014), având clasa altitudinală drept variabilă de grupare. Sincronia creșterilor în suprafața de bază a fost evaluată în cadrul claselor altitudinale pentru toate perioadele.

Toate analizele statistice au fost realizate în R (R Core Team, 2023), utilizând pachetele "dplR" (Bunn, 2008), "mgcv" (Wood și Wood, 2015), "trend" (Pohlert et al., 2016), și "DendroSync" (Alday et al., 2018).

## 4.3 Rezultate

### 4.3.1 Tendințe pe termen lung privind creșterea molidului

Arborii de la altitudini mai joase prezintă rate mai mari de creștere (Fig. 4.2). În același timp, BAI la altitudini sub 800 m prezintă mai multe fluctuații în ultimul secol în comparație cu cele de la altitudini mai înalte. Creșterea în suprafața de bază are un trend crescător până în 2002 pentru toate clasele

altitudinale (Fig. 4.2). În 2003, s-a înregistrat o reducere majoră a BAI la toate altitudinile, invers proporțională cu altitudinea, respectiv cea mai mare reducere s-a observat la altitudini joase. Anul 2003 a fost unul dintre cei mai secetoși ani din zona de studiu, cu SPEI12 sub -2. Chiar dacă a fost observată o recuperare a creșterilor în suprafața de bază după 2003 la altitudini joase, anul 2023 poate fi considerat punctul de start al declinului creșterilor la molid în zona de studiu.

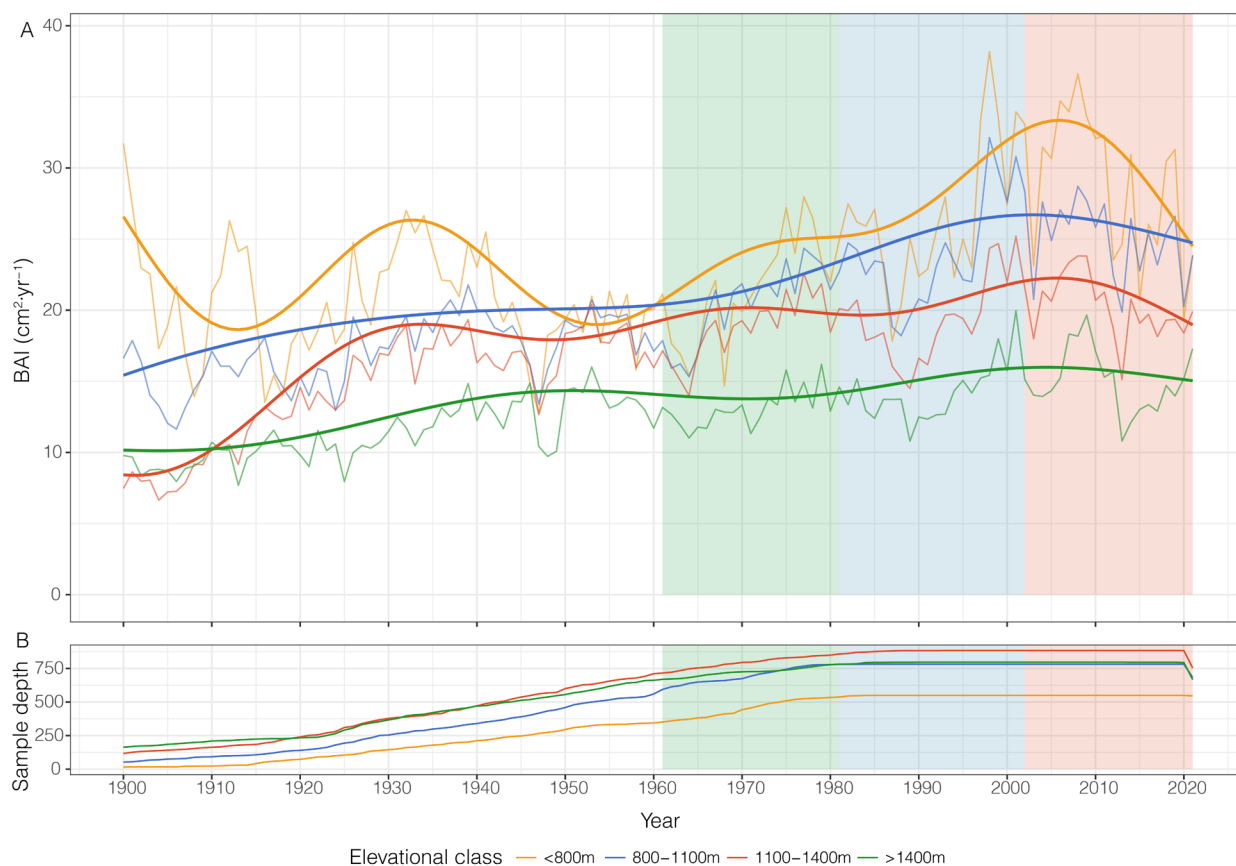


Figura 4.2 A. Dinamica creșterilor în suprafața de bază și linii de tendință calculate folosind modelul GAMM pentru cele patru clase altitudinale; B. Numărul de arbori inclus în analize. Zonele hașurate în verde, albastru și roșu reprezintă perioadele de studiu pre-încălzire: 1962-1981, încălzire timpurie: 1982-2001 și încălzire târzie: 2002-2021.

Se poate observa o schimbare recentă de la tendințe pozitive la tendințe negative ale creșterilor în suprafața de bază pentru toate altitudinile (Figura 4.3). Modelele ANCOVA au evidențiat diferențe semnificative între perioade. O diferență semnificativă ( $p < 0,01$ ), indusă de covariabila continuă (vârsta medie a arboretului), a fost observată doar la altitudini <800 m. Declinul recent al creșterii în suprafața de bază este deosebit de pronunțat la arborii mai tineri, cu excepția suprafețelor de cercetare de la altitudini >1400 m, unde nu s-a observat o variabilitate în raport cu vârsta arborilor (Figura 4.3). Astfel, tendințele legate de vârstă au fost semnificative doar la altitudini mai joase. Cea mai mare schimbare în valorile tau între perioadele analizate s-a înregistrat pentru arboretele mai tinere până la cele de vârstă mijlocie. La altitudini joase (<800 m), teste post-hoc au indicat diferențe semnificative în valorile tau între toate cele trei perioade, în timp ce la toate celelalte altitudini între valorile tau s-au observat diferențe semnificative doar în perioadele pre-încălzire și încălzire timpurie. Aceste tendințe negative



ale BAI în ultimele două decenii reprezintă un semnal clar de avertizare timpurie (EWS) al declinului molidului.

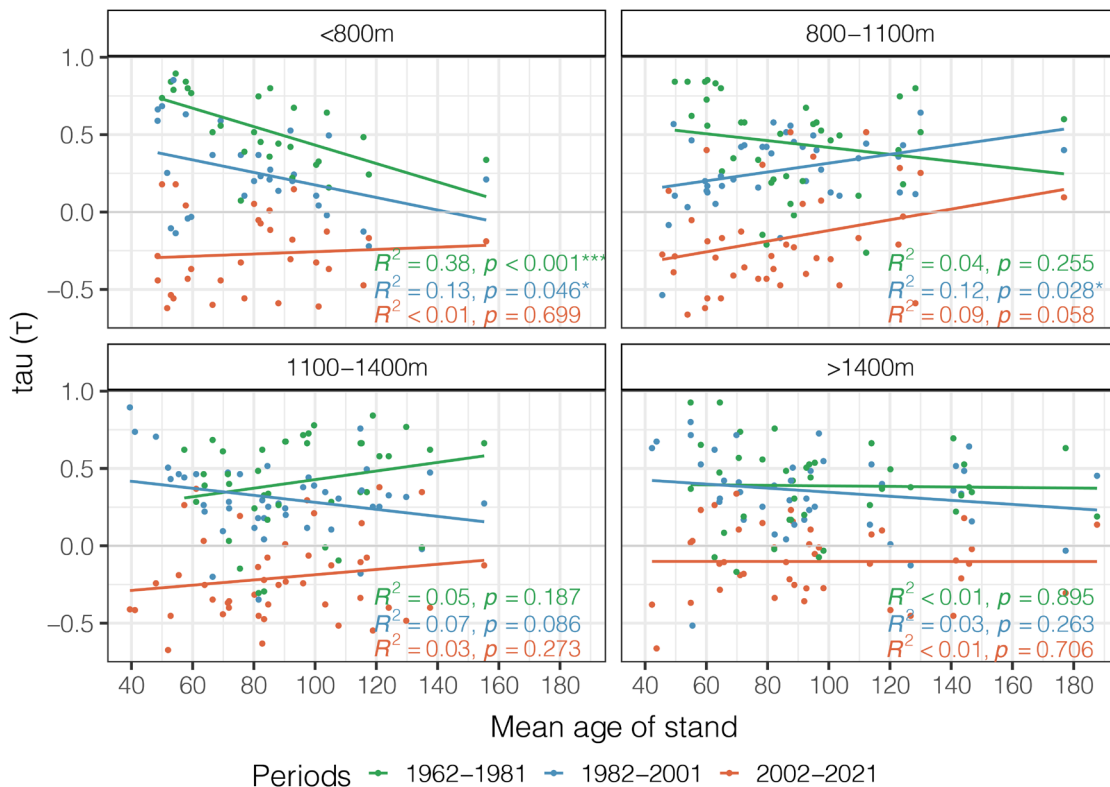


Figura 4.3. Coeficienții tau Mann-Kendall pentru toate suprafețele de cercetare în cele trei perioade investigate (pre-încălzire: 1962-1981 cu verde, încălzire timpurie: 1982-2001 cu albastru, și încălzire târzie: 2002-2021 cu roșu), în raport cu vârsta medie a arboretului. Valorile negative ale lui tau indică declinul creșterilor în suprafața de bază.

#### 4.3.2 Schimbări în variabilitatea și sincronia creșterilor

Analiza ANCOVA a arătat că există diferențe semnificative ( $p < 0,001$ ) în ceea ce privește autocorelația de ordinul 1 între cele trei perioade considerate. AR1 a scăzut în perioada de încălzire târzie pentru majoritatea suprafețelor sub 1400 m față de perioadele pre-încălzire sau încălzire timpurie, indicând o reducere a influenței condițiilor anului precedent asupra creșterii din anul curent. La altitudini mai înalte, AR1 a crescut în ultimii 20 de ani în comparație cu cele două perioade considerate anterior. Toate diferențele între perioada de încălzire târzie și perioada pre- sau încălzire timpurie au fost semnificative din punct de vedere statistic. Cu toate că, conform analizei ANCOVA, covariabila continuă (vârsta medie a arboretului) nu a avut o influență semnificativă asupra modelului, s-a observat că AR1 este mai ridicată pentru arboretele bătrâne în comparație cu cele mai tinere în perioadele pre-încălzire și încălzire timpurie la altitudinii între 800-1100 m. O situație opusă a fost observată pentru arboretele tinere în perioada de încălzire târzie în toate suprafețele de cercetare, cu excepția celor din banda de altitudine 800-1100 m.

Variabilitatea creșterii, cuantificată prin abaterea standard (SD) a BAI, a crescut în timp. Rezultatele analizei ANCOVA au arătat diferențe semnificative ( $p < 0,05$ ) între perioade, dar doar între perioada pre-

încălzire și încălzirea târzie în unele clase altitudinale. Abaterea standard a BAI este mai mare pentru arboretele bătrâne comparativ cu cele mai tinere în toate perioadele, cu excepția arboretelor tinere la altitudini joase în perioada de încălzire târzie. În plus, poate fi observată o relație inversă între abaterea standard a BAI și altitudine, respectiv variabilitatea scade odată cu creșterea altitudinii. Mai precis, la altitudini joase, variabilitatea este mai mare în comparație cu cele mai înalte.

Sincronia creșterilor ( $\hat{\alpha}_c$ ) între suprafețele de cercetare de la altitudini <800 m este cea mai mare în toate perioadele (Figura 4.4). Modelul de varianță-covarianță arată o creștere a sincroniei creșterilor în suprafața de bază de la perioada pre-încălzire la perioadele de încălzire. Pentru altitudini >1400 m, s-a observat o intensificare a sincroniei creșterilor, în timp ce pentru altitudini mai joase s-a înregistrat o scădere în perioada de încălzire târzie. Cea mai mare reducere este înregistrată între 800-1400 m (23%), ecart altitudinal considerat optim pentru molid în Europa de Est.

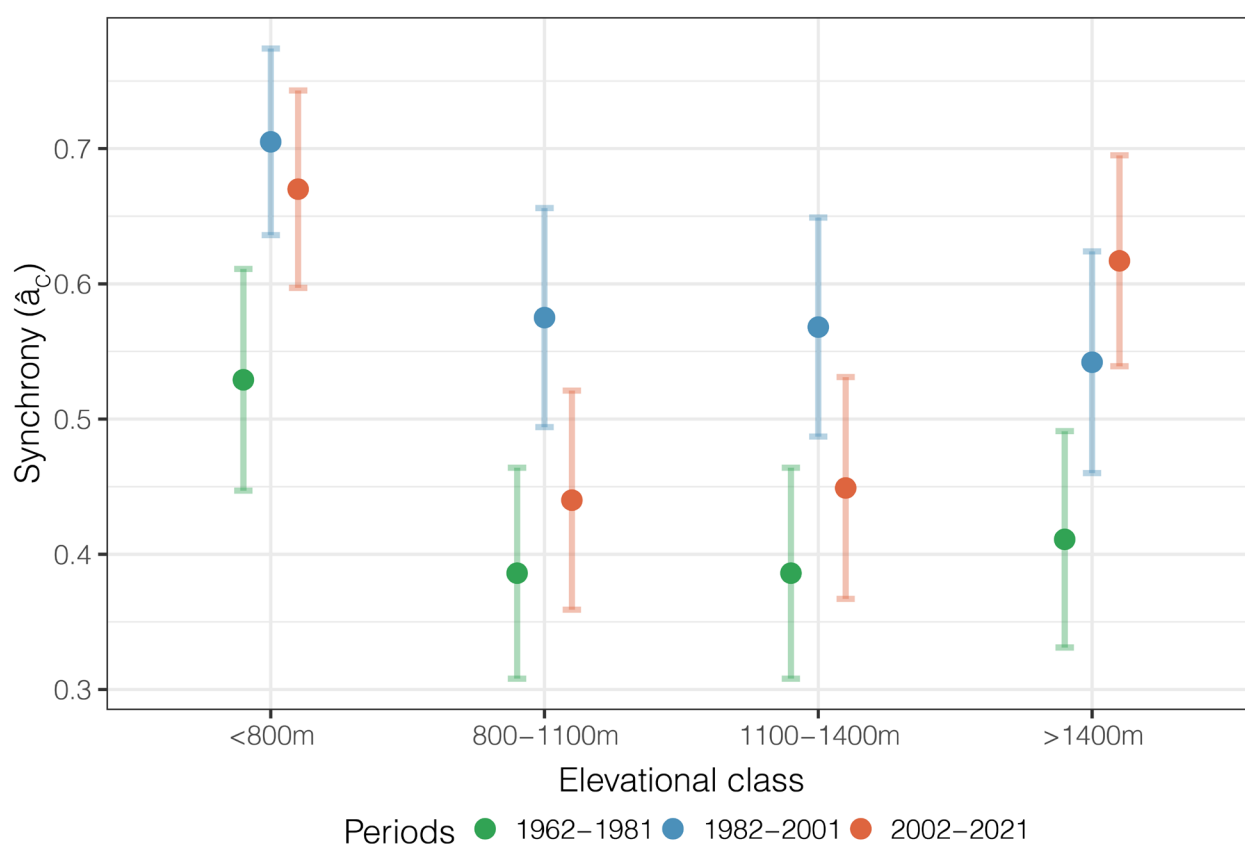


Figura 4.4 Sincronia creșterilor în suprafața de bază conform modelului varianță-covarianță pentru cele patru clase de altitudine în cele trei perioade investigate (pre-încălzire: 1962-1981 cu verde, încălzire timpurie: 1982-2001 cu albastru, și încălzire târzie: 2002-2021 cu roșu).

## 4.4 Discuții

### 4.4.1 Declinul creșterilor molidului în Carpații Orientali

În timp ce cercetările despre molidul din Carpați au raportat în principal tendințe de creștere pozitive (Schurman et al., 2019), studiul nostru este printre primele care evidențiază tendințe negative generalizate (Bosela et al., 2021). S-a observat o reducere a creșterii în suprafața de bază a molidului,

în special la altitudini joase, în ultimele două decenii, indicând declinul proceselor de creștere. Anul 2003 poate fi considerat punctul de pornire al declinului în Carpații Orientali. Hartl-Meier et al. (2014) au raportat că molidul în Alpii a înregistrat reduceri de creștere de peste 50% în 2003 (comparativ cu media de creștere a celor 5 ani anteriori) la altitudini <800 m, dar fără pierderi de creștere la altitudini >1400 m. Seceta din 2003 a fost menționată în mai multe studii ca fiind o secetă severă care a afectat grav pădurile de molid din Europa (Boden et al., 2014; Bosela et al., 2019; Vitali et al., 2017).

În ciuda faptului că până în prezent nu s-au observat fenomene extinse de mortalitate în pădurile de molid în partea de est a Europei (Synek et al., 2020), tendințele negative observate în creșterea în suprafața de bază a molidului sunt un semnal clar de avertizare timpurie că aceste păduri sunt în pericol; respectiv, tendințele negative în BAI sunt un indicator al mortalității arborilor.

#### 4.4.2 Arboretele tinere sunt mai vulnerabile la schimbările climatice

În timp ce studiile anterioare indica faptul că arborii mai mari (arborii mai bătrâni din arboretele gestionate) tind să fie mai sensibili la secetă din cauza constrângerilor de conductanță hidraulică, studiul nostru a evidențiat contrariul. Mai precis, arboretele tinere sau cu vârste până la 100 ani (adică arborii cu dimensiuni mai reduse) au o sensibilitate mai mare, înregistrând o scădere mai accentuată a creșterilor în suprafața de bază în comparație cu arboretele bătrâne în perioada de încălzire târzie, în special la altitudini între 800 și 1400 m. Acest lucru ar putea fi legat de faptul că arborii mai tineri au un sistem radicular mai redus și sunt mai dependenți de apa din orizonturile superioare. Temperaturile ridicate conduc la o evaporare mai mare în straturile superioare ale solului și astfel, induc un stres pentru arborii tineri. În mod opus, arborii mai în vârstă au un sistem de rădăcini mai dezvoltat, permițându-le să acceseze apa din orizonturile inferioare și pe o suprafață mai mare. La altitudini peste 1400 m, unde nu s-au observat diferențe în tendințele BAI între arboretele tinere și bătrâne în perioada de încălzire târzie, disponibilitatea apei este ridicată. Pe de altă parte, creșterea în suprafața de bază a arborilor este caracterizată în mod tipic de curbele BAI care prezintă o tendință continuă de creștere care se aplatizează odată cu înaintarea în vârstă. Acest model este influențat de strategiile de transport al apei, nutrienților și de consumurile metabolice ridicate asociate cu dimensiunea arborelui. Având în vedere dinamica de creștere în raport cu vârsta, este important de menționat că arborii tineri tind să prezinte o tendință pozitivă a BAI care se stabilizează treptat pe măsură ce îmbătrânesc. Acest lucru poate duce la o tranziție de la o tendință de creștere la o lipsă de tendință între perioadele analizate.

#### 4.4.3 Tendințe constante în alte semnale de avertizare timpurie

Evaluarea sănătății pădurilor poate fi o provocare (Trumbore et al., 2015). Cu toate acestea, starea ecosistemelor forestiere poate fi analizată prin cuantificarea sănătății și condițiilor principalilor contributory, în termeni de dimensiuni și biomasa și anume arborii. Studiile recente au evidențiat că majoritatea organismelor vii sau a sistemelor biologice prezintă semne premergătoare de stres critic în existența lor (Dakos et al., 2012; Scheffer et al., 2009). Studiile asupra arborilor aflați în declin sugerează că, împreună cu reducerea creșterilor, schimbările în AR1 și SD ale seriilor de creștere pot fi utilizate drept EWS (Cailleret et al., 2019; Camarero et al., 2015; Gazol et al., 2020). Camarero et al.

(2015) au raportat o creștere a AR1 și SD în cazul arborilor aflați în declin. Cu toate acestea, în rețeaua analizată, s-a constatat o scădere a AR1 la altitudini mai joase și intermediare și o creștere a abaterilor standard a BAI la toate altitudinile. Acest aspect poate indica faptul că pădurile de molid din Carpații Orientali nu sunt încă grav afectate, deși declinul a început (cf. Figura 4.3).

Faptul că SD este cea mai mare la altitudini joase poate indica că acești arbori sunt supuși unor condiții mai stresante comparativ cu cei de la alte altitudini. Valori ridicate ale sincroniei creșterilor în suprafața de bază la pădurile de molid de la altitudini <800 m întărește acest lucru (Figura 4.4; cf. Shestakova et al., 2016, 2014). Este foarte probabil ca disponibilitatea apei să limiteze creșterea la aceste altitudini (Sidor et al., 2015). De asemenea, în alte regiuni ale Europei s-au identificat relații semnificative din punct de vedere statistic între creșterea molidului și disponibilitatea apei (van der Maaten-Theunissen et al., 2013; Vitali et al., 2017; Vitasse et al., 2019).

Creșterea sincroniei în perioadele de încălzire timpurie și târzie în comparație cu perioada de pre-încălzire sugerează un stres crescut pentru molid în Carpații Orientali pe întregul gradient altitudinal. Un aspect important, la altitudini joase (<800 m), este scăderea sincroniei creșterilor ( $\hat{\alpha}_c$ ) în perioada de încălzire târzie, ceea ce poate sugera faptul conform căruia condițiile au fost atât de limitative pentru o perioadă lungă de timp încât arborii încep să prezinte tendințe independente de creștere (Buras et al., 2023). Același lucru poate fi valabil și pentru altitudinile cuprinse între 800 și 1400 m, unde o reducere a  $\hat{\alpha}_c$  în perioada târzie a fost chiar mai pronunțată. Cu toate acestea, având în vedere condițiile de creștere la aceste altitudini, optime pentru molid, este posibil ca rezultatele să prezinte și interacțiunea cu alți factori în afara climatului. Mai multe cercetări sunt necesare în acest sens, de exemplu, studii axate pe schimbările temporale în sensibilitatea la factorii climatici ai acestei specii.

#### **4.5 Concluzii**

În ansamblu, rezultatele noastre indică faptul că molidul din Carpații Orientali prezintă o scădere a creșterii în suprafața de bază începând din 2003, în special la altitudini joase. Tendințele negative în BAI în ultimele două decenii reprezintă semnale de avertizare timpurie clare din cauza stresului indus de schimbările climatice. Chiar dacă pădurile de molid din Carpații Orientali par să fie sănătoase și productive, rezultatele noastre indică o vulnerabilitate crescută a acestei specii. În mod surprinzător, rezultatele au arătat că arborii mai tineri sunt mai afectați de schimbările climatice. Rezultatele noastre reprezintă un punct de plecare pentru cercetări ulterioare în vederea înțelegerii depline a complexității efectelor schimbărilor climatice asupra pădurilor de molid în regiune.

## 5. COMPONENTELE REZILIENȚEI MOLIDULUI ÎN ANII SECETOȘI DE-A LUNGUL GRADIENTILOR DE VÂRSTĂ ȘI ALTITUDINALI

Andrei Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Ernst van der Maaten, *Spruce suffers most from drought at low elevations in the Carpathians, though shows high resilience*, Forest Ecology and Management, Q1, IF=3,7 (în curs de evaluare)

### 5.1 Introducere

Secetele sunt fenomene naturale caracterizate de o perioadă prelungită de disponibilitate scăzută a apei în sol, survenind din cauza nivelurilor reduse de precipitații asociate cu o evaporație atmosferică crescută (Lloyd-Hughes, 2014). Acestea pot afecta grav ecosistemele forestiere, diminuând capacitatea de a furniza servicii ecosistemice, cum ar fi reducerea productivității și implicit pot declanșa apariția proceselor de mortalitate în păduri.

În studiile ecologice, stabilitatea ecologică este un termen larg și adesea dezbătut (Van Meerbeek et al., 2021). În mod tipic, încetinirea proceselor este asociată cu semnale timpurii de avertizare care conduc la pierderea stabilității (Scheffer et al., 2009). În contextul schimbărilor climatice actuale, s-au realizat multiple cercetări pentru cuantificarea rezilienței arborilor la secetă (Lloret et al., 2011; Schwarz et al., 2020). Reziliența este definită drept capacitatea arborilor de a atinge ratele de creștere anterioare după un eveniment extrem de secetă (Lloret et al., 2011). Împreună cu acest indicator, rezistența și recuperarea sunt definite drept capacitatea de a menține nivelurile de creștere în timpul secetei, respectiv abilitatea de a restabili creșterea după evenimentul extrem (Lloret et al., 2011). Thurm et al. (2016) au introdus o nouă componentă a rezilienței în baza datelor derivate din analiza inelelor anuale, cunoscută sub denumirea de perioadă de recuperare, definită ca perioada în care arborii își pot restabili nivelurile de creștere la cele anterioare evenimentului extrem. Acest ultim indicator oferă informații valoroase despre răspunsul arborilor la secetă și efectul întârziat al evenimentului extrem. Mai mult de atât, o metodă recent dezvoltată de Schwarz et al. (2020), cunoscută sub denumirea de conceptul "liniei de reziliență integrale", oferă o abordare integrativă pentru interpretarea componentelor rezilienței arborilor, facilitând compararea între diferite specii de arbori sau categorii de arbori (de exemplu, clasele de altitudine sau vârstă). Orice deviație de la modelul teoretic, care presupune o recuperare completă după o reducere a creșterii, indică o problemă potențială în timpul secetelor extreme. În același timp, o rezistență scăzută la secetă a arborilor este asociată cu un risc crescut de mortalitate în viitor (DeSoto et al., 2020).

Majoritatea studiilor despre reziliența molidului la secetă s-au concentrat pe zona centrală sau nordică a distribuției speciei, unde predomină impactul negativ al schimbărilor climatice. În Europa de Est, nu au fost raportate încă evenimente de mortalitate în masă la scară largă (Synek et al., 2020). Cu toate acestea, Popa et al. (2024a) arată că în Carpații Orientali a început declinul molidului, în special la altitudini joase (<800 m). Pentru a îmbunătăți cunoștințele despre stabilitatea ecologică a acestor ecosisteme forestiere, acest studiu evaluează componentele de reziliență (rezistență, recuperare,

reziliență și perioada de recuperare) ale molidului folosind o rețea dendrocronologică extinsă în Carpații Orientali, formată din peste 3000 de arbori din 158 de arborete de diferite vârste distribuite pe gradienti altitudinali. Adresăm următoarele întrebări de cercetare:

(Q1) Cum diferă rezistența și reziliența la secetă în funcție de altitudine?

(Q2) Cum influențează vârsta arborilor răspunsurile creșterilor la secetă?

(Q3) Care este influența disponibilității de apă înainte, în timpul și după o secetă asupra rezilienței creșterilor?

## **5.2 Material și metode**

### **5.2.1 Datele climatice și selecția anilor secetoși**

S-au descărcat datele de temperatură maximă și minimă, precum și datele de precipitații la nivel zilnic pentru fiecare suprafață de cercetare pentru perioada 1950-2021 din baza de date Easyclimate folosind pachetul „easyclimate” din R (Cruz-Alonso et al., 2023). Datele climatice zilnice au fost agregate la nivel lunar prin calcularea mediei temperaturilor zilnice și suma precipitațiilor zilnice. În plus, evapotranspirația potențială (PET) a fost calculată conform metodei Hargreaves (Droogers și Allen, 2002), folosind datele climatice menționate anterior, latitudinea suprafeței de cercetare și radiația solară estimată. Drept indicator al disponibilității de apă, s-a calculat bilanțul climatic de apă ca diferență între precipitații și PET. Valorile PET au fost calculate utilizând pachetul „SPEI” în R (Beguería et al., 2017).

În selecția anilor secetoși și în analizele ulterioare, s-a utilizat bilanțul mediu de apă din perioada februarie-iulie (denumit CWB), în baza faptului că în zonele montane, creșterea radială a molidului are loc până la începutul/sfârșitul lunii iulie (Tremblay et al., 2015). Pentru identificarea celor mai secetoși ani, au fost selectați trei ani cu valorile cele mai scăzute a CWB la nivel de suprafață de cercetare. La nivel de ecart altitudinal și pentru întreaga rețea de studiu, a fost calculată proporția suprafețelor care au înregistrat secete în ultimele șapte decenii. Pentru analize ulterioare s-au selectat trei ani secetoși cel mai frecvent întâlniți la nivelul întregii rețele dendrocronologice.

### **5.2.2 Componentele rezilienței și analizele statistice**

Pentru a aborda întrebările de cercetare, s-au calculat componentele de reziliență, respectiv rezistența, recuperarea, reziliența (după Lloret et al., 2011) și perioada de recuperare (Schwarz et al., 2020; Thurm et al., 2016) pentru cei trei ani secetoși cu frecvența cea mai ridicată la nivelul întregii rețele. Toate componentele de reziliență au fost calculate pentru lățimea inelelor anuale de creștere radială la nivel de arbore, dar numai pentru suprafețele de cercetare care au înregistrat efectiv secetă în acei ani. Perioadele pre- și post-secetă au fost stabilite la doi ani, deoarece acest interval este cel mai probabil să cuantifice cel mai relevant condițiile anterioare și ulterioare secetei și să minimizeze influența altor evenimente perturbatoare (Vitali et al., 2017). Lungimea maximă a perioadei de recuperare a fost

limitată la 10 ani (Schwarz et al., 2020). Toate componentele de reziliență au fost calculate folosind pachetul R "pointRes" (van der Maaten-Theunissen et al., 2021, 2015).

S-a determinat semnificația diferențelor între componentele de reziliență de-a lungul gradientilor de altitudine (Q1) și vârstă (Q2) folosind testul Kruskal-Wallis și testul Wilcoxon drept test post-hoc. Testele au fost aplicate folosind pachetul "rstatix" în R (Kassambara, 2021).

Pentru fiecare dintre cei trei ani secetoși la nivelul claselor de altitudine și claselor de vârstă, s-a ajustat un model exponențial (Ecuația 5.1) numit „linia de rezistență actuală”:

$$\text{Recuperare} = b * \text{Rezistență}^z \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Punctul de intersecție dintre linia teoretică și linia ajustată reprezintă valoarea de rezistență pe care arborii trebuie să o aibă în timpul secetei pentru a se recupera complet. Pentru a evalua abaterea de la „linia de reziliență integrală” a „liniilor de reziliență actuale”, s-a utilizat analiza varianței ANOVA (Rutherford, 2011). Modelele ajustate pentru „linia de reziliență actuală” au fost calculate folosind pachetul "nls2" în R (Huet et al., 2004), iar intervalul de încredere a fost calculat folosind 2000 de repetiții bootstrap cu pachetul "boot" în R (Canty and Ripley, 2017).

Pentru a cuantifica influența disponibilității de apă asupra componentelor de reziliență (Q3), s-a utilizat balanța medie a apei, deoarece este un indicator mai bun al disponibilității de apă și permite comparabilitatea între suprafețele de cercetare, spre deosebire de SPEI, care este standardizat în raport cu suprafața de cercetare și perioada de analiză (Zang et al., 2020). S-a definit CWB înainte de secetă ca media CWB din doi ani anteriori anilor secetoși, și similar, CWB după secetă folosind doi ani după secetă.

Pentru a evalua cum disponibilitatea apei înainte, în timpul și după un eveniment extrem de secetă influențează componentele de reziliență ale molidului (Q3), s-au folosit modele liniare cu efecte mixte (LMMs). Pentru fiecare variabilă de răspuns (rezistența, recuperarea, reziliența și perioada de recuperare), s-au calculat mai multe modele LMM variind variabilele explicative (CWB înainte de secetă, CWB în timpul secetei și CWB după secetă). În cazul rezistenței, au fost luate în considerare doar influența CWB înainte și în timpul secetei. Suprafața de cercetare a fost utilizată drept efect random. Arborii care aveau o rezistență >1 sau o perioadă de recuperare >10 nu au fost incluși în modelul specific perioadei de recuperare. Variabilele de răspuns au fost transformate prin logaritmare înainte de analiză pentru a corecta heteroscedasticitatea, iar variabilele explicative au fost scalate prin scăderea valorilor medii și împărțirea la abaterea standard pentru a permite comparabilitatea efectelor variabilelor. Factorul de inflație a varianței (VIF) a fost calculat pentru a evalua corelația între variabilele explicative (O'Brien, 2007). Modelele LMM au fost calibrate folosind pachetul "lme4" în R (Bates et al., 2009), iar graficele coeficienților estimați au fost realizate folosind pachetul "sjPlot" în R (Lüdecke and Lüdecke, 2015). Toate analizele statistice au fost realizate în R (Team R, 2023).

## 5.3 Rezultate

### 5.3.1 Reziliența de-a lungul gradientelor altitudinali și de vârstă

În toți cei trei ani de secetă, rezistența molidului a crescut odată cu altitudinea (Fig. 5.1). S-au observat diferențe semnificative între clasele de altitudine (Fig. 5.1). Pierderea de creștere medie cea mai mare (26%) a fost înregistrată în 2012 la altitudini joase, urmată de o pierdere de creștere de 24,3% în 1987. Recuperarea a înregistrat valori mai mari la altitudini joase în toți anii de secetă, cu diferențe semnificative față de celelalte benzi altitudinale. Rezistența molidului la altitudini >1400 m este diferită semnificativ din punct de vedere statistic față de rezistența la alte altitudini. Pentru arborii care au suferit o reducere a creșterii, cea mai lungă perioadă de recuperare a fost de  $5,1 \pm 2,5$  ani la altitudini >1400 m în 2012, în timp ce cea mai rapidă recuperare a avut loc la altitudini <800 m în 2015 ( $1,7 \pm 1,2$  ani).

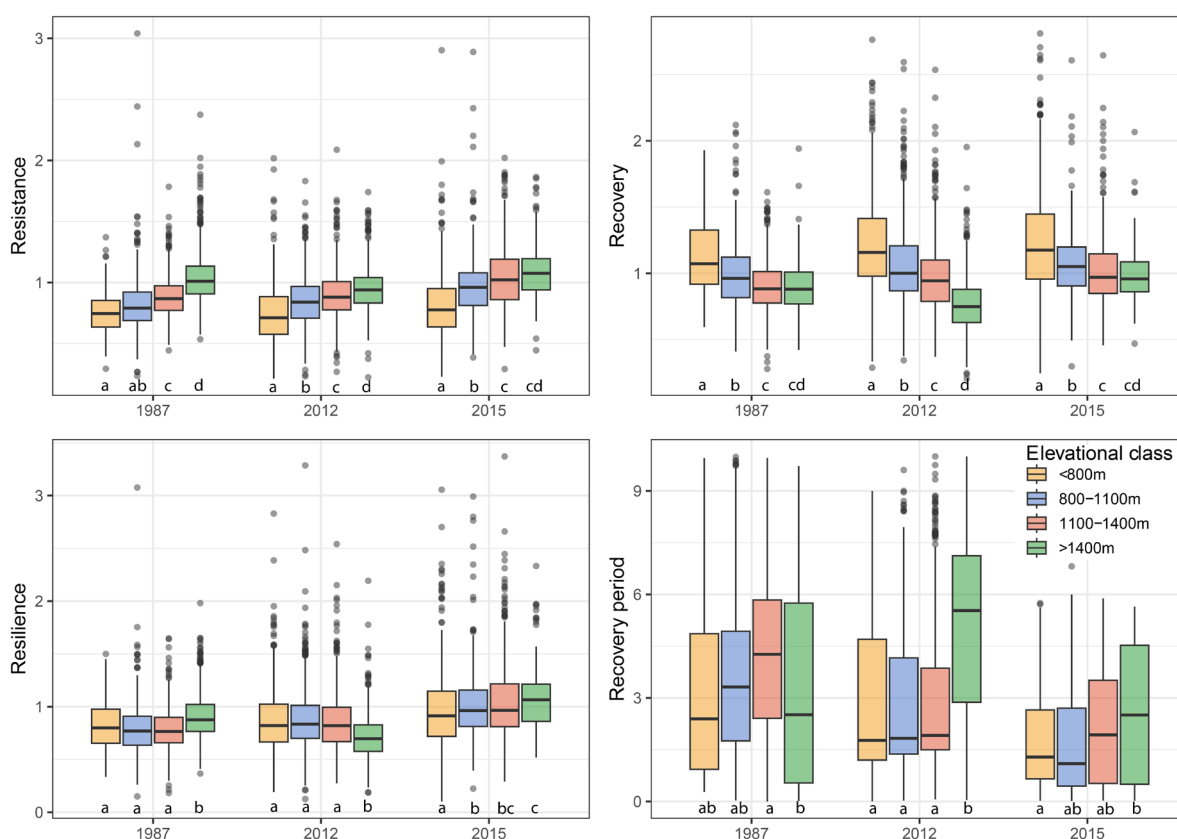


Figura 5.1 Componentele de reziliență ale molidului în raport cu clasele de altitudine pentru cei trei ani de secetă comuni în zona de studiu. Literele indică diferențe semnificative între clasele de altitudine pe baza testelor Wilcoxon.

### 5.3.2 Efectele disponibilității apei asupra rezilienței molidului

În urma cuantificării impactului disponibilității de apă, s-au constatat efecte semnificative și diverse asupra componentelor de reziliență ale CWB înainte, în timpul și după o secetă extremă (Tabelul 5.1). În mod specific, CWB în timpul secetei a influențat pozitiv rezistența și reziliența ( $p < 0,001$ ), dar nu s-a observat niciun efect semnificativ statistic asupra recuperării. În schimb, pentru perioada de recuperare, s-a observat o influență negativă a CWB în timpul secetei. Disponibilitatea de apă din doi



ani înainte de secetă ( $CWB_{\text{înainte}}$ ) are o influență mai mică asupra componentelor de reziliență ale molidului (coeficienți apropiați de 0, Tabelul 5.1). Totuși,  $CWB$  înainte de secetă a influențat negativ rezistența, recuperarea și reziliența molidului, dar într-o măsură mai mică în comparație cu disponibilitatea de apă din doi ani după evenimentul de secetă ( $CWB_{\text{după}}$ ). În plus, s-a identificat o influență pozitivă și semnificativă ( $p < 0,001$ ) a  $CWB_{\text{înainte}}$  și  $CWB_{\text{după}}$  asupra perioadei de recuperare.

Rezistența și reziliența molidului au crescut odată cu creșterea  $CWB$  în anul secetei (Fig. 5.2), indicând că intensitatea secetei a afectat grav capacitatea molidului de a-și menține același nivel al creșterilor radiale. În schimb, componentele de reziliență au scăzut odată cu creșterea disponibilității de apă înainte de secetă. În mod interesant, s-a observat o scădere a indicilor de recuperare și reziliență (direct legată de recuperare) în locațiile cu o disponibilitate de apă mai mare. Aceste aspecte sunt legate de ratele mai mari de recuperare ale molidului de la altitudini joase (zone cu  $CWB$  mai scăzut) în comparație cu recuperarea mai mică a molidului de la altitudini mai înalte. S-a observat o perioadă mai lungă de recuperare pentru locațiile cu  $CWB$  scăzut în timpul secetei. Cu toate acestea, o perioadă mai lungă de recuperare a fost asociată cu suprafețele de cercetare care au avut o  $CWB$  mai mare înainte sau după secetă. Sondajele cu cea mai mare disponibilitate de apă sunt localizate la altitudini mai înalte, unde s-a raportat cea mai lungă perioadă de recuperare (Fig. 5.1).

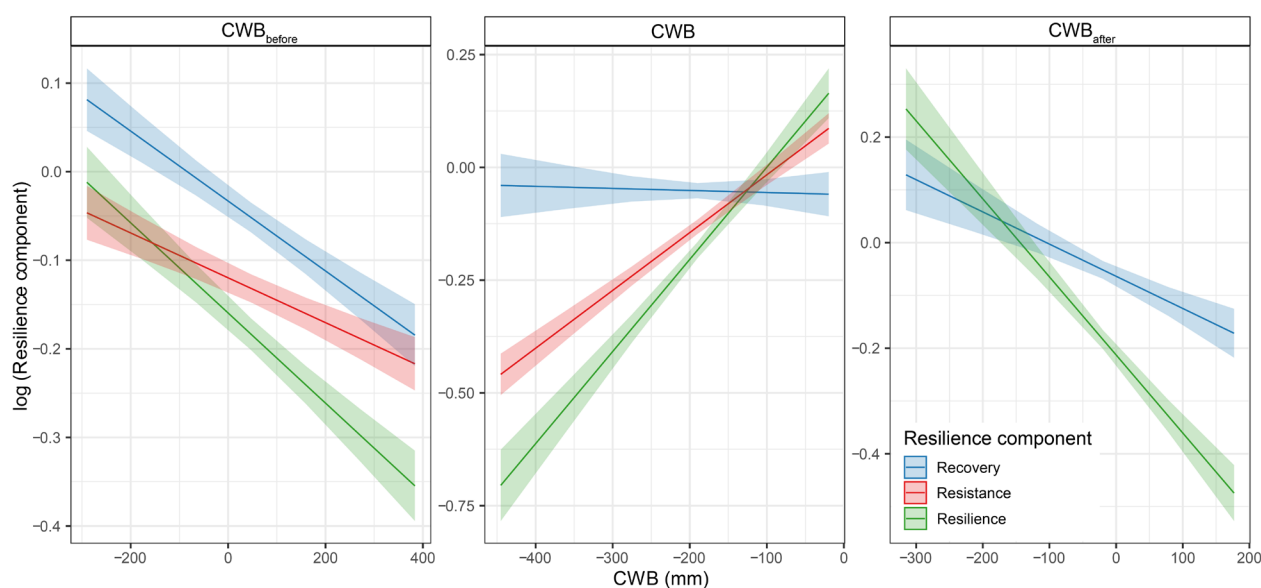


Figura 5.2 Efectul disponibilității de apă asupra componentelor de reziliență bazat pe modele liniare cu efecte mixte (Tabelul 5.1). Un model linear cu efecte mixte a fost calibrat pentru fiecare componentă de reziliență (logaritmată).

### 5.3.3 Linia de reziliență integrală

În toți anii de secetă selectați, s-au observat deviații semnificative între "linia reală a rezilienței" ajustată și linia ipotetică în toate clasele de altitudine conform rezultatelor analizei varianței ANOVA ( $p < 0,01$ ) (Fig. 5.3). În mod specific, la altitudini  $>1400$  m, arborii care au prezentat valori ale rezistenței sub 1,014 în 2015, 1,215 în 1987 și 1,653 în 2012 nu au înregistrat o rată de recuperare suficient de mare pentru a atinge o reziliență completă. În schimb, la altitudini  $<800$  m, arborii cu rezistență mai scăzută au reușit să se recupereze complet. În mod specific, arborii cu rezistență peste 0,853 (pentru

2015) până la 0,963 (pentru 1987) au avut rate de recuperare suficient de mari pentru a obține o reziliență completă în decurs de doi ani. În ceea ce privește vârsta arborilor, doar în 2015, arborii cu rezistență <1 (valori între 0,870 pentru arborii mai în vârstă și 0,956 pentru cei mai tineri) au avut rate de recuperare care au condus la o reziliență completă. În schimb, în 1987 și 2012, reziliența completă a fost obținută doar de arborii care nu au înregistrat nicio reducere a creșterii (rezistență >1). În ansamblu, arborii mai în vârstă au prezentat valori ale rezistenței, respectiv rate de recuperare care nu au fost suficient de mari pentru a asigura o reziliență completă.

## 5.4 Discuții

### 5.4.1 Molidul de la altitudini joase are cea mai redusă rezistență

După anii de secetă, caracterizați prin rezistență scăzută a arborilor și reducere a creșterilor, potențialul de recuperare crește. Cu toate acestea, arborii care au manifestat o rezistență ridicată au tendința de a prezenta rate mai scăzute de recuperare (Schmucker et al., 2023). O variabilitate similară a fost observată în rețeaua dendrocronologică analizată din Carpații Orientali. În mod specific, s-a observat că la altitudini joase, molidul are o rezistență scăzută, dar recuperarea a fost mai ridicată în comparație cu situația de la altitudini mai înalte, unde rezistența ridicată a fost asociată cu o recuperare mai redusă. Această variație este în concordanță cu constatările altor cercetări, care au raportat, de asemenea, o rezistență scăzută (adică o reducere semnificativă a creșterilor) asociată cu o rată mai mare de recuperare a molidului la altitudini joase (Aldea et al., 2022; Trembl et al., 2022). Acest fapt implică o variabilitate mai mare în ratele de creștere. În aceeași zonă de studiu, Popa et al. (2024a) au arătat că cea mai mare variabilitate în creșterea anuală, exprimată prin creșterea în suprafața de bază, se întâlnește la altitudini joase. O variabilitate mai mare în seriile de creștere a fost asociată cu o sensibilitate climatică crescută și o rezistență redusă a arborilor la secetă, conform cercetărilor realizate de Popa et al. (2024b).

Compararea variabilității indicilor de reziliență de-a lungul gradientelor altitudinali (Q1) a evidențiat diferențe semnificative din punct de vedere statistic. Cu toate acestea, evaluarea toleranței la secetă la diferite altitudini este dificilă datorită faptului că de-a lungul gradientelor altitudinali molidul are o dinamică diferită de creștere în timpul sezonului (ex. debutul mai rapid al creșterilor la altitudini joase). Pentru a depăși aceste limitări, a fost utilizată o metodă integrată pentru interpretarea indicilor de reziliență derivați din inele de creștere anuale (Fig. 5.9). Deviația ridicată a "liniei de reziliență actuală" față de "linia de reziliență integrale" observată la altitudini mai înalte indică o rezistență mai scăzută la secetă. Această metodă permite o clasificare mai bună a speciilor în funcție de răspunsul acestora la secetă. După cum arată Schwarz et al. (2020), dacă clasificarea toleranței molidului la secetă ar fi făcută doar luând în considerare indicele de rezistență, am putea considera că molidul de la altitudini joase este mai puțin tolerant la secetă. Totuși, acesta a arătat și o rată mai mare de recuperare. Astfel, molidul de la altitudini mai joase este mai aproape de "reziliență completă" în comparație cu molidul de la altitudini mai înalte.

Tabelul 5.1 Rezultatele modelului liniar cu efecte mixte (LMM) pentru predicția componentelor de reziliență în funcție de disponibilitatea apei (CWB înainte, în timpul și după anii de secetă). *Coef.* reprezintă coeficienții modelului,  $\sigma^2$  varianța valorilor reziduale, *VIF* factorul de inflație a variabilelor,  $\tau$  varianța cauzată de efectele aleatoare, *ICC* coeficientul de corelație intraclasă, *N* numărul de suprafețe, *Marg. R<sup>2</sup>* coeficientul de determinare pentru efecte fixe, *Cond. R<sup>2</sup>* coeficientul de determinare pentru efecte fixe și random.

Variabile	Rezistență				Recuperare				Reziliență				Perioadă de recuperare			
	Coef.	Eroare std.	<i>p</i>	VIF	Coef.	Eroare std.	<i>p</i>	VIF	Coef.	Eroare std.	<i>p</i>	VIF	Coef.	Eroare std.	<i>p</i>	VIF
<i>Termen liber</i>	-0.132	0.008	<0.001	-	-0.052	0.009	<0.001	-	-0.183	0.009	<0.001	-	0.719	0.028	<0.001	-
<i>CWB<sub>înainte</sub></i>	-0.028	0.004	<0.001	1.026	-0.044	0.005	<0.001	1.198	-0.057	0.006	<0.001	1.232	0.108	0.031	<0.001	1.692
<i>CWB</i>	0.109	0.007	<0.001	1.026	-0.004	0.012	0.74	2.218	0.174	0.013	<0.001	2.434	-0.529	0.065	<0.001	5.478
<i>CWB<sub>după</sub></i>	-	-	-	-	-0.060	0.011	<0.001	2.506	-0.146	0.013	<0.001	2.773	0.639	0.067	<0.001	6.242
<i>Efecte random</i>																
$\sigma^2$	0.05				0.07				0.09				1.08			
$\tau$	0.01				0.01				0.01				0.05			
<i>ICC</i>	0.14				0.12				0.1				0.05			
<i>N</i>	158				158				158				158			
<i>Nr. obs.</i>	6147				6147				6147				2630			
<i>Marg. R<sup>2</sup> / Cond. R<sup>2</sup></i>	0.118 / 0.241				0.116 / 0.225				0.060 / 0.156				0.075 / 0.117			

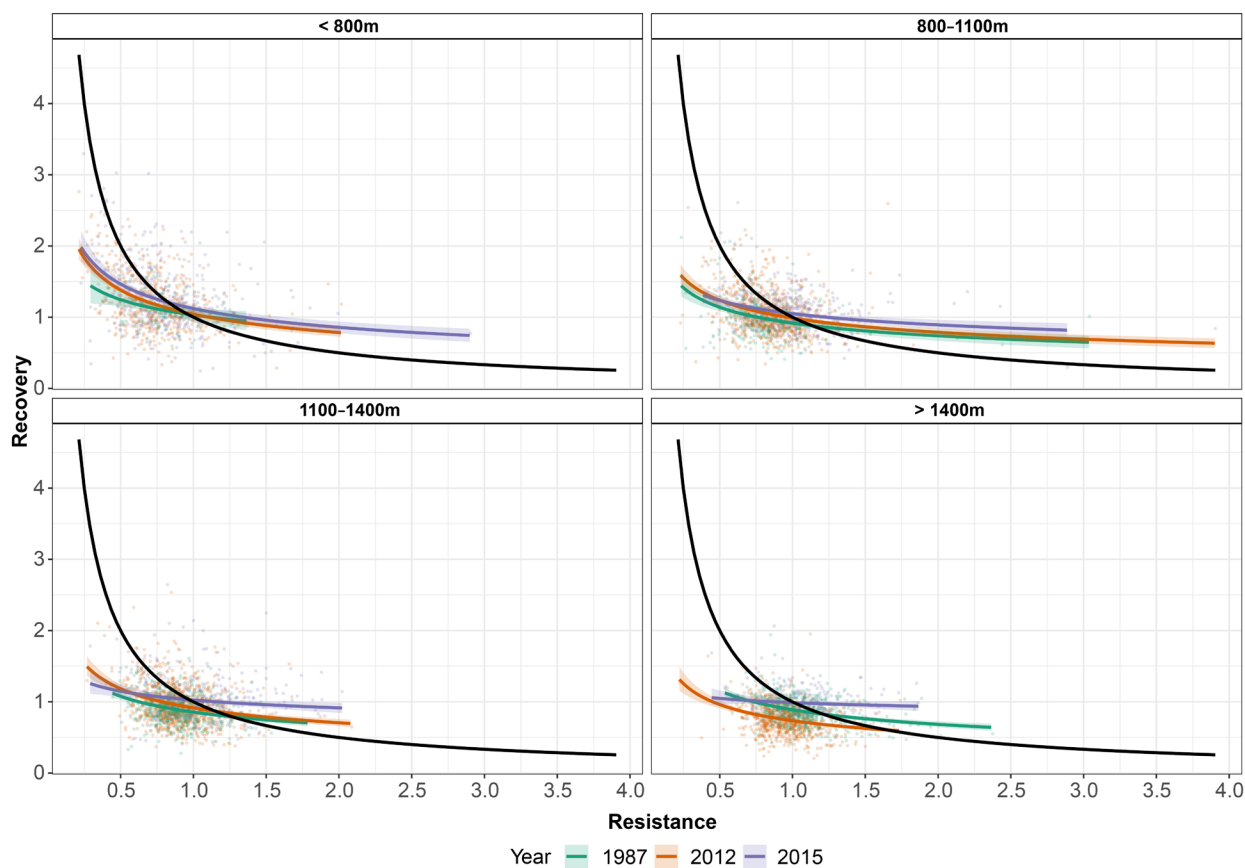


Figura 5.3 Compararea 'liniei de reziliență actuale' ajustate (linii colorate) pe baza valorilor observate ale rezistenței și recuperării cu 'linia ipotetică a rezilienței integrale' (linii negre) pentru cei trei ani de secetă comuni în cele patru clase de altitudine.

Deoarece molidul de la altitudini joase a experimentat mai frecvent secete în istoria sa de dezvoltare în comparație cu molidul de la altitudini înalte, acest lucru poate conduce la o plasticitate și adaptare mai ridicată la deficitul de apă. În prezent, există reglementări stricte legate de transferul materialului reproductiv (ex. semințe, puiți etc.), majoritatea bazate pe condițiile climatice din trecut sau prezente (Konnert et al., 2015). Cu toate acestea, practicile adaptative de gestionare a pădurilor în contextul schimbărilor climatice trebuie să ia în considerare capacitatea actuală de reziliență a speciilor și, astfel, să promoveze regenerarea pădurilor cu proveniențe mai bine adaptate (Millar et al., 2007). Astfel, rezultatele noastre pot oferi noi perspective despre capacitatea molidului de la altitudini joase de a face față secetei și reprezintă un suport științific pentru practicile adaptative de gestionare a pădurilor.

#### 5.4.2 Arbori bătrâni au nevoie de un timp mai îndelungat pentru a se recupera

Un studiu recent efectuat la nivel global a arătat că arborii mai tineri sunt mai puțin rezistenți la secetă, dar au o capacitate mai mare de recuperare după aceasta (Au et al., 2022). Rezultatele noastre sunt în concordanță cu aceste constatări. Arborii mai tineri au sisteme radicele mai puțin adânci și mai puțin dense, ceea ce limitează capacitatea de absorbție a apei în perioadele de secetă. În cazul molidului, aceste limitări sunt chiar mai accentuate deoarece sistemul său radicele este răspândit pe orizontală mai mult decât pe verticală (Caudullo et al., 2016; Ichim, 1990). Aceste limitări pot duce la o transpirație mai puțin eficientă în arboretele tinere, și astfel arborii pot experimenta o severitate crescută a secetei

(reduceri mai puternice ale creșterii) în comparație cu arborele bătrâne. Diferențele semnificative în pierderile de creștere între diferite clase de vârstă, în diferiți ani de secetă, pot avea un impact major asupra stocului de carbon la nivel global. În ansamblu, capacitatea arbori de molid de a se recupera după evenimente de secetă necesită cercetări suplimentare, și este obligatoriu să se ia în considerare practicile management care îmbunătățesc capacitatea ecosistemelor forestiere gestionate de a face față mai bine secetei.

Pe de altă parte, arborele bătrâne au înregistrat o rezistență mai mare în timpul anilor secetoși. Rezistența mai ridicată observată în arborele bătrâne poate fi legată de structura pădurii și de dimensiunea arborilor. În pădurile gestionate, cu cât arboretul este mai bătrân, cu atât arborii sunt mai mari în diametru și înălțime. Acest lucru implică o capacitate mai mare de stocare a apei și, datorită sistemului radicular mai întins au un acces mai bun la apa de pe o suprafață mai mare în comparație cu arborii mai tineri. Totuși, această teorie nu este în întregime susținută de alte studii, deoarece un arbore mai mare ar implica o coroană mai mare și, prin urmare, o cerere de apă mai ridicată pentru menținerea nivelurilor de transpirație (Poorter et al., 2012). Cercetările (ex. Bennett et al., 2015; Mathes et al., 2023) au arătat că arborii mai bătrâni sunt mai predispuși să sufere din cauza secetei și au rate mai mari de mortalitate. Rezultatele noastre nu sunt în totalitate în acord cu aceste rezultate deoarece molidul din arborele bătrâne din Carpații Orientali a prezentat o rezistență mai mare la secetă. Cu toate acestea, în cazul în care s-au înregistrat pierderi de creștere, ratele de recuperare sunt scăzute, iar perioadele de recuperare sunt mai lungi. Aceste aspecte pot indica o capacitate mai redusă a arboretelor mai bătrâne de a face față secetei în comparație cu arborele mai tinere care au fost regenerare în deceniile recente într-o perioadă cu secete mai frecvente.

#### 5.4.3 Reziliența molidului determinată în principal de intensitatea secetei

S-a constatat că intensitatea secetei este cel mai important factor determinant al rezilienței molidului din Carpații Orientali. Rezultatele obținute sunt în conformitate cu alte studii care au evidențiat o influență semnificativă a caracteristicilor secetei asupra capacității arborilor de a-și menține rata de creștere sau de a se recupera după evenimente extreme de secetă (Aldea et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Bilanțul mediu al apei înainte și după un eveniment de secetă influențează componentele rezilienței. Mai precis, calculul matematic al rezilienței se bazează pe condițiile de creștere dinainte și după secetă (doi ani în acest studiu). Condițiile favorabile de creștere înainte de secetă (CWB ridicat) conduc la o capacitate ridicată de creștere, depășind condițiile medii, aspect care crește vulnerabilitatea ecosistemelor forestiere față de evenimentele de secetă (Zhang et al., 2021). Această vulnerabilitate se poate manifesta printr-un indice de suprafață foliară crescut dezvoltat înainte de secetă și, astfel, o cerere crescută de apă care nu poate fi compensată (Zhang et al., 2021). În același timp, condițiile favorabile înainte de un eveniment de secetă ar reduce probabilitatea ca arborii să poată recupera acele rate ridicate de creștere după un eveniment extrem. Rezultatele noastre sunt în concordanță cu aceste constatări; componentele de reziliență (rezistența, recuperarea și reziliența) scad odată cu CWB (Fig. 5.2).

#### 5.4.4 Concluzii și perspective de viitor

Este bine cunoscut faptul că pădurile de amestec pot reacționa mai bine la secetă decât monoculturile de molid (Aldea et al., 2022). Totuși, interesul economic al părților interesate împiedică trecerea de la secole de monoculturi de molid la alternative de păduri de amestec. Cu toate acestea, luând în considerare scenariile climatice actuale, există o nevoie urgentă de management forestier adaptativ pentru a face față provocărilor climatice, dar și pentru a asigura furnizarea de servicii ecosistemice (în special producția de lemn). Rezultatele obținute oferă noi perspective asupra capacității pădurilor de molid din Carpați de a-și menține ratele de creștere în timpul evenimentelor de secetă. În mod surprinzător, rezultatele obținute au indicat faptul că arborii mai tineri sau cei de la altitudini joase au o rată mai mare de recuperare. Aceste rate ridicate de recuperare pot fi legate de o adaptabilitate mai bună a molidului în fața secetelor. Prin urmare, utilizarea proveniențelor mai bine adaptate poate reprezenta o potențială soluție pentru a crește reziliența monoculturilor de molid în viitor până când se va face o tranziție la păduri de amestec. Acest studiu a evidențiat diferitele capacități de adaptare ale molidului de-a lungul gradientelor de altitudine și vârstă, reprezentând astfel un punct de plecare pentru cercetările viitoare în fundamentarea acestor ipoteze. Conectarea dendrofenotipurilor cu genetica asociată ar putea valida rezultatele obținute și ar putea conduce la înțelegere mai bună a impactului schimbărilor climatice asupra pădurilor de molid.

## 6. RELAȚIA DINTRE FACTORII CLIMATICI ȘI PROCESELE DE CREȘTERE RADIALĂ ALE MOLIDULUI ȘI NON-STAȚIONARITATEA ACESTORA ÎN ULTIMUL SECOL

Andrei Popa, Jernej Jevšenak, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Allan Buras, *In pursuit of change: Divergent temporal shifts in climate sensitivity of Norway spruce along an elevational and continentality gradient in the Carpathians*, Agricultural and Forest Meteorology, Q1, IF=5,6 (în evaluare)

### 6.1 Introducere

În ultimele decenii, în ecosistemele limitate de temperaturi, respectiv cele de latitudini mari și altitudini înalte a fost raportat tot mai frecvent fenomenul de non-staționaritate al relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere ale arborilor (cunoscut sub denumirea de „problema divergenței”). Mai mult, s-au observat schimbări în sensibilitatea arborilor la factorii climatici și în pădurile temperate, fenomen recunoscut la nivel global ca răspuns la schimbările climatice (Babst et al., 2019). Wilmking et al. (2020) au constatat că 56% dintre studii care au testat non-staționaritatea au identificat semne clare ale instabilității temporale a relațiilor între factorii climatici și procesele de creștere. În contextul actual al încălzirii globale (IPCC, 2023), putem anticipa schimbări severe în sensibilitatea pădurilor la factorii climatici (Brodrigg et al., 2020). În același timp, sensibilitatea creșterilor secundare la parametrii climatici poate să se schimbe după evenimente extreme de secetă (Leifsson et al., 2023). Prin urmare, sensibilitatea creșterilor arborilor la condițiile climatice se modifică în timp, uneori brusc (Leifsson et al., 2023), fapt care va afecta reziliența pădurilor, vulnerabilitatea acestora, respectiv dinamica creșterii arborilor pe termen scurt și compoziția arboretelor pe termen lung. Astfel, cuantificarea non-staționarității relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere radială reflectă o schimbare temporală a sensibilității arborilor la factorii climatici (*temporal shift of climate sensibility – TSCS*), posibil indusă de schimbările climatice. În termeni matematici, TSCS poate fi cuantificat prin schimbarea/transformarea relației între creșterea secundară a arborilor (inelele de creștere anuale) și factorii climatici care limitează creșterea arborilor (în principal, temperatură și precipitații).

În timp ce cuantificarea modificărilor în sensibilitatea arborilor la factorii climatici în Europa sunt comune (Ponocná et al., 2016; Schurman et al., 2019; Svobodová et al., 2019), majoritatea cercetărilor se bazează pe date climatice lunare. Cu toate acestea, utilizarea datelor climatice cu rezoluție lunară impune o barieră temporală artificială fără o explicație fiziologică. În special, Jevšenak (2019) a arătat că datele climatice zilnice permit o cuantificare mai precisă a relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere radială și ar putea dezvălui astfel mai multe detalii legate de TSCS.

În cadrul pădurilor din zona temperată, factorii climatici care limitează creșterea arborilor variază de la temperaturi la altitudini înalte la disponibilitatea scăzută a apei la altitudini joase (Babst et al., 2013). În ecosistemele forestiere, unde interacționează limitările de temperatură și umiditate, arborii își pot modifica sensibilitatea lor de la un factor climatic la altul. În pădurile boreale, sensibilitatea arborilor la temperaturile de vară s-a schimbat semnificativ sub variabilitatea regimurilor climatice (perioade

uscate versus umede). În Carpați, sensibilitatea la temperaturile de vară a diferitelor parametri celulari (ex. aria lumenului celular, grosimea radială a pereților celulari, numărul de celule) a scăzut în ultimele decenii (Știrbu et al., 2022; Unterholzner et al., 2024). Aceste studii sugerează că o cuantificare a TSCS pentru o specie dată într-o anumită regiune poate oferi indicii despre capacitatea acelei specii de a face față schimbărilor climatice în curs.

Pentru a aborda acest gol de cunoaștere, s-a stabilit o metodă nouă pentru evaluarea schimbărilor temporale în sensibilitatea la factorii climatici (TSCS) pentru molidul din Carpații Orientali. Cercetările se bazează pe o rețea dendrocronologică extinsă care cuprinde peste 3000 de arbori din 158 de suprafețe de cercetare, acoperind un gradient altitudinal între 475 și 1675 m. Această rețea este combinată cu date climatice cu rezoluție zilnică pentru a identifica sezoanele climatice în care sensibilitatea molidului la factorii climatici s-a modificat în timp. Obiectivul central al cercetărilor este să ofere informații actualizate asupra TSCS pentru molidul din Carpați, cu scopul de a identifica mecanismele dominante care au condus la aceste schimbări. Pentru a aborda acest obiectiv, au fost definite următoarele ipoteze de cercetare:

(H1) odată cu încălzirea globală, temperatura de vară devine un factor mai puțin limitativ pentru creșterea molidului la altitudini înalte;

(H2) totuși, importanța disponibilității apei pentru creșterea arborilor la altitudini joase este în creștere datorită intensificării evenimentelor de secetă;

(H3) datorită gradientului de continentalitate est-vest pronunțat în Carpați, sunt prognozate diferențe în schimbările temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS) între regiunile estice și vestice.

## **6.2 Material și metode**

### **6.2.1 Baza de date climatice și de creștere radială**

Datele climatice (temperaturi zilnice maxime, minime și precipitații) utilizate în acest studiu au fost descărcate pentru perioada 1950-2021, la nivelul suprafețelor de cercetare, din baza de date Easyclimate (Cruz-Alonso et al., 2023), care reprezintă o versiune scalată a bazei de date climatice E-OBS (Cornes et al., 2018), cu o rezoluție spațială de aproximativ  $0,0083^\circ$ , ~1 km. Temperatura zilnică medie a fost calculată ca medie între temperatura minimă și cea maximă. Indicele Standardizat de Precipitații-Evapotranspirație (SPEI) a fost utilizat pentru a caracteriza disponibilitatea de apă în zona de studiu (Beguería et al., 2013). Datele privind evapotranspirația potențială au fost calculate conform metodei Hargreaves-Samani bazate pe temperatură (medie, maximă și minimă) și latitudinea suprafețelor de cercetare, respectiv radiația solară netă la suprafață (Hargreaves and Samani, 1985). Pentru calculul SPEI, valorile bilanțului mediu al apei, definit ca diferență dintre precipitații și evapotranspirația potențială, au fost agregate, la diferite ferestre cumulative, într-o distribuție logistică (Jevšenak, 2019).



## 6.2.2 Analizele statistice

Pentru a evalua relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială ale molidului, au fost utilizate temperatura medie, precipitațiile și SPEI. Pentru a cuantifica TSCS, au fost aplicate două metode. În primul rând, perioada comună de suprapunere a datelor de creștere radială cu cele climatice a fost împărțită în două intervale egale: 1951-1985 (perioada timpurie) și 1986-2021 (perioada târzie). Pentru fiecare perioadă, s-au calculat în mod independent corelațiile dintre factorii climatici agregați pentru diferite perioade și procesele de creștere radială utilizând pachetul „dendroTools” (Jevšenak, 2020; Jevšenak și Levanič, 2018). Specific, s-a calculat coeficientul de corelație Pearson pentru 520 de sezoane de agregare a datelor climatice, începând din 1 mai din sezonul de creștere anterior până în 30 septembrie din sezonului de creștere. Din punct de vedere al lungimii sezonului de agregare a datelor climatice a fost considerat un interval de cumulare de la 21 la 180 zile. Scopul acestei abordări (metoda statică) a fost de a cuantifica modificarea răspunsului molidului la factorii climatici între cele două perioade. Prin această metodă, s-a calculat mai întâi procentul de suprafețe de cercetare în care coeficienții de corelație au fost semnificativi din punct de vedere statistic pentru ambele perioade analizate ( $p < 0,05$ ). Ulterior, pentru fiecare clasă de altitudine, s-a calculat media coeficienților de corelație și abaterea standard pentru fiecare sezon și parametru climatic în parte, evidențiind astfel diferențele în sensibilitatea la factorii climatici între clasele de altitudine.

Pentru a analiza TSCS în timp, s-a aplicat o metodă dinamică care constă în utilizarea unei ferestre mobile pentru a evalua schimbarea temporală a relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere radială. În acest sens, s-a utilizat o fereastră mobilă de 31 de ani, începând cu perioada 1951-1981, schimbând perioada analizată cu 1 an la fiecare pas, ultimul interval analizat fiind 1991-2021. La fiecare pas, au fost calculate corelațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială pentru fiecare perioadă, pentru cei trei parametri climatici și aceleași sezoane de agregare a datelor climatice ca în cazul metodei statice.

Rezultate obținute prin metoda dinamică au fost utilizate pentru a evidenția dinamica în timp a TSCS. Pentru fiecare suprafață de cercetare, s-au derivat tendințe în sensibilitatea la factorii climatici pentru toate sezoanele de agregare. Specific, au fost calculate regresii lineare a variației coeficienților de corelație în timp pentru fiecare sezon de agregare în mod independent. Coeficienții beta a ecuațiilor de regresie liniară (panta dreptei de regresie) au fost considerați drept reprezentarea matematică a TSCS.

În final, pentru fiecare clasă de altitudine s-a calculat media coeficienților beta, care reprezintă TSCS, pentru a evidenția variabilitatea în raport altitudinea. Pentru a defini o creștere sau o descreștere a corelațiilor în perioada 1950-2021, au fost definite patru tipuri posibile de TSCS. Dacă ambele corelații din primele și ultimele intervale au avut același semn, a fost definit un caz pozitiv-pozitiv sau un caz negativ-negativ. Pentru o interpretare mai ușoară în cazul negativ-negativ, semnul coeficientului beta a fost schimbat pentru a menține coerența cu cazul pozitiv-pozitiv. Dacă semnul coeficienților de corelație între primele și ultimele intervale a fost diferit, a fost definit ca un caz pozitiv-negativ sau negativ-pozitiv.

În cadrul acestui studiu, s-au realizat o multitudine de teste de corelație, implicând astfel problema comparării multiple (Gelman și Loken, 2013), în care probabilitatea de a identifica eronat rezultatele ca semnificative crește. Pentru a diminua acest risc, au fost evidențiate momentele în care mai multe sezoane de agregarea a factorilor climatici au înregistrat valori semnificative ale corelațiilor cu procesele de creștere radială. Pragul de semnificație a fost utilizat drept limită obiectivă în interpretarea rezultatelor. Mai mult de atât, s-au evidențiat rezultate în care au fost observate corelații semnificative pentru mai multe sezoane similare din punct de vedere al momentului de start sau a lungimii de agregare, aspect care sugerează că aceste rezultate nu sunt obținute aleatoriu.

Pentru a aborda a treia ipoteză, s-a realizat un model de regresie a TSCS (coeficienții beta) în raport cu altitudinea, latitudinea și longitudinea. În această analiză, au fost selectate patru sezoane climatice în care s-au obținut cele mai ridicate valori ale TSCS. Au fost selectate două sezoane pentru temperatură (unul din sezonul de creștere actual și unul din iarnă) și două pentru SPEI (unul de la sfârșitul sezonului de creștere actual și unul din iarnă). Astfel, valori semnificative ale ecuațiilor regresiilor lineare ar susține H3, deoarece o schimbare semnificativă a TSCS în raport cu altitudinea, longitudinea sau latitudinea ar indica o variabilitate a TSCS. Pentru a investiga importanța fiecărei variabile (altitudine, longitudine, latitudine) asupra TSCS, s-a calibrat un model de regresie liniară multiplă (Uyanık și Güler, 2013). În baza modelului s-a calculat importanța variabilelor pentru altitudine, longitudine și latitudine (Grömping, 2015). Modelele independente de regresie liniară multiplă au fost calibrate pentru fiecare sezon de agregare selectat. Calculul modelului și extragerea importanței variabilelor s-au realizat în R utilizând pachetul „relaimpo” (Groemping și Matthias, 2018).

## 6.3 Rezultate

### 6.3.1 Schimbarea sensibilității climatice în baza metodei statice

Relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială evaluate prin metoda statică au evidențiat răspunsuri variabile la factorii climatici între perioadele 1951-1985 și 1986-2021. În legătură cu H1, s-a observat un semnal semnificativ al temperaturii de vară în cele două benzi de altitudine superioară în perioada timpurie, care a dispărut în mare măsură în perioada târzie (Fig. 6.1, panoul Temperatură). În perioada timpurie, pentru intervalul de la sfârșitul primăverii până la începutul verii (sezonul între 28 apr. și 30 iul.) s-a obținut cea mai mare corelație ( $r = 0,559$ ) cu indicii de creștere, indicând caracterul limitativ al temperaturilor scăzute asupra creșterilor. În perioada târzie, aceste corelații nu mai sunt semnificative din punct de vedere statistic, dar a fost observată o sensibilitate semnificativă la temperaturile din primăvară. Mai mult de atât, temperaturile din iarnă sunt corelate pozitiv și semnificativ cu indicii de creștere, la altitudini peste 1100 m în perioada târzie. Cele mai mari corelații au fost identificate pentru sezoane scurte, în prima parte a iernii ( $r = 0,491$  pentru un sezon de 21 de zile, între 3 și 23 dec.). Prin selecția unor sezoane cumulate mai lungi, a fost evidențiat faptul că temperaturile din iarnă (ian. și feb.) se corelată pozitiv și semnificativ cu TRI.

Corelații pozitive între SPEI din toamnă și iarnă și indicii de creștere radială, la altitudini sub 1100 m, în perioada timpurie au indicat o limitare a creșterii din cauza disponibilității scăzute de apă. Aceste

corelații s-au redus semnificativ în perioada târzie (Fig. 6.5, panoul SPEI). Precipitațiile din toamnă sau iarnă nu mai reprezintă un factor limitativ pentru molidul de la altitudini joase și intermediare, dar disponibilitatea apei din vara anterioară a rămas corelată pozitiv cu TRI. Corelații negative între valorile actuale ale SPEI de primăvară și TRI au fost observate la altitudini sub 1100 m în perioada timpurie (cea mai mare corelație de  $r = -0,489$  pentru un sezon de 52 de zile cumulative, între 16 feb. și 9 apr.), acestea nu mai este semnificativ din punct de vedere statistic ( $p > 0,05$ ) în perioada târzie. Un model tipic de corelație a fost observat la altitudini sub 800 m, respectiv corelația pozitivă între SPEI de la sfârșitul verii și indicii de creștere. Cu toate acestea, între perioada 1951-1985 și perioada 1986-2021, numărul de sezoane cu o corelație semnificativă cu disponibilitatea de apă a crescut, indicând o creștere a constrângerilor induse de disponibilitate a apei în timp, susținând H2. Mai puțin de 50% dintre suprafețele de cercetare au înregistrat o corelație semnificativă cu disponibilitatea de apă în perioada timpurie, în timp ce peste 90% dintre sondaje sunt limitate semnificativ de disponibilitatea de apă în perioada târzie (Fig. 6.7, panoul SPEI).

### 6.3.2 Schimbări temporale ale sensibilității la factorii climatici în baza metodei dinamice

Schimbări temporale ale sensibilității la factorii climatici au fost evidențiate în timp prin creșteri sau scăderi în intensitatea corelației, care uneori au dus la o schimbare în semnul corelației (de la pozitiv la negativ sau invers) (Fig. 6.2). Pentru altitudini mai mari de 1100 m, sensibilitatea molidului la temperatura de vară a scăzut semnificativ printr-o reducere în intensitatea corelației sau o schimbare de la corelații pozitive la corelații negative, susținând astfel H1. Un aspect interesant a fost intensificarea corelației dintre temperaturile din iarnă (ian. și feb.) și TRI la altitudini înalte, și dintre temperaturile de primăvară (mar. și apr.) și TRI la altitudini mai joase.

Corelația între SPEI de toamnă târzie/iarna timpurie și TRI a scăzut semnificativ, cu o schimbare mai intensă la altitudini joase (Fig. 6.2, panoul SPEI). În același timp, corelațiile s-au modificat de la pozitiv la negativ la altitudini înalte (>1100 m), în special în timpul iernii și începutul primăverii. Intensitatea corelației între SPEI din vară și TRI a scăzut la altitudini sub 1100 m, dar pentru un procent mai mic de suprafețe de cercetare (mai puțin de 60%). Corelația pozitivă a TRI cu SPEI din vară la altitudini sub 800 m (indicând că lipsa apei limitează creșterile) s-a intensificat în timp, evidențiind un TSCS pozitiv. În conformitate cu H2, TSCS pozitive au fost observate în majoritatea suprafețelor de la altitudini joase (Fig. 6.10, panoul SPEI). Similar cu situația observată în cazul SPEI, a fost evidențiată o variabilitate similară a TSCS pentru precipitații.

### 6.3.3 Tendințe spațiale în schimbările temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS)

În contextul ipotezei H3, analizele au evidențiat o influență semnificativă ( $p < 0.001$ ) a gradientului altitudinal în ceea ce privește variabilitatea TSCS pentru toate anotimpurile și parametrii climatici. Astfel, în timp ce la altitudini mari a fost înregistrată o creștere a sensibilității la temperaturile de iarnă, la altitudini joase s-a observat o scădere a sensibilității. În cazul temperaturilor de vară, s-a observat o relație inversă. În timp ce sensibilitatea la temperaturile de vară a scăzut la altitudini mari, ea a rămas stabilă (TSCS = 0) la altitudini joase. În ceea ce privește sensibilitatea la disponibilitatea apei din iarnă

și vară (SPEI), s-a constatat o variabilitatea a TSCS în raport cu altitudinea. În timp ce sensibilitatea molidului la SPEI a crescut la altitudini joase, la altitudini înalte a scăzut.

Referitor la gradientul longitudinal, s-a observat o variabilitatea a TSCS de la vest la est pentru toate cele patru sezoane analizate. În mod interesant, liniile de regresie care cuantifică divergența TSCS de-a lungul gradientului longitudinal au fost corelate negativ cu cele ale gradientului altitudinal. Prin urmare, pentru SPEI-ul de iarnă și SPEI-ul de vară, s-au constatat TSCS pozitive în partea estică a Carpaților Orientali, care prezintă un climat continental mai uscat, în timp ce în Carpații Occidentali s-au înregistrat valori ușor negative, respectiv valori ale TSCS apropiate de 0 pentru SPEI-ul de vară. TSCS pentru temperaturile de vară a fost negativ pe întreg gradientul de continentalitate, dar cu tendințe negative în partea vestică a rețelei. În mod opus, TSCS pentru temperaturile de iarnă a trecut de la valori pozitive în vest la valori negative în est. De asemenea, a fost observată o variabilitate a TSCS de-a lungul gradientului latitudinal, cu toate acestea într-o măsură mai redusă comparativ cu situația observată pentru gradientul longitudinal.

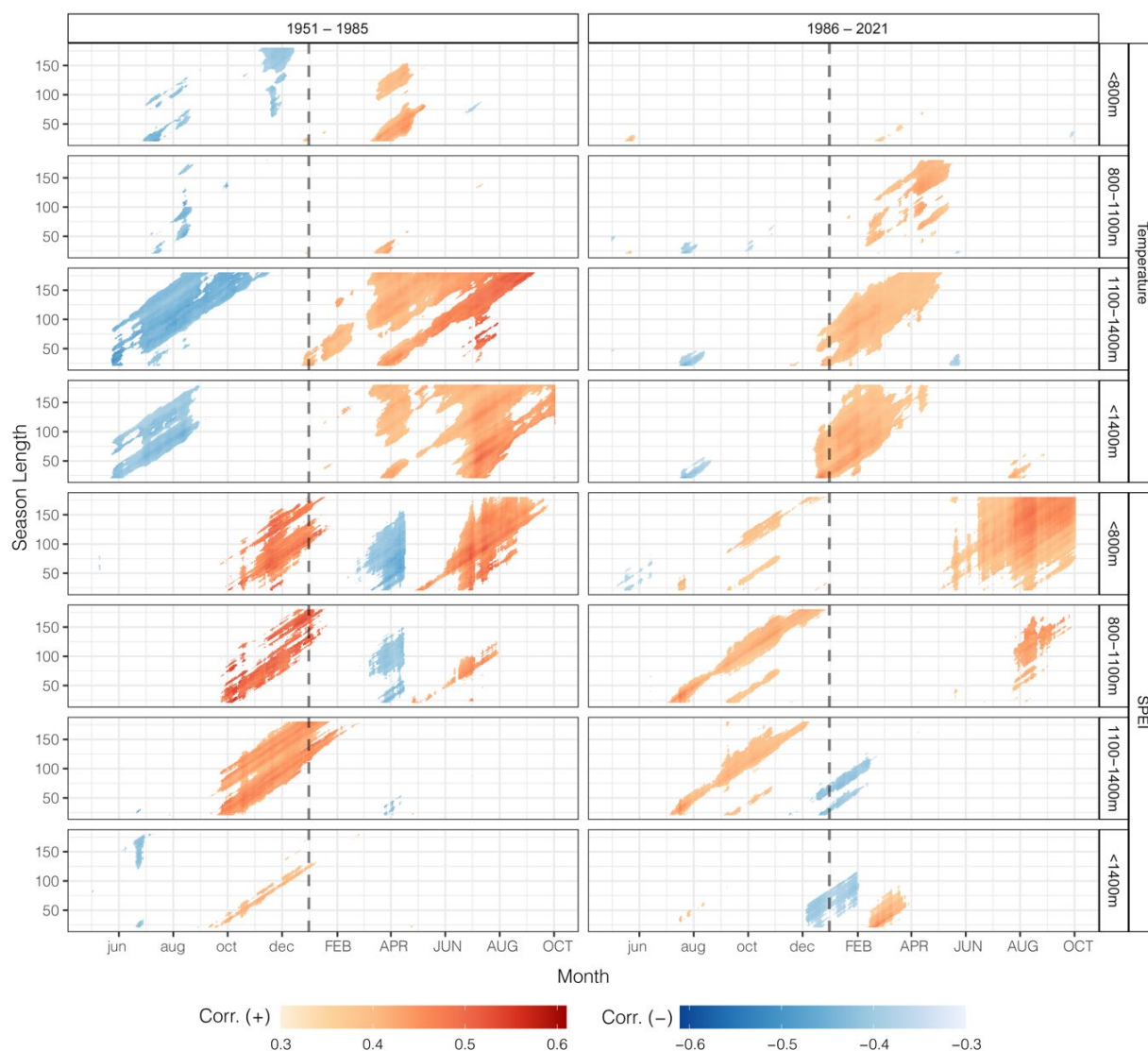


Figura 6.1 Coeficienții de corelație între temperatura medie și Indicele Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirației (SPEI) cu valorile indiciilor de creștere (TRI) pentru diferitele clase de altitudine în

perioadele timpurii (1951-1985) și târzii (1986-2021). Sunt prezentate doar sezoanele în care cel puțin 25% dintre cronologii au avut un coeficient de corelație semnificativ ( $p < 0.05$ ). Linia verticală punctată gri reprezintă limita dintre anul precedent (litere mici) și anul curent (litere mari).

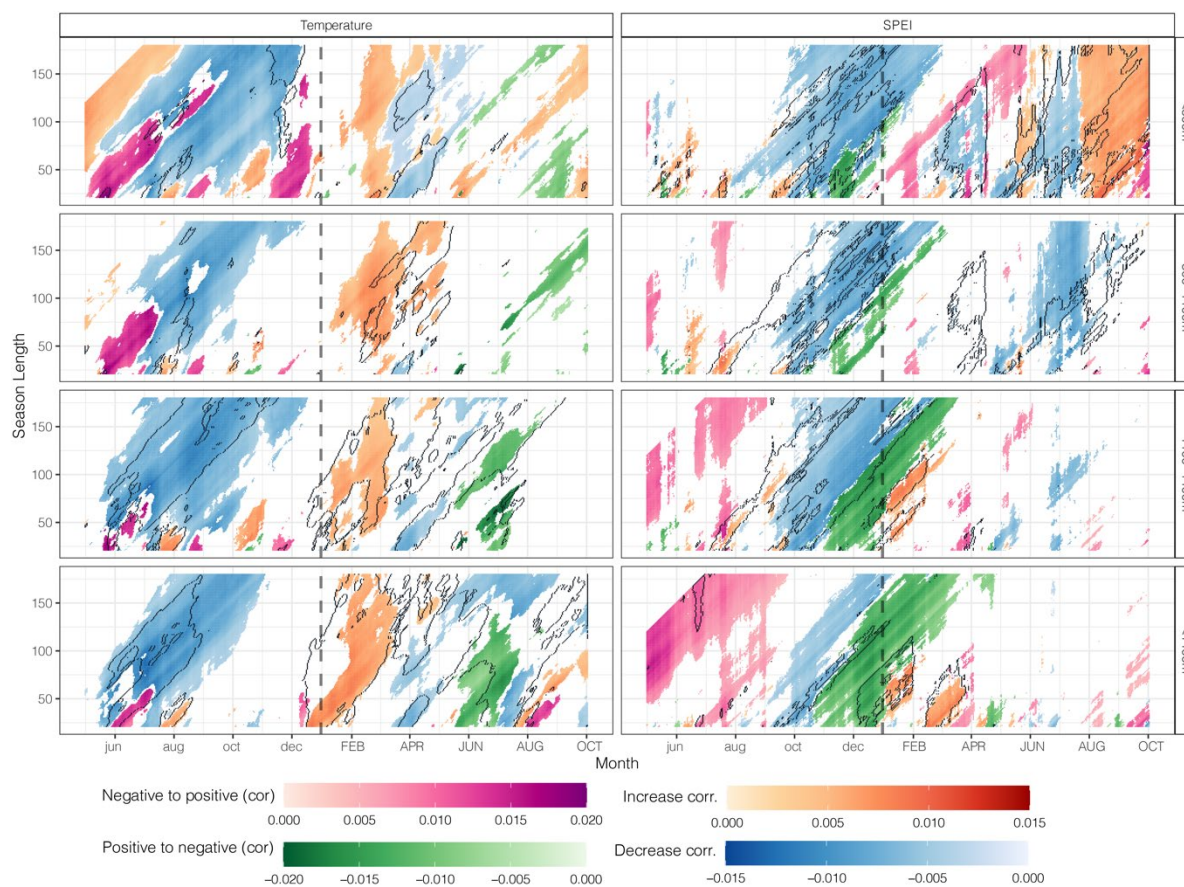


Figura 6.2 Sezoanele cu corelații crescătoare sau descrescătoare (cazuri de schimbări temporale în sensibilitatea climatică (TSCS) pozitive-pozitive sau negative-negative; cu roșu și albastru), și sezoanele cu schimbare în semnul corelației (cazul TSCS negative-pozitive sau pozitive-negative; cu roz și verde) pentru temperatura și SPEI. Figura prezintă doar sezoanele în care cel puțin 50% din sondaje au înregistrat o schimbare semnificativă în corelație. Pentru cazul negative-negative, semnele coeficienților beta au fost inversate pentru o interpretare consecventă. Poligoanele indică sezoanele cu coeficienți de corelație semnificativi ( $p < 0.05$ ) între indicii de creștere (TRI) și variabilele climatice, în perioadele timpurii și târzii (pentru diferențierea între cele două perioade, consultați Figura 6.1). Linia verticală punctată gri reprezintă limita dintre anul precedent (litere mici) și anul curent (litere mari).

Conform modelelor de regresie liniară multiplă, gradientul altitudinal a influențat semnificativ ( $p < 0.001$ ) TSCS în toate sezoanele, cu o importanță în model de peste 50% în toate situațiile. În același timp, gradientul altitudinal a explicat cea mai mare parte a variabilității TSCS, cu coeficienți de determinare ( $r^2$ ) ai regresiiilor corespunzătoare cuprinse între 0,22 și 0,27. Longitudinea, ca expresie a gradientului de continentalitate, a avut o influență semnificativă ( $p < 0,05$ ) asupra TSCS doar în sezoanele de iarnă, cu o importanță în model mai mare de 30% în aceste sezoane. Coeficienții de determinare ( $r^2$ ) ai variabilei longitudine au fost mai mici decât cei aferenți altitudinii și au variat între 0,09 și 0,22. Gradientul longitudinal a influențat semnificativ ( $p < 0,01$ ) doar TSCS-ul temperaturii de

iarnă, însă importanța în model a fost mai mică de 10%. Latitudinea a explicat cea mai mică variație a TSCS ( $r^2$  între 0,01 și 0,07). Variabilitatea TSCS a fost în mare parte legată de diferențele altitudinale, urmate de gradientul longitudinal.

## 6.4 Discuții

### 6.4.1 Tendința continuă de încălzire a schimbat răspunsul molidului la temperatură la altitudini înalte

Rezultatele noastre indică faptul că temperaturile de vară din sezonul de creștere curent au limitat creșterea molidului la altitudini înalte în perioada timpurie (1951-1985). Acest lucru este în concordanță cu cercetările anterioare din zona de studiu și din alte părți ale Europei care au constatat că temperatura și durata sezonului de vegetație limitează creșterea molidului la altitudini înalte (Claudia Hartl-Meier et al., 2014; Sidor et al., 2015). Ratele maxime de creștere radială a molidului au loc în lunile iunie și iulie în zonele montane, indicând că temperaturile scăzute din aceste luni pot limita creșterea și, în consecință, pot conduce la inele anuale mai înguste. În timp ce corelația temperaturii de vară cu TRI în perioada timpurie este în concordanță cu acest model fiziologic, răspunsul molidului la temperaturile din vară a scăzut semnificativ în perioada târzie (1986-2021), în special la altitudini peste 1100 m. Aceste TSCS indică faptul că limitările legate de temperatură au dispărut, aspect care poate fi atribuit tendinței continue de încălzire observată la nivel global (Babst et al., 2019). Mai mult de atât, creșterea temperaturilor în regiunile montane s-a produs cu o intensitate mai ridicată comparativ cu media globală (Wang et al., 2014). Rezultatele obținute confirmă observațiile din alte zone unde temperaturile sunt factorul limitativ, și anume că schimbările climatice reduc constrângerile de creștere ale arborilor induse de temperatură (Babst et al., 2019). Tendința de încălzire continuă a schimbat sensibilitatea molidului la temperatură în întreaga Europă (Bošel'a et al., 2014; Schurman et al., 2019; Svobodová et al., 2019), aspect observat și pentru alte specii de arbori (Unterholzner et al., 2024).

În mod interesant, TRI se corelează negativ și semnificativ statistic cu temperatura din vara precedentă în perioada timpurie, respectiv se corelează pozitiv și semnificativ cu SPEI din vara/toamna anterioară în perioada târzie, în special la altitudini intermediare. Corelația dintre temperatura din sezonul de creștere precedent și TRI este legată de memoria temporală a creșterii (Klesse et al., 2023) și de dinamica carbohidraților non-structurali (Michelot et al., 2012). O vară caldă poate favoriza înflorirea și producția de semințe la molid, ceea ce ar putea duce la o reducere a creșterilor și, prin urmare, la o reducere a TRI în anul următor (Hacket-Pain et al., 2019). Cu toate acestea, datele despre fructificație nu sunt disponibile pentru suprafețele de cercetare din acest studiu. Prin urmare, o analiză detaliată bazată pe alte baze de date, cum ar fi ICP Forests (<http://icp-forests.net>), ar putea să ofere informații asupra acestor mecanisme fiziologice.

#### 6.4.2 Efecte variabile ale schimbărilor climatice asupra sensibilității molidului la disponibilitatea apei

Disponibilitatea apei, exprimată în forma precipitațiilor totale sau a indicelui de secetă SPEI, este un factor important al creșterii molidului la nivel global (Jevšenak et al., 2021; Lévesque et al., 2013; Vitali et al., 2017). Similar cu cercetările anterioare care indicau schimbarea factorilor limitativi de la temperatura la disponibilitatea apei (Babst et al., 2019, 2013), s-a constatat că temperatura din vară nu mai este factorul limitativ principal la altitudini mari, unde disponibilitatea de apă în primăvară a devenit din ce în ce mai importantă pentru creșterea arborilor. O interpretare a acestui semnal este legată de o creștere a importanței zăpezii în refacerea conținutului de apă din sol la altitudini mari la începutul sezonului de vegetație. Rezultate similare au fost raportate în pădurile naturale din Munții Călimani, partea nordică a Carpaților Orientali, unde precipitațiile din iarnă sub formă de zăpadă reprezintă o resursă importantă de apă pentru pădurile de molid (Björklund et al., 2019; Schurman et al., 2019). Zăpada poate juca un rol important în menținerea umidității pentru solurile montane, care tind să fie superficiale. Aceste rezultate evidențiază vulnerabilitatea la secetă indusă de schimbările climatice la altitudini mari în Carpații Orientali. Motivul pentru care nu s-a observat acest fenomen la altitudini intermediare rămâne însă neclar, dar ar putea fi legat de proprietățile diferite ale solului și, astfel, de un efect mai redus al topirii zăpezii la altitudini intermediare.

#### 6.4.3 Altitudinea și continentalitatea influențează schimbările temporale a sensibilității la factorii climatici (TSCS) în Carpații Orientali

Rezultatele obținute au evidențiat diferențe în relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere în raport cu altitudinea, similar cu rezultatele altor cercetări (Kolář et al., 2017; Ponocná et al., 2016; Sidor et al., 2015). Cu toate acestea, cercetările întreprinse au indicat tendințe semnificative în schimbările temporale în sensibilitatea la factorii climatici (TSCS) în funcție de altitudine, subliniind că altitudinea modulează atât răspunsul arborilor la factorii climatici, cât și TSCS. Gradientul altitudinal a avut cea mai mare importanță (69%) în modelul de cuantificare a variabilității TSCS pentru SPEI-ul de vară, cele mai intense modificări ale sensibilității fiind observate la altitudini joase. Creșterea TSCS pentru temperatura din timpul iernii la altitudini înalte ar putea fi legată, așa cum s-a menționat anterior, de lipsa zăpezii și posibile schimbări în startul sezoanelor vegetative. Aceste schimbări evidențiază necesitatea de a cuantifica adaptabilitatea și capacitatea de reziliență a molidului la noile condiții climatice pentru o gestionare durabilă în Carpați.

În plus față de altitudine, modelele calibrate au indicat diferențe semnificative și în raport cu gradientul longitudinal (de la est la vest), în timp ce gradientul latitudinal (de la nord la sud) nu a prezentat diferențe semnificative. Variabilitatea opusă a gradientului altitudinal și cel longitudinal este parțial corelată ( $r = -0,481$ ), susținând ipoteza că aceste variabile influențează TSCS relativ independent una de cealaltă. De asemenea, valori scăzute ale coeficienților de corelație ( $r < 0,1$ ) între latitudine și longitudine au confirmat că aceste variabile influențează TSCS independent, dar cu o importanță diferită. Carpații sunt considerați una dintre principalele forme de relief din Europa de Sud-Est (UNEP, 2008) și formează o barieră naturală între Europa de Est rece și continentală și Europa Centrală temperată. Prin urmare,

acest lanț muntos cu relief variat și fragmentare intensă induce diferențe climatice de-a lungul transectului est-vest, accentuând în special un efect de continentalitate spre est. Cele mai multe TSCS pentru disponibilitatea de apă au apărut în partea estică a Carpaților, la o longitudine mai mare de 25,5°E, identificată anterior ca un „punct fierbinte” al schimbărilor climatice în Europa de Est (Hlásny et al., 2016). Rezultatele obținute au confirmat că o schimbare rapidă a climatului, împreună cu un răspuns întârziat al arborilor, induce o vulnerabilitate ridicată a molidului în regiune.

## 6.5 Concluzii

Carpații găzduiesc cea mai mare suprafață de păduri din Europa de Est, cu o importanță majoră în furnizarea de servicii ecosistemice (Mráz și Ronikier, 2016). Evaluarea și înțelegerea stării pădurilor și a reacțiilor acestora la schimbările climatice reprezintă un pas important pentru gestionarea durabilă a pădurilor și continuitatea furnizării serviciilor ecosistemice. În contextul schimbărilor de mediu globale, rezultatele obținute oferă perspective noi cu privire la modul în care factorii climatici influențează creșterea molidului în Carpații Orientali. Prin utilizarea unei cuantificări matematice a schimbărilor temporale în sensibilitatea la factorii climatici de-a lungul unui gradient atât altitudinal, cât și de continentalitate, cercetările evidențiază trei rezultate importante. În primul rând, temperatura din timpul verii a devenit mai puțin limitativă pentru creșterea molidului la altitudini înalte. În al doilea rând, a fost evidențiată o extindere a perioadei de sensibilitate a creșterii la disponibilitatea apei, care se întinde până vara târziu/toamnă și devine o caracteristică comună pentru majoritatea suprafețelor de cercetare, la altitudini joase. În al treilea rând, schimbările temporale în sensibilitatea la factorii climatici a molidului sunt variabile de-a lungul gradientelor luați în considerare în Carpații Orientali. În ansamblu, aceste schimbări observate în modelele de sensibilitate la factorii climatici în decursul decadelor trecute sugerează schimbări semnificative în sensibilitatea molidului și, în consecință, o reducere a capacității de creștere în contextul schimbărilor climatice continue din Carpații Orientali.



## 7. NON-LINEARITATE ÎN RĂSPUNSUL MOLIDULUI LA FACTORII CLIMATICI

Andrei Popa, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Michal Bosela, 2024b, *Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians*, Environmental Research, 119073, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119073>, Q1; IF=7,7

### 7.1 Introducere

În mod uzual, relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială sunt evaluate prin analiza corelației liniare datorită simplității modelului matematic (Matisons et al., 2021a). Cu toate acestea, aplicarea acestei metode poate distorsiona rezultatele, deoarece răspunsurile ecologice și fiziologice ale arborilor la factorii de mediu sunt în general non-liniare și au o formă de clopot (Wilmking et al., 2020). În condiții optime, creșterea arborilor urmează o curbă sigmoidă asimptotică formată dintr-o fază exponențială pozitivă și o rată de creștere aplatizată. Studiile recente au evidențiat non-liniaritatea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere în mai multe zone și pentru mai multe specii (Bozkurt et al., 2021; Matisons et al., 2021b). Cu toate acestea, răspunsuri relativ liniare ale arborilor la anumiți factori de mediu pot fi întâlnite în zone unde sensibilitatea climatică este ridicată (ex. la limita superioară a pădurii) (Wilmking et al., 2020). Astfel, abordarea clasică de evaluare a relațiilor liniare dintre factorii climatici și procesele de creștere poate fi depășită, fiind necesare noi metode pentru a înțelege pe deplin aceste relații complexe.

Carpații Orientali reprezintă una dintre cele mai mari și mai continue zone unde molidul apare natural (Caudullo et al., 2016). Mai mult de atât, deoarece molidul se află, în această zonă, la limita sud-estică a arealului său natural, acesta este vulnerabil la schimbările climatice. După cunoștințele noastre, în Carpații Orientali nu a fost realizată o evaluare a caracterului non-liniar al relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere pentru molid folosind tehnici de învățare automată. Pentru a aborda acest gol de cunoaștere, s-a analizat o rețea dendrocronologică formată din 158 de suprafețe de cercetare, cuprinzând peste 3000 de arbori de diferite vârste distribuiți de-a lungul gradientelor altitudinali. Obiectivul principal a fost identificarea parametrilor climatici pentru care molidul prezintă un răspuns non-liniar. În conformitate cu obiectivul stabilit au fost adresate următoarele întrebări de cercetare:

Q1: Cum se schimbă sensibilitatea molidului la factorii climatici de-a lungul gradientului altitudinal?

Q2: Cum variază relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere în raport cu vârsta arborilor?

Q3: Sunt relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere predominant liniare?

## 7.2 Material și metode

### 7.2.1 Date climatice

Datorită numărului redus de stații meteorologice în zona de studiu și a distribuției suprafețelor de cercetare pe un gradient altitudinal, a fost utilizat setul de date climatice zilnice European Observation (E-OBS). Baza de date EasyClimate, inițial dezvoltată de Moreno și Hasenauer (2016) și actualizată pentru 2022 de către Pucher (2023), include temperaturile minime, maxime și precipitațiile din 1950, cu o rezoluție spațială de  $1 \times 1$  km. Datele climatice au fost extrase folosind pachetul "easyclimate" în R (Cruz-Alonso et al., 2023). Temperatura medie zilnică a fost derivată ca media temperaturilor minime și maxime. Datele climatice zilnice au fost agregate pentru fiecare sondaj ca medie în cazul temperaturii și ca sumă pentru precipitații la nivel sezonier: sezonul de creștere anterior (aprilie precedent–august precedent), toamna anterioară (septembrie precedent–noiembrie precedent), iarna (decembrie precedent–martie), și sezonul de creștere (aprilie–august).

Pentru a cuantifica influența disponibilității apei asupra creșterii molidului, am folosit Indicele Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirației (SPEI). SPEI a fost calculat pe baza diferenței dintre precipitațiile lunare și evapotranspirația potențială stabilită conform ecuației Hargreaves (Droogers și Allen, 2002). Pentru a analiza influența disponibilității apei la nivel de sezon, au fost calculate valori SPEI cumulative pentru fiecare sezon. Calculul valorilor SPEI s-a realizat folosind pachetul "SPEI" în R (Beguiría et al., 2017).

### 7.2.2 Analiza statistică

Pentru a explora non-liniaritatea relației dintre indicii de creștere radială (RWI) și factorii climatici sezonieri (temperatură și SPEI), s-a aplicat modelul Random Forest Analysis (RFA) drept metodă de regresie multivariată non-parametrică (Breiman, 2001). RFA este o tehnică de învățare automată bazată pe algoritmul arborelui de decizie, care combină principiul selecției aleatorii a caracteristicilor (Genuer et al., 2010). Această metodă permite selectarea și ierarhizarea variabilelor independente ale modelului pe baza importanței acestora (VI). Pentru a măsura importanța variabilelor în mod robust a fost utilizată creșterea erorii medii pătratice (%IncMSE). Acest parametru definește cu cât crește eroarea medie pătratică a variabilelor independente în cazul în care o variabilă este permutată. O valoare mai mare %IncMSE indică o importanță mai ridicată a variabilei independente.

Modelul RFA utilizat a fost format din 150 de arbori, fiecare arbore fiind calibrat în baza unui eșantion extras din întregul set de date, cu înlocuire, utilizând metoda bootstrap. Pentru fiecare arbore de regresie individual, doar două treimi din setul de date au fost folosite pentru calibrare, restul datelor au fost utilizate pentru a estima eroarea modului utilizând metoda out-of-bag (OOB). Eroarea OOB poate fi asociată cu o formă de validare internă și este considerată o estimare fiabilă a corectitudinii modelului RFA, astfel încât nu este necesară o validare suplimentară pe date independente (Breiman, 2001; Li et al., 2019).

Pentru a evalua fiabilitatea modelului RFA bazat pe algoritmul de regresie (pentru variabile continue) s-a utilizat media valorilor reziduale pătratice ( $MSR_{00B}$ ) și procentul de varianță explicat (%VarExp) (Liaw și Wiener, 2002).

Non-liniaritatea în răspunsul creșterii arborilor la factorii climatici a fost evaluată folosind graficele de dependență parțială ale RFA. Acest instrument ajută la vizualizarea relației dintre RWI și o variabilă climatică în timp ce ține cont de efectul mediu al celorlalte variabile independente ale modelului (Friedman, 2001). RFA a fost aplicată pentru întreaga rețea dendrocronologică, pentru fiecare clasă altitudinală și pentru fiecare categorie de vârstă. În analiză au fost folosite pachetele R "randomForest" (Liaw și Wiener, 2002) și "pdp" (Greenwell, 2017).

Toate analizele statistice au fost limitate la perioada 1950–2020, perioada comună între setul de date dendrocronologice și datele climatice.

## 7.3 Rezultate

### 7.3.1 Non-liniaritate în creșterea arborilor și relațiile cu factorii climatici

Pentru întreaga rețea dendrocronologică, cel mai important predictor în RFA a fost indicele de disponibilitate a apei (SPEI). Cel mai important sezon, conform criteriilor %IncMSE, este SPEI din sezonul de creștere, urmat de SPEI din toamna anterioară (Fig. 7.1). În legătură cu SPEI din sezonul de creștere curent, s-a observat o scădere a importanței variabilei odată cu altitudinea - adică valori mai mari la altitudini joase (<1100 m; %IncMSE: 41%) și valori mai scăzute la altitudini înalte (>1100 m; %IncMSE: 29%). Pentru temperatură, cele mai mari valori ale importanței variabilelor au fost înregistrate în toamna anterioară (%IncMSE: 43%) și în sezonul de iarnă (39%). Pentru temperaturile din toamna anterioară, s-a observat o ordonare clară a importanței variabilei în funcție de altitudine. Rezultatele obținute nu au arătat diferențe semnificative în importanța variabilelor în funcție de clasele de vârstă.

În raport cu a treia întrebare de cercetare (Q3), s-a analizat non-liniaritatea în răspunsul modelului la factorii climatici în funcție de altitudine (Fig. 7.2). Analiza RFA a evidențiat modele lineare și non-lineare ale relației dintre creșterea modelului și factorii climatici. S-a observat o dependență relativ liniară a RWI față de temperatura din sezonul de creștere anterior (dependență negativă), cu excepția situației de la altitudini joase (Fig. 7.2E). De asemenea, s-a raportat o dependență liniară pentru temperaturile din iarnă, cu o ușoară scădere pentru temperaturi pozitive la altitudini < 800 m (Fig. 7.2G). S-a observat o dependență în formă de clopot a RWI față de temperaturile din toamna anterioară și sezonul de creștere curent (Fig. 7.2F și 7.2H). În cazul temperaturilor din toamna anterioară, s-au observat valori scăzute ale RWI pentru temperaturi medii sub 3°C la altitudini mari și sub 5°C la altitudini < 1100 m. Mai mult, RWI au scăzut pentru temperaturi din toamna anterioară de peste 7°C la altitudini mai mari de 1100 m și între 9–10°C la altitudini mai joase. În sezonul de creștere curent, pentru altitudini sub 1400 m, s-au identificat praguri clare după care creșterea a fost influențată negativ de temperaturile ridicate. Pentru altitudini peste 1400 m, o creștere a temperaturii medii până la 9°C a favorizat creșterea radială, și nu s-a observat o influență evidentă după acest prag. De asemenea, pentru sezonul

de creștere curent, rezultatele au evidențiat o deplasare a curbei de dependență pentru temperatură odată cu creșterea altitudinii.

Non-liniaritatea modelelor pentru relația dintre factorii climatici și procesele de creștere a fost evidentă în cazul disponibilității apei (SPEI) (panoul Fig. 7.2 SPEI). Dependența creșterilor față de deficitul de apă are o variabilitate în trepte, cu excepția SPEI din iarnă, unde s-a observat o dependență în formă de clopot (Fig. 7.2C). În anul anterior formării inelului anual, valorile SPEI  $< -1$  au avut un impact negativ asupra creșterii molidului. Mai mult, la altitudini joase a fost observat un impact negativ mai pronunțat față de disponibilitatea de apă în toamna anterioară (SPEI  $< -1$ ) în comparație cu alte clase de altitudine. SPEI din iarnă, drept indicator al cantității de zăpadă, are un impact clar asupra creșterii molidului. La altitudini mari, lipsa zăpezii (SPEI  $< -1.5$ ) a afectat negativ creșterea arborilor, în timp ce la altitudini joase, zăpada excesivă a avut un efect negativ. În sezonul de creștere, RWI a scăzut din cauza unui SPEI scăzut ( $< -1$ ) la toate altitudinile, cea mai mare reducere s-a observat la altitudini  $< 800$  m. În ceea ce privește vârsta, arborii mai tineri au beneficiat mai mult de valorile SPEI  $> 1$  în toamna anterioară. Pe de altă parte, SPEI din iarnă - cantitatea de zăpadă - a fost mai importantă pentru arborii mai în vârstă, în special la altitudini peste 800 m.

## 7.4 Discuții

Rezultatele au oferit răspunsuri la întrebările de cercetare formulate inițial: (Q1) În legătură cu altitudinea, s-a constatat că la altitudini joase creșterea molidului este în principal limitată de disponibilitatea apei, în timp ce temperaturile de iarnă au o influență redusă de-a lungul gradientului altitudinal; (Q2) s-a constatat că, în general, există diferențe minore în sensibilitatea molidului față de disponibilitatea apei și temperatură în funcție de vârstă; și (Q3) modelele RFA au arătat că non-liniaritatea răspunsului molidului la factorii climatici este specifică sezonului - în special, temperaturile din toamna anterioară și sezonul de creștere curent, împreună cu disponibilitatea apei în timpul iernii, induc un răspuns în formă de clopot.

### 7.4.1 Răspunsul non-linear al molidului la factorii climatici este specific unor sezoane

Procese fiziologice sunt fenomene complexe și reprezintă suma interacțiunilor dintre factorii de mediu, climatici și genetici. Activitatea fotosintetică crește odată cu creșterea temperaturii, urmată de o stare de saturație și apoi de inhibare. Creșterea arborilor, ca rezultat al proceselor de asimilație, este de obicei limitată de cei mai mulți factori, iar aceste limitări nu sunt liniare, și urmează o formă de clopot (Wilmking et al., 2020). În prima parte a curbei există o limitare puternică, urmată de o reducere graduală până la atingerea condițiilor optime. După anumite praguri la care apare saturația, factorul limitativ devine inhibitor (vezi caseta 2 în Wilmking et al., 2020). Acest răspuns non-liniar clar al creșterii molidului la factorii climatici a fost observat în modelele RFA pentru anumite sezoane specifice.

Unul dintre cele mai clare modele în formă de clopot a fost cel care descrie influența temperaturilor din toamna precedentă asupra creșterii molidului (Fig. 7.2F). La altitudini mari, s-a observat o creștere a RWI odată cu creșterea temperaturilor până la 3°C, după care temperaturile mai ridicate au atins pragul

optim. Nu s-a identificat niciun efect de inhibare, fapt care a dus la concluzia că, chiar și în contextul încălzirii globale actuale, pentru molidul de la altitudini > 1400 m, temperatura nu a înregistrat o stare de saturație. Cu toate acestea, la altitudini medii (800–1400 m), am putut observa toate cele trei părți ale formei de clopot - și anume fazele de limitare, saturație și inhibare - sugerând că molidul se afla în intervalul optim la aceste altitudini. Interesant este că la altitudini mai joase s-a observat doar faza de saturație și faza de inhibare. Acest fapt reflectă o stare de stres pentru molid, aspect care pot conduce la declinul molidului, așa cum s-a întâmplat în alte părți ale Europei din cauza valurilor de căldură și a secetei.

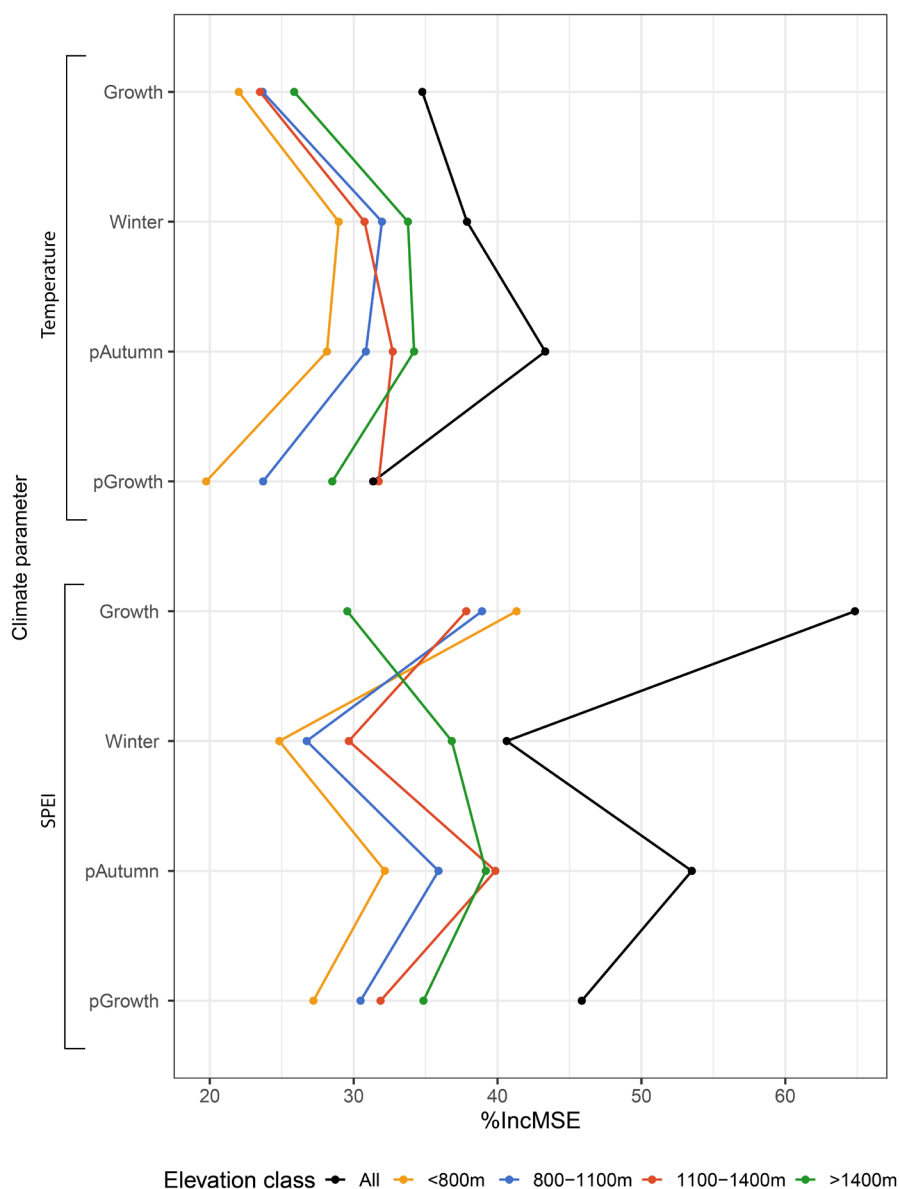


Figura 7.1 Importanța variabilelor climatice (temperatură și Indice Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirației: SPEI) asupra creșterii molidului în perioada 1950–2020 evaluată prin metoda Random Forest Analysis (RFA) în funcție de clasele de altitudine.

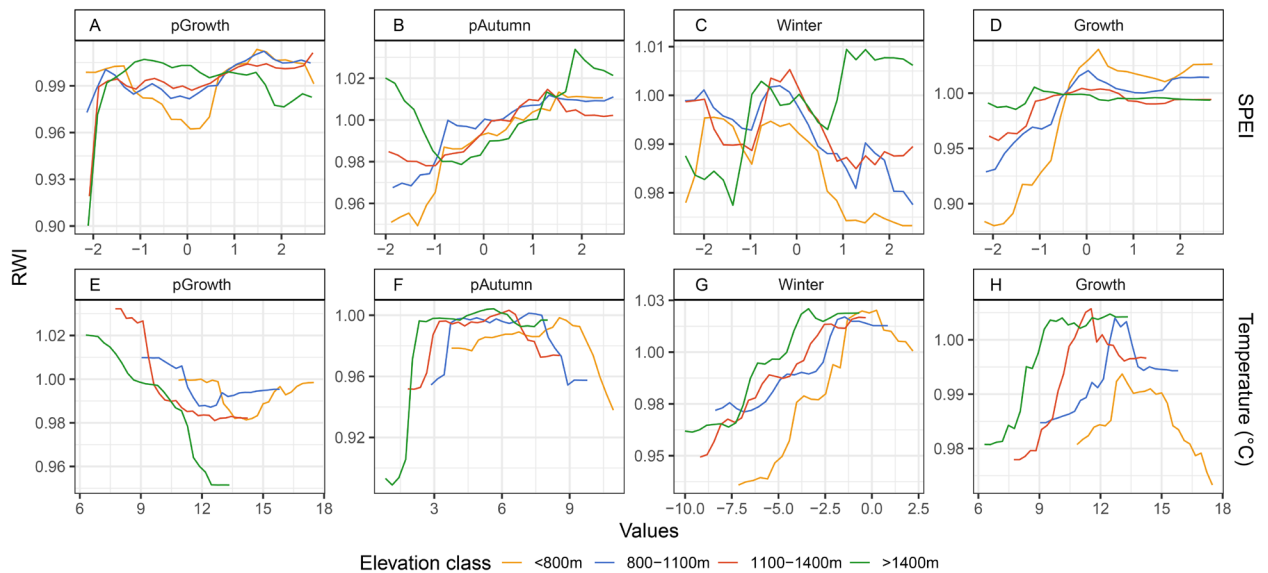


Figura 7.2 Grafice de dependență parțială a creșterii molidului față de factorii climatici sezonieri (A-D) Indice Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirației (SPEI) și (E-H) temperatură ( $^{\circ}\text{C}$ ) în raport cu clasele de altitudine.

Pentru sezonul curent de creștere, s-au observat diferențe în pragul la care temperatura a limitat sau inhibat creșterea molidului, ca rezultat al influenței altitudinii asupra regimului termic (temperaturile scad, în general, cu  $0,6^{\circ}\text{C}$  la fiecare creștere de 100 m în altitudine (Barry, 1992)). Acest prag diferit al temperaturilor din sezonul de creștere este probabil direct legat de activitatea cambială, al cărei debut anual variază în funcție de gradientul altitudinal (Tremblay et al., 2015). Similar, la altitudini înalte, ca și în cazul temperaturilor din toamna precedentă, nu s-a observat o fază de inhibare a temperaturii din sezonul curent de creștere. La altitudini  $< 1400$  m, a existat o dependență clară în formă de clopot a creșterii molidului față de temperatura din sezonul curent de creștere. Un aspect important a putut fi observat la altitudini joase: indiferent de pragurile de temperatură, valorile RWI au fost sub 1. Aceste rezultate arată că molidul, la altitudini joase, se confruntă cu limitări importante din cauza temperaturilor ridicate. Informațiile obținute pot fi asociate cu o reducere severă a creșterii (până la 30% din creșterea în suprafața de bază) în acest interval altitudinal în ultimele două decenii (Popa et al., 2024a).

Non-linearitatea nu a prezentat o formă clară de clopot în ceea ce privește disponibilitatea apei bazată pe SPEI, cu excepția sezonului de iarnă, unde precipitațiile apar sub formă solidă (zăpadă). La altitudini mari ( $> 1400$  m), grosimea mai mică a stratului de zăpadă a influențat negativ RWI, în timp ce cantitățile de zăpadă peste medie (SPEI  $> 1$ ) au favorizat creșterea radială. Iarna, zăpada joacă un rol important în ecosistemele forestiere, asigurând o acoperire protectoare pentru rădăcinile arborilor împotriva înghețului. În același timp, zăpada poate limita adâncimea de îngheț a solului, ceea ce conduce la un start mai rapid al transportului apei de către rădăcini în primăvară. Mai mult, s-a raportat că zăpada din zonele montane acționează ca o rezervă de apă pentru solurile superficiale (Beniston et al., 2003). Efectul negativ al lipsei zăpezii (SPEI  $< -2$ ) scade odată cu scăderea altitudinii, confirmând astfel ipoteza legată de stratul protector de zăpadă. La altitudini joase, probabilitatea de apariție a unor temperaturi extrem de scăzute este mai mică în comparație cu altitudinile înalte din zonele montane. Pe de altă

parte, influența pozitivă a zăpezii la altitudini înalte se schimbă și are un efect inhibitor la altitudini mai joase. O posibilă explicație a acestei ipoteze poate fi legată de faptul că zăpada excesivă la sfârșitul iernii poate întârzia procesul de xilogenează.

## **7.5 Concluzii**

Molidul este cea mai răspândită specie de conifere din Europa. În contextul schimbărilor climatice, această specie se confruntă cu probleme majore în Europa Centrală. În prezent, declinul molidului în partea estică a Europei are loc la rate mai reduse comparativ cu alte zone ale Europei. Prin urmare, pentru a înțelege mai bine viitorul acestei specii, cercetările întreprinse oferă perspective noi asupra influenței factorilor climatici asupra creșterii molidului. Rezultatele arată că molidul este mai limitat de disponibilitatea apei comparativ cu temperaturile. Mai mult, non-linearitatea în relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere radială este specifică unor sezoane; respectiv temperaturile din toamna precedentă și sezonul curent de creștere, împreună cu disponibilitatea apei în timpul iernii, induc un răspuns în formă de clopot.

## 8. CUANTIFICAREA RELAȚIILOR DIN FACTORII CLIMATICI ȘI PROCESELE DE CREȘTERE RADIALĂ CU AJUTORUL DIFERIȚILOR PARAMETRII AI INELELOR ANUALE

Andrei Popa, Ionel Popa, Cătălin-Constantin Roibu, Ovidiu Nicolae Badea, 2022, *Do Different Tree-Ring Proxies Contain Different Temperature Signals? A Case Study of Norway Spruce (Picea abies (L.) Karst) in the Eastern Carpathians*, *Plants* 11, 18: 2428. <https://doi.org/10.3390/plants11182428>, Q1; IF = 4.5

### 8.1 Introducere

Studiile dendrocronologice analizează modul în care arborii sunt influențați de factorii climatici și modul în care speciile de arbori se adaptează la noile condiții climatice, dar în același timp oferă informații despre variabilitatea factorilor climatici din trecut (Fritts, 1976). Inelele anuale pot fi folosite drept un indicator important pentru a evidenția variațiile anuale ale factorilor climatici (Jones et al., 2009). Principalul parametru al inelelor anuale folosit în dendrocronologie este lățimea inelului anual (TRW). Cu toate acestea, în unele cazuri, TRW nu oferă un semnal climatic puternic și robust comparativ cu alți parametri ai inelelor anuale, cum ar fi densitatea maximă a lemnului târziu (MXD) sau izotopii stabili (Nagavciuc et al., 2019). De obicei, pentru a determina MXD, este necesar un echipament costisitor impunând limitări în utilizarea acestui parametru. Un parametru relativ nou (reflectanța în albastru măsurată pe imagini scanate – intensitatea în albastru, BI) a fost dezvoltat pentru a răspunde acestor limitări (Rydval et al., 2014). BI este un parametru care cuantifică lumina reflectată măsurată la lungimi de undă specifice spectrului de culori în albastru. Studiile au arătat o corelație puternică peste  $r = 0,95$  ( $p < 0,05$ ) între BI și MXD (Wilson et al., 2014). BI are un semnal climatic mai puternic în ecosistemele forestiere unde factorul limitativ este temperatura comparativ cu TRW și este mai puțin sensibil la perturbări (Björklund et al., 2013; Wilson et al., 2014). Pe baza acestor rezultate, BI poate fie utilizat ca substitut pentru MXD.

În același timp, creșterea în suprafața de bază (BAI) reprezintă un indicator bidimensional, specific pentru suprafața inelului anual. Creșterea în suprafața de bază este mai mult legată de acumularea biomasei arborelui și de productivitatea arboretului. Mai mult, BAI este un parametru care poate reflecta variabilitatea creșterilor cu frecvențe joase și medii (Biondi și Qeadan, 2008; Han et al., 2022).

În acest studiu, s-au determinat semnalele climatice cuantificate în trei parametri dendrocronologici (TRW, BAI și BI) ai molidului dintr-o depresiune intramontană din Carpații Orientali, de-a lungul unui gradient altitudinal. Întrebările specifice de cercetare au fost:

- Cum influențează temperatura aerului creșterea molidului într-o depresiune intramontană a Carpaților?
- Este stabilă în timp corelația dintre temperatură și parametrii inelelor anuale?



## 8.2 Material și metode

### 8.2.1 Zona de studiu

Studiul a fost realizat în zona Gheorgheni, o depresiune intramontană extinsă situată în centrul Carpaților Orientali (România). Altitudinea în regiunea studiată variază de la 700 m la 1770 m. Zona de studiu este localizată între 46°37'N, 25°25'E și 46°50'N, 25°36'E. Geologia generală a zonei este reprezentată de un complex vulcano-sedimentar.

### 8.2.2 Colectarea probelor de creștere și procesarea datelor

Pentru a investiga efectul altitudinii asupra creșterilor molidului, au fost colectate carote de creștere din 12 suprafețe de cercetare: cinci locații la altitudini joase (altitudinea a variat de la 880 m la 1020 m) și șapte locații la altitudini înalte (altitudinea a variat de la 1510 m la 1630 m). În fiecare zonă de studiu, au fost selectați 15-20 de arbori dominanți, sănătoși pentru a extrage carotele de creștere. Strategia de eșantionare aplicată a vizat arbori maturi. O singură carotă de creștere per arbore a fost extrasă folosind un burghiu Pressler de 5 mm la înălțimea pieptului (1,3 m). Pentru fiecare arbore eșantionat, s-au măsurat cu clupa forestieră 2 diametre perpendiculare la înălțimea pieptului (DBH). Media acestor două diametre a fost utilizată pentru a calcula BAI. Toți cei trei parametri ai inelelor anuale (TRW, BAI și BI) au fost măsurați/calculați pentru aceleași carote de creștere. Pentru analiză a fost selectat un set de 50 de carote pentru fiecare nivel de altitudine (altitudini joase și înalte). Pentru a obține valori BI fiabile, au fost selectate doar carote fără decolorare din cauza ciupercilor, fără goluri și cu inele paralele, respectiv carote care conțineau măduva sau care permiteau determinarea ușoară a numărului de inele lipsă.

Molidul este o specie de conifere fără diferențe vizibile între alburn și duramen. În baza acestei caracteristici a lemnului de molid, este posibilă măsurarea reflectanței în albastru a lemnului târziu fără tratamente chimice (Björklund et al., 2015). Pentru a măsura reflectanța în albastru a lemnului târziu, s-a respectat protocolul standard (Campbell et al., 2011; Rydval et al., 2014). Setările parametrilor ferestrei au fost ajustate conform Rydval et al., (2014). Măsurătorile parametrilor inelelor anuale (TRW și BI) au fost realizate cu ajutorul programului informatic CooRecorder pe imagini scanate (Maxwell și Larsson, 2021). Nu s-au observat inele lipsă sau inele false. BAI a fost reconstituit pentru fiecare inel individual și ajustat în funcție de diametrul mediu DBH al fiecărui arbore.

Pentru fiecare parametru analizat al inelelor anuale, au fost calculate 2 cronologii, una pentru altitudini joase și a doua pentru altitudini înalte. Indicii de creștere standardizați au fost calculați ca raport între măsurătorile brute și valorile ajustate. Pentru a elimina autocorelația, s-a aplicat un model autoregresiv. În analiză, s-au folosit cronologiile reziduale ale indicilor obținute prin media bi-ponderată fără stabilizarea varianței. Standardizarea, calcularea cronologiei și a parametrilor statistici s-a realizat folosind pachetul „dplR” în R (Bunn, 2008).

### 8.2.3 Setul de date climatice

Două stații meteorologice locale, Joseni (750 m) - stație meteorologică din depresiune și Bucin (1282 m) - stație meteorologică de la altitudine, au furnizat datele climatice (temperatura medie zilnică). Datele climatice sunt disponibile din 1963 pentru stația meteorologică Joseni și din 1978 pentru stația meteorologică Bucin. Prin urmare, intervalul analizat a fost limitat la perioada comună, 1978-2019.

### 8.2.4 Cuantificarea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere radială

Disponibilitatea datelor locale privind temperatura zilnică a aerului din zona de studiu ne-a permis să analizăm relația dintre factorii climatici și procesele de creștere radială pentru sezoane cumulative (Jevšenak, 2019). Temperaturile zilnice au fost agregate în ferestre temporale mobile de 21 de zile până la 120 de zile, începând din luna iunie a anului precedent până în octombrie din sezonul de creștere curent. Corelația dintre cronologiile indicilor reziduali și temperaturile cumulative zilnice, precum și stabilitatea în timp, au fost calculate folosind pachetul „dendroTools” din R (Jevšenak și Levanič, 2018).

## 8.3 Rezultate și discuții

### 8.3.1 Relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere pentru trei parametri ai inelelor anuale

Cronologiile indicilor reziduali TRW se corelează pozitiv cu temperaturile din iarnă (lungimea sezoanelor cumulative de la 21 la 120 de zile) (Fig. 8.1). Coeficientul de corelație dintre cronologia indicilor TRW la altitudini înalte și temperatura medie de la stația meteorologică de altitudine (Bucin) are cea mai ridicată valoare ( $r = 0,494$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) pentru perioada 3 decembrie - 18 ianuarie. Cronologia indicilor TRW la altitudini joase are cea mai ridicată corelație ( $r = 0,485$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) cu temperatura medie din perioada 1 noiembrie - 12 februarie de la stația meteorologică de la altitudine. În ceea ce privește corelația dintre indicii reziduali TRW și temperatura aerului din timpul iernii de la stația meteorologică din depresiune, corelațiile maxime au fost mai reduse ( $r = 0,442$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$  pentru cronologia de la altitudini înalte și  $r = 0,435$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$  pentru cronologia de la altitudini joase).

În plus, cronologia indicilor reziduali de la altitudini joase prezintă o corelație pozitivă și semnificativă cu temperatura din primăvară (înregistrată în depresiune) din martie până în aprilie ( $r = 0,374$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ). Pentru ambele cronologii, de la altitudini joase și înalte, este prezentă o corelație negativă între indicii reziduali și temperaturile medii din sezonul de vegetație anterior (luna iulie). Corelația negativă maximă dintre cronologiile TRW și temperatura din vară anterioară variază de la  $r = -0,502$  ( $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) pentru seria de la altitudini joase (temperatura de la stația meteorologică de la altitudine) la  $r = -0,462$  ( $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) pentru seria de la altitudini înalte (temperatura de la stația meteorologică de la altitudine). O corelație negativă semnificativă între indicii TRW și temperatura din toamna anterioară s-a observat numai la altitudini joase, indiferent de stația meteorologică.

O corelație pozitivă între TRW și temperaturile din decembrie a fost raportată și pentru alte arborete din Carpații Orientali (Sidor et al., 2015). În zonele montane, și în special la altitudini înalte, creșterea

molidului este de obicei corelată pozitiv cu temperaturile de vară (Bouriaud și Popa, 2009; Leonelli și Pelfini, 2008; Levanič et al., 2009; Ponocná et al., 2016; Savva et al., 2006; Sidor et al., 2015). Corelația pozitivă dintre cronologiile indicilor TRW și temperaturile de iarnă la o altitudine mai mare de 1500 m nu este un model dendroclimatic comun pentru molid. Explicația posibilă pentru aceste corelații ar putea fi legată de frecvența ridicată a inversiunilor termice în timpul iernii.

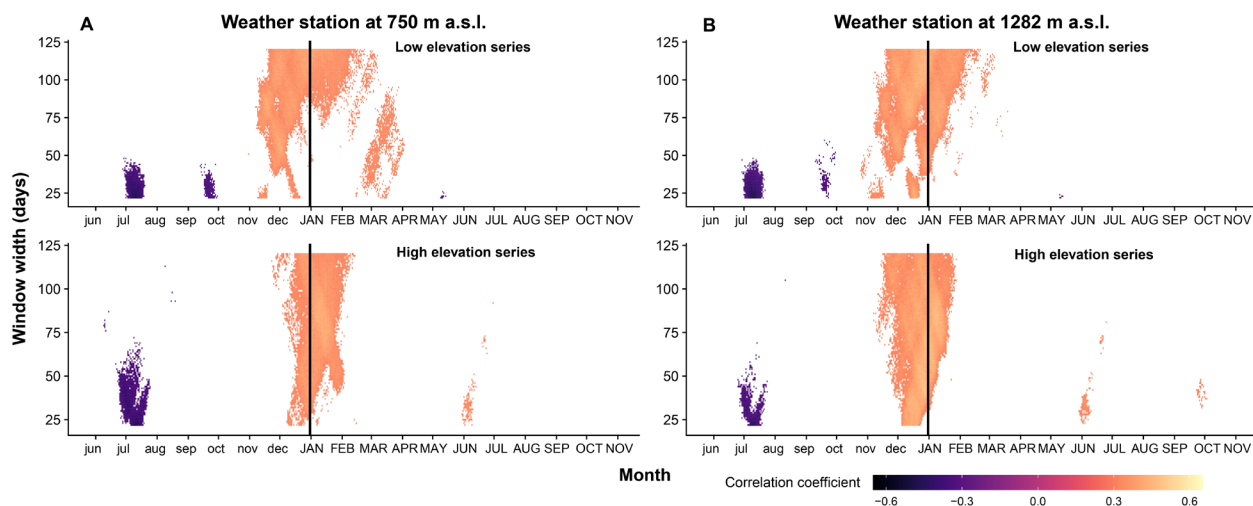


Figura 8.1 Corelația dintre cronologiile indicilor reziduali TRW și temperatura zilnică cumulată de la stația meteorologică din depresiune (Joseni) (stânga) și de la stația meteorologică de altitudine (Bucin) (dreapta) (linia verticală neagră reprezintă limita dintre anul precedent (cu litere mici) și anul curent (cu litere mari))

Modelul de corelație al cronologiilor indicilor reziduali BAI cu temperaturile diferă în funcție de altitudine (Fig. 8.2). Corelația dintre cronologia indicilor BAI la altitudini înalte și temperaturile de iarnă înregistrate la stația meteorologică de altitudine este semnificativă și are o valoare mai ridicată pentru perioada 26 noiembrie - 18 februarie. Interesant este faptul conform căruia corelația pozitivă dintre temperaturile din iarnă-primăvară și cronologia BAI de la o altitudine joasă nu mai este semnificativă atunci când sunt utilizate temperaturile de la stația meteorologică de la altitudine. În ceea ce privește cronologia indicilor BAI la altitudini înalte, modelele de corelație cu temperaturile medii de la ambele stații meteorologice sunt similare. În perioada de iarnă, corelația cu temperaturile din stația meteorologică din depresiune este semnificativă pentru lungimi mai mari ale sezonelor cumulative.

Comparativ cu modelul dendroclimatic pentru TRW, în cazul BAI s-a observat o relație pozitivă cu temperatura din timpul verii. Cea mai mare corelație a fost înregistrată între cronologia BAI de la altitudini înalte și temperaturile cumulative de la stația meteorologică din depresiune, din 17 mai până în 22 iulie ( $r = 0,468$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ). O corelație pozitivă cu temperatura din vară și procesele de creștere din anul curent este logică pentru cronologia de la altitudini înalte, deoarece temperatura este un factor limitativ pentru aceste ecosisteme (Levanič et al., 2009). Corelația negativă ( $r = -0,507$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) între cronologia reziduală BAI de la altitudini joase și temperaturile din vara precedentă este semnificativă pentru perioade cumulative de 29 de zile (a doua jumătate a lunii iunie până la mijlocul lunii iulie) pentru datele furnizate de ambele stații meteorologice. Bouriaud și Popa, (2009) au

evidențiat că temperaturile mai ridicate din timpul verii pot induce o rată ridicată a respirației, cu efecte negative asupra rezervelor de carbohidrați folosite în prima fază de creștere a anului următor. Capacitatea fotosintetică din vara precedentă are un efect semnificativ asupra lățimii inelului din anul curent (Kozłowski și Pallardy, 1997; Selås et al., 2002).

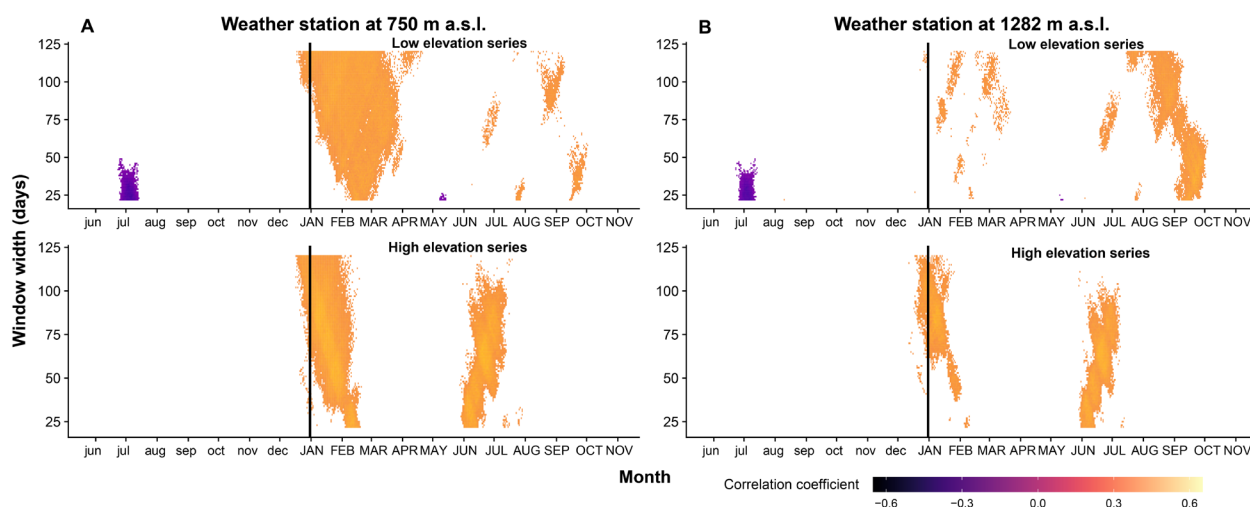


Figura 8.2 Corelația dintre cronologiile indicilor reziduali BAI și temperatura zilnică cumulată de la stația meteorologică din depresiune (Joseni) (stânga) și de la stația meteorologică de la altitudine (Bucin) (dreapta) (linia verticală neagră reprezintă limita dintre anul precedent (cu litere mici) și anul curent (cu litere mari))

Doar pentru cronologia BI de la altitudini înalte s-a identificat un model clar de corelație pozitivă și semnificativă cu temperatura (Fig. 8.3). Cea mai ridicată corelație între cronologia reziduală BI de la altitudini înalte și temperaturile din vara/toamna de la stația de la altitudine este 0,551,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$  pentru sezoane cumulative de 59 de zile (a doua jumătate a lunii august până la începutul lunii octombrie). O corelație neobișnuită a fost găsită între indicele BI și temperatura din iarnă de la stația meteorologică din depresiune. Aceasta poate fi o corelație fals pozitivă, deoarece este puțin probabil ca temperatura din iarnă să aibă o influență asupra densității lemnului de la sfârșitul verii. Corelația dintre cronologia BI de la altitudini joase și temperatura medie din vara precedentă este negativă și semnificativă ( $r = -0.481$ ,  $p < 0,05$ ,  $n = 41$ ) pentru un sezon cumulativ de 28 de zile; respectiv 19 iunie - 17 iulie. Nu s-a observat o corelație semnificativă între indicele BI și temperatura din anul precedent în cazul cronologiei de la altitudini înalte.

În mod opus, la altitudini joase, cronologia BI nu prezintă corelații semnificative cu temperaturile din anul curent. Aceasta sugerează că la altitudini sub 1000 m, în această depresiune intramontană, temperatura de la sfârșitul verii nu este un factor limitativ pentru îngroșarea și lignificarea pereților celulari la molid. Acest lucru poate fi legat de un sezon de vegetație mai lung la altitudini joase și de o productivitate mai mare a arboretelor (Levanič et al., 2009). Cea mai ridicată corelație între parametrii inelului anual și temperatură a fost observată pentru cronologiile BI de la altitudini înalte. Aceste modele de corelație BI arată că îngroșarea peretelui celular secundar și procesul de lignificare la altitudini înalte sunt determinate de temperatura de la sfârșitul verii (Gindl et al., 2000). Relația negativă

cu temperatura din anul precedent poate fi explicată prin mecanismele de alocare a carbohidraților pentru producția de semințe, creșterea și formarea mugurilor, cu efecte semnificative asupra rezervelor de nutrienți disponibile pentru debutul creșterii din anul următor (Hacket-Pain et al., 2019; Matisons et al., 2021a). În literatură s-a raportat deja că cronologiile BI, ca substitut pentru densitatea maximă a lemnului târziu, exprimă o relație mai puternică cu temperatura comparativ cu TRW în zonele unde aceasta este principalul factor limitativ (Nagavciuc et al., 2019; Știrbu et al., 2022).

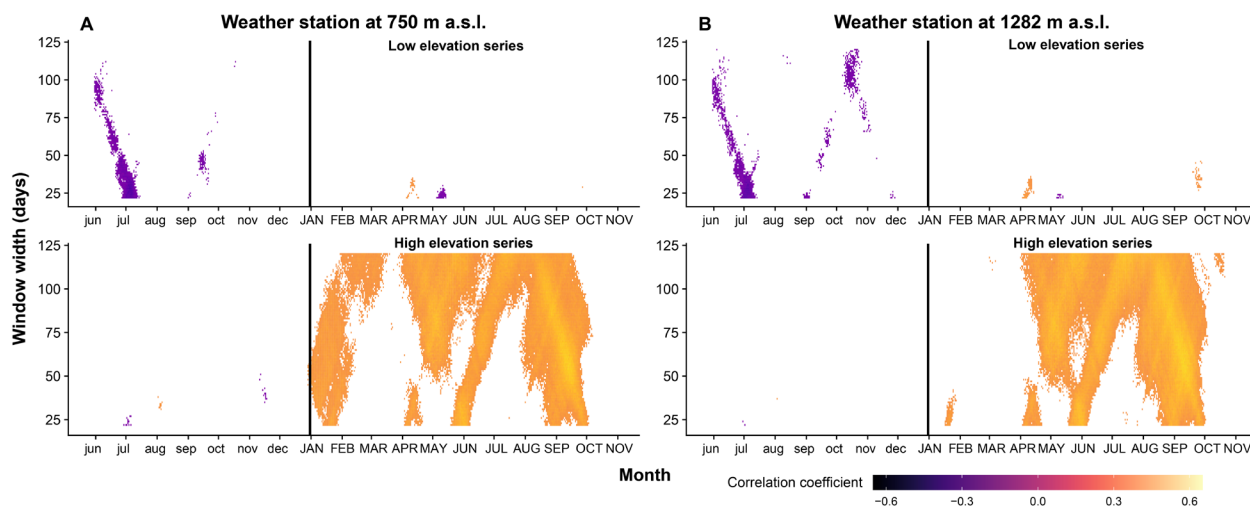


Figura 8.3 Corelația dintre cronologiile indicilor reziduali BI și temperatura zilnică cumulată de la stația meteorologică din depresiune (Joseni) (stânga) și de la stația meteorologică de la altitudine (Bucin) (dreapta) (linia verticală neagră reprezintă limita dintre anul precedent (cu litere mici) și anul curent (cu litere mari))

Lățimea inelului anual sau creșterea în suprafața de bază sunt parametrii ai inelelor anuale care conțin informații agregate despre condițiile climatice pe tot parcursul sezonului de vegetație, dar și despre perturbări. Pe de altă parte, intensitatea în albastru conține informații despre variabilitatea temperaturilor în a doua parte a sezonului de vegetație. Combinarea acestor trei parametri ai inelelor anuale poate oferi o perspectivă integrată asupra relației dintre factorii climatici și procesele de creștere.

## 8.4 Concluzii

Rezultatele obținute arată că fiecare parametru al inelelor anuale conține un semnal climatic diferit. În depresiunea intramontană studiată din Carpații Orientali, creșterea molidului este influențată de temperaturile de iarnă, iar semnalele care confirmă acest aspect sunt prezente atât în cronologiile TRW, cât și în cele BAI. Prezența inversiunilor termice poate explica modelele de corelație obținute. Corelația dintre TRW și temperatura de iarnă este instabilă în timp pentru ambele altitudini, cu schimbări temporale evidente după 1996. Cele mai ridicate corelații ale TRW cu temperaturile au fost obținute pentru sezoane cumulative de 45 de zile la altitudini înalte și pentru sezoane cumulative de 113 zile la altitudini joase, iar ambele sezoane cumulative sunt centrate la începutul lunii ianuarie. BAI la altitudini înalte conține un semnal puternic al temperaturii din mijlocul sezonului de vegetație. În

cazul BI, un semnal climatic clar a fost observat doar pentru cronologia de la altitudini înalte, pentru sezoane cumulative începând din a doua jumătate a lunii august până la începutul lunii octombrie. Rezultatele preliminare obținute în acest studiu trebuie reproduse în alte zone din Carpați pentru a confirma modelul dendroclimatic general.

## 9. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DISEMINAREA REZULTATELOR

### 9.1 Concluzii

În ultimele decenii, schimbările climatice au devenit una dintre principalele provocări cu care se confruntă societatea umană. Pădurile se numără printre ecosistemele cele mai vulnerabile la modificările de mediu. În același timp, pădurile joacă un rol esențial în atenuarea efectelor negative ale schimbărilor climatice. Regulamentele UE (Pactul Verde European și Strategia Uniunii Europene privind Adaptarea la Schimbările Climatice) impun ca toate țările membre să fie neutre din punct de vedere al utilizării carbonului până în 2050. Pe baza acestor obiective, este crucial să înțelegem modul în care speciile de arbori reacționează la încălzirea globală, cum afectează evenimentele extreme reziliența arborilor și care este capacitatea de adaptare a ecosistemelor forestiere.

În Europa, secetele recente au indus o mortalitate fără precedent în ecosistemele forestiere. Aceste probleme determină provocări semnificative pentru sectorul economic; în același timp, biodiversitatea și furnizarea de servicii ecosistemice au fost puternic afectate. Prin urmare, s-au depus eforturi majore pentru a înțelege mecanismele din spatele mortalității pe scară largă a arborilor.

Datorită faptului că modificările condițiilor climatice afectează tiparele de creștere ale arborilor, una dintre cele mai precise metode de evaluare a modelelor de creștere din trecut o reprezintă utilizarea inelelor anuale.

Una dintre cele mai răspândite specii de conifere din Europa și, simultan, una dintre cele mai afectate de schimbările climatice este molidul. În ultimele decenii, monoculturile de molid din Europa Centrală au fost afectate de fenomene de mortalitate pe scară largă. Mai mult, modelele de predicție au arătat că este probabil ca molidul să fie afectat de atacurile gândacilor de scoarță ca agent dăunător secundar în toată Europa din cauza tendinței continue de încălzire. Aceste semnale alarmante au atras atenția atât a sectorului de cercetare, cât și a celui de producție. Pentru a putea adapta practicile actuale de management forestier și pentru a implementa o silvicultură adaptată la climat, sunt necesare informații actualizate privind reziliența molidului, capacitatea de adaptare și răspunsul acestuia la schimbările climatice.

Carpații reprezintă una dintre cele mai largi și continue zone în care molidul se întâlnește în mod natural. Mai mult, acest lanț muntos formează limita extremă sud-estică a distribuției sale naturale în Europa. Acești factori susțin ideea că în aceste regiuni, mortalitatea molidului a fost raportată la rate mai reduse în ultimii ani, făcând din Carpații Orientali cea mai potrivită regiune pentru a analiza condițiile de creștere, reziliența și capacitatea de adaptare a acestei specii.

Scopul acestei teze de doctorat a fost de a evalua vitalitatea și răspunsurile la factorii climatici ale ecosistemelor forestiere gestionate, respectiv monoculturilor de molid, din Carpații Orientali, obținând astfel informații actualizate drept bază pentru dezvoltarea unor practici durabile de management forestier.

Conform golului de cunoștere identificat și obiectivelor de cercetare propuse în această teză de doctorat, și în baza rezultatelor științifice obținute, se pot formula următoarele concluzii:

*1. În ceea ce privește dinamica creșterilor molidului din Carpații Orientali în funcție de altitudine și vârstă (Capitolul 4 bazat pe "Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the Eastern Carpathians" Popa et al., 2024a)*

În general, tendințele pe termen lung în ceea ce privește creșterea molidului, evaluate prin creșterea în suprafața de bază (BAI), au fost negative în perioada 2002-2021 (definită ca perioada de încălzire târzie), evidențiind o reducere a creșterilor în comparație cu perioadele 1962-1981 (definită ca perioada pre-încălzire) și 1982-2001 (definită ca perioada de încălzire timpurie). Aceste tendințe negative au fost mai pronunțate la altitudini joase. Mai mult de atât, s-a constatat că arboretele mai tinere au fost mai afectate. Aceste rezultate sunt în directă legătură cu dinamica seriilor BAI, dar și cu modul de gestionare istorică a monoculturilor de molid din pădurile românești.

În paralel cu tendințele negative ale creșterilor în suprafața de bază, variabilitatea creșterilor (cuantificată prin autocorelația de ordinul întâi și abaterea standard a BAI) indică că, la altitudini sub 1400 m, autocorelația de ordinul întâi a scăzut în perioada de încălzire târzie, în timp ce acest indicator a crescut la altitudini peste 1400 m. În ceea ce privește abaterea standard a BAI, valorile cele mai ridicate au fost observate la altitudini joase, indicând condiții mai stresante pentru pădurile de molid de la aceste altitudini.

Sincronia creșterilor, care indică stresul climatic la care sunt expuse pădurile, a crescut în ultimele decenii. Mai exact, în ultimele patru decenii, cea mai ridicată sincronie a creșterilor a fost observată la altitudini joase (<800 m). Surprinzător este că la altitudini înalte (>1400 m), s-a identificat o creștere continuă a sincroniei creșterilor în ultimele șase decenii.

În general, aceste constatări sugerează o intensificare a condițiilor de stres la care sunt expuse pădurile de molid din Carpații Orientali. Chiar dacă pădurile de molid din Carpații Orientali par sănătoase și productive, rezultatele obținute indică o vulnerabilitate ridicată a acestei specii.

*2. În ceea ce privește componentele rezilienței molidului în anii secetoși de-a lungul gradientelor de vârstă și altitudinali (Capitolul 5 bazat pe "Spruce suffers most from drought at low elevations in the Carpathians, though shows high resilience" – articol în evaluare în revista Forest Ecology and Management)*

În contextul creșterii frecvenței secetelor în Europa, cei mai severi ani secetoși în Carpații Orientali au fost identificați ca fiind 2012, 1987 și 2015. Pentru acești ani secetoși, răspunsul molidului la secetă a fost cuantificat prin componentele de reziliență: rezistență, recuperare, reziliență și perioadă de recuperare.

S-a demonstrat că reziliența molidului diferă semnificativ de-a lungul gradientului altitudinal. În mod specific, molidul de la altitudini joase (<800 m) se caracterizează prin cea mai mică rezistență la secetă, deși a avut o rată mare de recuperare, în timp ce la altitudini înalte (>1400 m), o rezistență mai mare a



fost asociată cu o rată scăzută de recuperare. În ceea ce privește vârsta arborilor, s-a constatat că arbori bătrâni au nevoie de cea mai lungă perioadă pentru a se recupera după evenimentele de secetă.

Modelele mixte cu efecte liniare au evidențiat influența disponibilității apei înainte, în timpul și după un eveniment de secetă asupra capacității molidului de a-și menține nivelurile de creștere sau de a le recupera în cazul unei pierderi de creștere. În mod specific, rezultatele au arătat că bilanțul mediu al apei (CWB) în timpul secetei are un impact puternic asupra rezistenței și rezilienței molidului, dar o influență mai mică asupra ratei de recuperare. Pe de altă parte, așa cum era de așteptat, CWB cu doi ani înainte de secetă a influențat negativ componentele de reziliență. În mod specific, dacă condițiile erau favorabile în anii anteriori secetei, capacitatea molidului de a-și menține ratele ridicate de creștere sau de a se recupera scad.

Implementarea conceptului de „linie a rezilienței integrale” a permis o evaluare integrativă a componentelor rezilienței și o comparație eficientă a răspunsului molidului din diferite clase de altitudine și vârstă la secetă în diferiți ani. Au fost obținute deviații semnificative ale „liniei ajustate a rezilienței” față de „linia de reziliență integrală”, evidențiind vulnerabilitatea molidului în anii secetoși. Mai mult, au fost identificate praguri diferite pentru rezistența molidului, sub care nu s-a atins reziliența completă. Aceste rezultate reprezintă o bază științifică pentru gestionarea adaptativă a pădurilor în contextul schimbărilor climatice.

*3. În ceea ce privește relația dintre factorii climatici și procesele de creștere radială ale molidului și non-staționaritatea acestora în ultimul secol (Capitolul 6 bazat pe "In pursuit of change: Divergent temporal shifts in climate sensitivity of Norway spruce along an elevational and continentality gradient in the Carpathians" – articol aflat în evaluare în revista Agricultural and Forest Meteorology)*

Schimbările temporale ale sensibilității la factorii climatici (TSCS), definite matematic prin coeficientul beta (panta dreptei de regresie) al ecuațiilor de regresie a sensibilității climatice (coeficientul de corelație) în timp, au permis o evaluare a gradului de non-staționaritate în relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere ale molidului din Carpați. În mod specific, diferențele în creșterea radială a molidului au fost în mare parte explicate de gradientul altitudinal. În ceea ce privește relațiile dintre factorii climatici și procesele de creștere, un semnal pozitiv a temperaturii din vară a fost observat în cele două clase altitudinale superioare în perioada 1951-1985, care a dispărut în mare parte în perioada 1986-2021. La altitudini joase (<800m), corelațiile dintre SPEI din vară și procesele de creștere s-au intensificat în perioada recentă, în timp ce valorile corelației pozitive a SPEI din iarnă și indicii de creștere au scăzut în intensitate.

Rezultatele obținute indică o variabilitate ridicată a TSCS în raport cu altitudinea. Specific, în timpul iernii, la altitudini înalte au fost observate tendințe TSCS pozitive, în timp ce altitudinile joase a fost identificată o tendință descendentă, parțial negativă. Acest aspect indică faptul că la altitudini înalte molidul este mai sensibil la temperaturile din iarnă, în timp ce la altitudinile joase sensibilitatea scade. Pe de altă parte, o relație opusă a fost observată pentru temperaturile din vară. În ceea ce privește gradientul longitudinal, a fost observată o variabilitate ridicată a TSCS de la vest la est.

În general, aceste rezultate indică faptul că molidul este din ce în ce mai afectat de schimbările climatice. În scenariile de încălzire continuă, se preconizează o creștere a limitării induse de disponibilitatea apei, astfel intensificându-se vulnerabilitate climatică a molidului.

4. *În ceea ce privește non-linearitatea în răspunsul molidului la factorii climatici (Capitolul 7 bazat pe "Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians" – Popa et al., 2024b)*

Realizarea unei analize Random Forest (RFA) ca metodă de regresie multivariată non-parametrică pentru explorarea non-linearității în relația dintre procesele de creștere și factorii climatici sezonieri (temperatură și SPEI) a permis evidențierea dependenței indicilor de creștere față de variabilele climatice. Pentru întreaga rețea dendrocronologică, cea mai importantă variabilă explicativă în baza modelului RFA a fost indicele de disponibilitate a apei (SPEI). Mai mult, RFA a evidențiat modele liniare și neliniare ale relației dintre procesele de creștere a molidului și factorii climatici. O dependență relativ liniară a indicilor de creștere a fost observată față de temperatura sezonului de creștere anterior (dependență negativă), cu excepția suprafețelor de la altitudini joase. În mod similar, a fost raportată o dependență liniară a creșterilor față de temperaturile din iarnă, cu o ușoară scădere pentru temperaturile pozitive de la altitudini <800m. A fost observată o dependență în formă de clopot a indicilor de creștere față de temperaturile din toamna precedentă și sezonul de creștere curent.

În general, rezultatele au evidențiat că non-linearitatea în răspunsul molidului la factorii climatici este specifică unor sezoane; respectiv temperaturile din toamna precedentă și sezoanele de creștere curente, împreună cu disponibilitatea apei în timpul iernii. Prin urmare, aceste rezultate oferă noi perspective asupra răspunsului molidului la factorii climatici în Carpați, ceea ce poate ajuta la implementarea deciziilor de management.

5. *În ceea ce privește cuantificarea relațiilor din factorii climatici și procesele de creștere radială cu ajutorul diferiților parametri ai inelelor anuale (Capitolul 8 bazat pe "Do Different Tree-Ring Proxies Contain Different Temperature Signals? A Case Study of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the Eastern Carpathians" Popa et al., 2022)*

Utilizarea datelor climatice (temperaturi) de la două stații meteorologice locale situate aproape de zona de studiu a oferit rezultate mai bune decât datele climatice din bazele de date tip grid. Compararea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere utilizând date climatice zilnice și a diferiților parametri ai inelelor anuale a permis identificarea sezoanelor în care creșterea molidului este limitată de temperaturi. În mod specific, coeficientul de corelație între cronologia TRW și temperatura medie a avut cea mai ridicată valoare ( $r = 0,494$ ) pentru perioada 3 decembrie - 18 ianuarie. Cea mai ridicată corelație între cronologia BAI și temperaturile cumulate a fost înregistrată pentru perioada 17 mai - 22 iulie ( $r = 0,468$ ), în timp ce cea mai ridicată corelație între cronologia reziduală BI și temperatura din vară/toamnă a fost de 0,551 pentru ferestre cumulative de 59 de zile (din a doua săptămână din august până la începutul lunii octombrie).

Astfel, s-a stabilit că diferiți parametri ai inelelor anuale captează semnale climatice diferite. În consecință, pot fi utilizați diferiți parametri ai inelelor anuale în funcție de întrebările specifice de cercetare sau obiectivele studiului. În ultimii ani, s-a acordat atenție sporită dezvoltării cronologiilor BI la nivel mondial, deoarece acest parametru are o corelație mai puternică și mai stabilă cu temperaturile din vară. Cercetările întreprinse oferă informații valoroase despre creșterea molidului și procesele de lignificare în Carpați.

\*  
\*                      \*

În concluzie, prin cercetările desfășurate în cadrul acestei teze de doctorat au fost obținute informații actualizate referitoare la dinamica creșterii molidului, capacitatea acestuia de a rezista sau de a se recupera după evenimente de secetă, precum și modul în care creșterea sa este influențată de factorii climatici. S-a evidențiat modul în care relația dintre procesele de creștere radială ale molidului și factorii climatici s-au modificat de-a lungul timpului. În ansamblu, concluzia principală este că pădurile de molid din Carpați se află deja într-o stare de stres din cauza schimbărilor climatice și a tendințelor continue de încălzire. În special, cele mai stresante condiții au fost observate la altitudini joase, cu o scădere treptată a stresului de-a lungul gradientului altitudinal. În contextul scenariilor climatice actuale, sunt necesare practici urgente de management pentru a asigura un viitor durabil pentru pădurile de molid din Carpați.

## 9.2 Contribuții originale

Pe baza cercetărilor desfășurate în cadrul tezei de doctorat și a concluziilor obținute, se evidențiază următoarele contribuții originale:

- a) Dezvoltarea uneiia dintre cele mai largi rețele dendrocronologice—cu mai mult de 3000 de arbori—pentru molid în pădurile gestionate din Carpați (România);
- b) Aplicarea conceptului de semnale de avertizare timpurie (Early-Warning Signals, EWS) în identificarea declinului potențial al molidului în pădurile gestionate de-a lungul gradientilor de altitudine și vârstă;
- c) Aplicarea unui model de varianță-covarianță pentru identificarea sincroniei creșterii arborilor în contextul stresului crescut cauzat de schimbările climatice;
- d) Cuantificarea variabilității componentelor de reziliență ale molidului de-a lungul gradientilor de altitudine și vârstă;
- e) Calibrarea modelelor liniare cu efecte mixte (LMMs) pentru a evidenția influența disponibilității apei asupra capacității molidului de a se recupera după evenimente de secetă și pentru a prognoza modul în care variază componentele rezilienței în funcție de bilanțul hidric;

- f) Utilizarea conceptului de "linie a rezilienței integrale" pentru o evaluare integrativă a rezilienței molidului;
- g) Dezvoltarea unei noi metode de evaluare a schimbărilor temporale ale sensibilității la factorii climatici (Temporal Shifts of Climate Sensitivity – TSCS) a molidului, care poate fi replicată pentru alte specii cu scopul de a cuantifica non-staționaritatea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere;
- h) Evaluarea relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere ale molidului din pădurile gestionate de-a lungul unui gradient altitudinal pe baza datelor climatice la nivel zilnic (temperatură, precipitații și Indicele Standardizat al Precipitațiilor-Evapotranspirație – SPEI);
- i) Prima evaluare în România a non-linearității relațiilor dintre factorii climatici și procesele de creștere ale molidului utilizând tehnici de învățare automată;
- j) Dezvoltarea cronologiilor TRW, BAI și BI pe aceleași probe pentru molidul din Carpații Orientali;
- k) Demonstrarea potențialul utilizării cronologiilor BI pentru evaluarea influenței temperaturilor de la sfârșitul verii asupra creșterii molidului.

### 9.3 Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute prin cercetările desfășurate în cadrul acestei teze de doctorat au fost diseminate în 7 articole de cercetare (3 publicate în reviste ISI în quantila Q1, 2 publicate în reviste indexate BDI și 2 aflate în evaluare în reviste ISI Q1 la momentul depunerii tezei) și prin participarea la 10 conferințe internaționale cu 6 prezentări orale și 4 prezentări tip poster.

Articole științifice publicate pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestei teze de doctorat:

1. Andrei Popa, Ionel Popa, Cătălin-Constantin Roibu, Ovidiu Nicolae Badea, Do Different Tree-Ring Proxies Contain Different Temperature Signals? A Case Study of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst) in the Eastern Carpathians, *Plants* 11, 2022, no. 18: 2428. <https://doi.org/10.3390/plants11182428>, IF = 4,5

2. Andrei Popa, Ernst van der Maaten, Ionel Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the Eastern Carpathians, *Science of The Total Environment*, Volume 912, 2024, 169167, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169167>, IF=8,2

3. Andrei Popa, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Michal Bosela, Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians, *Environmental Research*, 2024, 119073, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119073>, IF=7,7

4. I. Popa, A. Popa, A. Horvath, I. Ștețco, A. Korpos, Model statistic regional pentru estimarea diametrului de bază al molidului în funcție de diametrul cioatei la înălțimea de referință de 30 cm. *Bucovina Forestieră* 21(2):157-164, 2021, DOI: 10.4316/bf.2021.016, BDI

5. Ionel Popa, Andrei Popa, Mihai Balabașciuc, Reziliența principalelor specii forestiere din Carpații Orientali la seceta din anul 2003, *Revista de Silvicultură și Cinegetică*, 53, 2023, 5-11, BDI

Articole științifice aflate în evaluare la momentul depunerii tezei bazate pe rezultatele obținute în cadrul acestei teze de doctorat:

1. Andrei Popa, Marieke van der Maaten-Theunissen, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Ernst van der Maaten, Spruce suffers most from drought at low elevations in the Carpathians, though shows high resilience, (*Forest Ecology and Management*, Q1, IF=3.7, în evaluare)

2. Andrei Popa, Jernej Jevšenak, Ionel Popa, Ovidiu Badea, Allan Buras, In pursuit of change: Divergent temporal shifts in climate sensitivity of Norway spruce along an elevational and continentality gradient in the Carpathians, (*Agricultural and Forest Meteorology*, Q1, IF=5,6, în evaluare)

Rezultatele obținute în cadrul capitolelor 4 și 5 au fost diseminate la conferința The 26th IUFRO World Congress, în perioada 23-29 iunie 2024, Stockholm, Sweden prin prezentarea tip poster „*Climate change impacts on Norway spruce in Eastern Europe: Early warning signals of forest decline*” care a primit premiul pentru cel mai bun poster la secțiunea *Strengthening forest resilience and adaptation to stress*.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Alday, J.G., Shestakova, T.A., Resco de Dios, V., Voltas, J., 2018. DendroSync: An R package to unravel synchrony patterns in tree-ring networks. *Dendrochronologia* 47, 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.12.003>
- Aldea, J., Ruiz-Peinado, R., Del Río, M., Pretzsch, H., Heym, M., Brazaitis, G., Jansons, A., Metslaid, M., Barbeito, I., Bielak, K., Hysten, G., Holm, S., Nothdurft, A., Sitko, R., Löf, M., 2022. Timing and duration of drought modulate tree growth response in pure and mixed stands of Scots pine and Norway spruce. *Journal of Ecology* 110, 2673–2683. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13978>
- Au, T.F., Maxwell, J.T., Robeson, S.M., Li, J., Siani, S.M.O., Novick, K.A., Dannenberg, M.P., Phillips, R.P., Li, T., Chen, Z., Lenoir, J., 2022. Younger trees in the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought. *Nat. Clim. Chang.* 12, 1168–1174. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01528-w>
- Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M.P., Frank, D.C., 2019. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Sci. Adv.* 5, eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Babst, F., Poulter, B., Trouet, V., Tan, K., Neuwirth, B., Wilson, R., Carrer, M., Grabner, M., Tegel, W., Levanic, T., Panayotov, M., Urbinati, C., Bouriaud, O., Ciais, P., Frank, D., 2013. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. *Global Ecology and Biogeography* 22, 706–717. <https://doi.org/10.1111/geb.12023>
- Barry, R.G., 1992. Mountain weather and climate. Psychology Press.
- Begović, K., Rydval, M., Mikac, S., Čupić, S., Svobodova, K., Mikoláš, M., Kozák, D., Kameniar, O., Frankovič, M., Pavlin, J., Langbehn, T., Svoboda, M., 2020. Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains. *Agricultural and Forest Meteorology* 288–289, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108000>
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Beguiría, M.S., 2017. Package 'spei.' Calculation of the Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index, CRAN [Package].
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F., Latorre, B., 2013. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*
- Beniston, M., Keller, F., Koffi, B., Goyette, S., 2003. Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology* 76, 125–140. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0016-5>
- Bennett, A.C., McDowell, N.G., Allen, C.D., Anderson-Teixeira, K.J., 2015. Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants* 1, 15139. <https://doi.org/10.1038/nplants.2015.139>
- Biondi, F., Qeadan, F., 2008. A Theory-Driven Approach to Tree-Ring Standardization: Defining the Biological Trend from Expected Basal Area Increment. *Tree-Ring Research* 64, 81–96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>
- Björklund, J., Gunnarson, B.E., Seftigen, K., Zhang, P., Linderholm, H.W., 2015. Using adjusted Blue Intensity data to attain high-quality summer temperature information: A case study from Central Scandinavia. *The Holocene* 25, 547–556. <https://doi.org/10.1177/0959683614562434>
- Björklund, J., Rydval, M., Schurman, J.S., Seftigen, K., Trotsiuk, V., Janda, P., Mikoláš, M., Dušátko, M., Čada, V., Bače, R., Svoboda, M., 2019. Disentangling the multi-faceted growth patterns of primary *Picea abies* forests in the Carpathian arc. *Agricultural and Forest Meteorology* 271, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.002>
- Björklund, J.A., Gunnarson, B.E., Seftigen, K., Esper, J., Linderholm, H.W., 2013. Is blue intensity ready to replace maximum latewood density as a strong temperature proxy? A tree-ring case study on Scots pine from northern Sweden (preprint). *Proxy Use-Development-Validation/Terrestrial Archives/Centennial-Decadal*. <https://doi.org/10.5194/cpd-9-5227-2013>
- Boden, S., Kahle, H.-P., Wilpert, K. von, Spiecker, H., 2014. Resilience of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growth to changing climatic conditions in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management* 315, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.015>
- Bosela, M., Kulla, L., Roessiger, J., Šebeň, V., Dobor, L., Büntgen, U., Lukac, M., 2019. Long-term effects of environmental change and species diversity on tree radial growth in a mixed European forest. *Forest Ecology and Management* 446, 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.033>

- Bošela, M., Sedmák, R., Sedmáková, D., Marušák, R., Kulla, L., 2014. Temporal shifts of climate–growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management* 325, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.055>
- Bosela, M., Tumajer, J., Cienciala, E., Dobor, L., Kulla, L., Marčíš, P., Popa, I., Sedmák, R., Sedmáková, D., Sitko, R., Šebeň, V., Štěpánek, P., Büntgen, U., 2021. Climate warming induced synchronous growth decline in Norway spruce populations across biogeographical gradients since 2000. *Science of The Total Environment* 752, 141794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141794>
- Bouriaud, O., Popa, I., 2009. Comparative dendroclimatic study of Scots pine, Norway spruce, and silver fir in the Vrancea Range, Eastern Carpathian Mountains. *Trees* 23, 95–106. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0258-z>
- Bowditch, E., Santopuoli, G., Binder, F., Del Río, M., La Porta, N., Kluvankova, T., Lesinski, J., Motta, R., Pach, M., Panzacchi, P., Pretzsch, H., Temperli, C., Tonon, G., Smith, M., Velikova, V., Weatherall, A., Tognetti, R., 2020. What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosystem Services* 43, 101113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101113>
- Bozkurt, A.E., Şahan, E.A., Köse, N., 2021. Growth responses of *Pinus sylvestris* L. to climate from the southeastern limit of its natural distribution area, Turkey. *Dendrochronologia* 70, 125897. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125897>
- Breiman, L., 2001. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brodribb, T.J., Powers, J., Cochard, H., Choat, B., 2020. Hanging by a thread? Forests and drought. *Science* 368, 261–266. <https://doi.org/10.1126/science.aat7631>
- Bunn, A.G., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Buras, A., Rehschuh, R., Fonti, M., Lange, J., Fonti, P., Menzel, A., Gessler, A., Rigling, A., Treydte, K., Von Arx, G., 2023. Quantitative wood anatomy and stable carbon isotopes indicate pronounced drought exposure of Scots pine when growing at the forest edge. *Front. For. Glob. Change* 6, 1233052. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1233052>
- Cailleret, M., Dakos, V., Jansen, S., Robert, E.M.R., Aakala, T., Amoroso, M.M., Antos, J.A., Bigler, C., Bugmann, H., Caccianaga, M., Camarero, J.-J., Cherubini, P., Coyea, M.R., Čufar, K., Das, A.J., Davi, H., Gea-Izquierdo, G., Gillner, S., Haavik, L.J., Hartmann, H., Hereş, A.-M., Hultine, K.R., Janda, P., Kane, J.M., Kharuk, V.I., Kitzberger, T., Klein, T., Levanic, T., Linares, J.-C., Lombardi, F., Mäkinen, H., Mészáros, I., Metsaranta, J.M., Oberhuber, W., Papadopoulos, A., Petritan, A.M., Rohner, B., Sangüesa-Barreda, G., Smith, J.M., Stan, A.B., Stojanovic, D.B., Suarez, M.-L., Svoboda, M., Trotsiuk, V., Villalba, R., Westwood, A.R., Wyckoff, P.H., Martínez-Vilalta, J., 2019. Early-Warning Signals of Individual Tree Mortality Based on Annual Radial Growth. *Front. Plant Sci.* 9, 1964. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01964>
- Camarero, J.J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Oliva, J., Vicente-Serrano, S.M., 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J Ecol* 103, 44–57. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12295>
- Campbell, R., McCarroll, D., Robertson, I., Loader, N.J., Grudd, H., Gunnarson, B., 2011. Blue Intensity In *Pinus sylvestris* Tree Rings: A Manual for A New Palaeoclimate Proxy. *Tree-Ring Research* 67, 127–134. <https://doi.org/10.3959/2010-13.1>
- Canty, A., Ripley, B., 2017. Package 'boot'. Bootstrap Functions. CRAN R Proj.
- Caudullo, G., Tinner, W., de Rigo, D., 2016. *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats European Atlas of Forest Tree Species, 3.
- Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayán, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species. *Data in Brief* 12, 662–666. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.007>
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A., 1990. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Springer Science & Business Media.
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M., Jones, P.D., 2018. An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* 123, 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cruz-Alonso, V., Pucher, C., Ratcliffe, S., Ruiz-Benito, P., Astigarraga, J., Neumann, M., Hasenauer, H., Rodríguez-Sánchez, F., 2023. The easyclimate R package: Easy access to high-resolution daily climate data for Europe. *Environmental Modelling & Software* 161, 105627. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105627>
- Dakos, V., van Nes, E.H., D’Odorico, P., Scheffer, M., 2012. Robustness of variance and autocorrelation as indicators of critical slowing down. *Ecology* 93, 264–271. <https://doi.org/10.1890/11-0889.1>
- DeSoto, L., Cailleret, M., Sterck, F., Jansen, S., Kramer, K., Robert, E.M.R., Aakala, T., Amoroso, M.M., Bigler, C., Camarero, J.J., Čufar, K., Gea-Izquierdo, G., Gillner, S., Haavik, L.J., Hereş, A.-M., Kane, J.M., Kharuk, V.I., Kitzberger, T., Klein, T.,

- Levanič, T., Linares, J.C., Mäkinen, H., Oberhuber, W., Papadopoulos, A., Rohner, B., Sangüesa-Barreda, G., Stojanovic, D.B., Suárez, M.L., Villalba, R., Martínez-Vilalta, J., 2020. Low growth resilience to drought is related to future mortality risk in trees. *Nat Commun* 11, 545. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14300-5>
- Droogers, P., Allen, R.G., 2002. Estimating Reference Evapotranspiration Under Inaccurate Data Conditions. *Irrigation and Drainage Systems* 16, 33–45. <https://doi.org/10.1023/A:1015508322413>
- Esper, J., Krusic, P.J., Ljungqvist, F.C., Luterbacher, J., Carrer, M., Cook, E., Davi, N.K., Hartl-Meier, C., Kirilyanov, A., Konter, O., Myglan, V., Timonen, M., Treydte, K., Trouet, V., Villalba, R., Yang, B., Büntgen, U., 2016. Ranking of tree-ring based temperature reconstructions of the past millennium. *Quaternary Science Reviews* 145, 134–151. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.009>
- FOREST EUROPE, 2020. State of Europe's Forests 2020. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe - FOREST EUROPE.
- Fritts, H., 1976. *Tree rings and climate*. Elsevier.
- Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J.J., 2020. Forecasting Forest Vulnerability to Drought in Pyrenean Silver Fir Forests Showing Dieback. *Front. For. Glob. Change* 3, 36. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00036>
- Gelman, A., Loken, E., 2013. The garden of forking paths: Why multiple comparisons can be a problem, even when there is no "fishing expedition" or "p-hacking" and the research hypothesis was posited ahead of time. *Department of Statistics, Columbia University* 1–17.
- Genuer, R., Poggi, J.-M., Tuleau-Malot, C., 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognition Letters* 31, 2225–2236. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2010.03.014>
- Gindl, W., Grabner, M., Wimmer, R., 2000. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width. *Trees* 14, 409–414. <https://doi.org/10.1007/s004680000057>
- Greenwell, B., M., 2017. pdp: An R Package for Constructing Partial Dependence Plots. *The R Journal* 9, 421. <https://doi.org/10.32614/RJ-2017-016>
- Grissino-Mayer, H.D., 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA.
- Groemping, U., Matthias, L., 2018. Package 'relaimpo'. Relative importance of regressors in linear models (R package version).
- Grömping, U., 2015. Variable importance in regression models. *WIREs Computational Stats* 7, 137–152. <https://doi.org/10.1002/wics.1346>
- Hacket-Pain, A., Ascoli, D., Berretti, R., Mencuccini, M., Motta, R., Nola, P., Piussi, P., Ruffinatto, F., Vacchiano, G., 2019. Temperature and masting control Norway spruce growth, but with high individual tree variability. *Forest Ecology and Management* 438, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.014>
- Han, Y., Wang, Y., Liu, B., Huang, R., Camarero, J.J., 2022. Moisture mediates temperature-growth couplings of high-elevation shrubs in the Tibetan plateau. *Trees* 36, 273–281. <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02204-w>
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Clim Change* 3, 203–207. <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture* 1, 96–99.
- Hartl-Meier, Claudia, Dittmar, C., Zang, C., Rothe, A., 2014. Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees* 28, 819–829. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-0994-1>
- Hartl-Meier, C., Zang, C., Dittmar, C., Esper, J., Göttlein, A., Rothe, A., 2014. Vulnerability of Norway spruce to climate change in mountain forests of the European Alps. *Clim. Res.* 60, 119–132. <https://doi.org/10.3354/cr01226>
- He, B., Cui, X., Wang, H., Chen, A., 2014. Drought: The most important physical stress of terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* 34, 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2014.05.004>
- Hlásny, Tomáš, König, L., Krokene, P., Lindner, M., Montagné-Huck, C., Müller, J., Qin, H., Raffa, K.F., Schelhaas, M.-J., Svoboda, M., Viiri, H., Seidl, R., 2021. Bark Beetle Outbreaks in Europe: State of Knowledge and Ways Forward for Management. *Curr Forestry Rep* 7, 138–165. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00142-x>
- Hlásny, T., Trombik, J., Dobor, L., Barcza, Z., Barka, I., 2016. Future climate of the Carpathians: climate change hot-spots and implications for ecosystems. *Reg Environ Change* 16, 1495–1506. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0890-2>
- Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., Turčáni, M., 2021. Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management* 490, 119075. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119075>



- Ichim, R., 1990. Ecological management of the Norway spruce forests. Ceres Publishing Bucharest, Bucharest.
- Ionita, M., Nagavciuc, V., 2021. Changes in drought features at the European level over the last 120 years. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 1685–1701. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1685-2021>
- IPCC, 2023. *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jevšenak, J., 2020. New features in the dendroTools R package: Bootstrapped and partial correlation coefficients for monthly and daily climate data. *Dendrochronologia* 63, 125753. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125753>
- Jevšenak, J., 2019. Daily climate data reveal stronger climate-growth relationships for an extended European tree-ring network. *Quaternary Science Reviews* 221, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.105868>
- Jevšenak, J., Buras, A., Babst, F., 2024. Shifting potential for high-resolution climate reconstructions under global warming. *Quaternary Science Reviews* 325, 108486. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108486>
- Jevšenak, J., Levanič, T., 2018. dendroTools: R package for studying linear and nonlinear responses between tree-rings and daily environmental data. *Dendrochronologia* 48, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.005>
- Jevšenak, J., Tychkov, I., Gričar, J., Levanič, T., Tumajer, J., Prislán, P., Arnič, D., Popkova, M., Shishov, V.V., 2021. Growth-limiting factors and climate response variability in Norway spruce (*Picea abies* L.) along an elevation and precipitation gradients in Slovenia. *Int J Biometeorol* 65, 311–324. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02033-5>
- Jones, P.D., Briffa, K.R., Osborn, T.J., Lough, J.M., van Ommen, T.D., Vinther, B.M., Luterbacher, J., Wahl, E.R., Zwiers, F.W., Mann, M.E., Schmidt, G.A., Ammann, C.M., Buckley, B.M., Cobb, K.M., Esper, J., Goosse, H., Graham, N., Jansen, E., Kiefer, T., Kull, C., Küttel, M., Mosley-Thompson, E., Overpeck, J.T., Riedwyl, N., Schulz, M., Tudhope, A.W., Villalba, R., Wanner, H., Wolff, E., Xoplaki, E., 2009. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. *The Holocene* 19, 3–49. <https://doi.org/10.1177/0959683608098952>
- Kassambara, A., 2021. Rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests.[accessed on 20 January 2022)].
- Kholiavchuk, D., Gurgiser, W., Mayr, S., 2023. Carpathian Forests: Past and Recent Developments. *Forests* 15, 65. <https://doi.org/10.3390/f15010065>
- Kijowska-Oberc, J., Staszak, A.M., Kamiński, J., Ratajczak, E., 2020. Adaptation of Forest Trees to Rapidly Changing Climate. *Forests* 11, 123. <https://doi.org/10.3390/f11020123>
- Klesse, S., Babst, F., Evans, M.E.K., Hurley, A., Pappas, C., Peters, R.L., 2023. Legacy effects in radial tree growth are rarely significant after accounting for biological memory. *Journal of Ecology* 111, 1188–1202. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14045>
- Klimo, E., Hager, H., Kulhavý, J., 2000. Spruce monocultures in Central Europe: Problems and prospects. European Forest Institute Joensuu, Finland.
- Kolář, T., Čermák, P., Trnka, M., Žid, T., Rybníček, M., 2017. Temporal changes in the climate sensitivity of Norway spruce and European beech along an elevation gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 239, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.028>
- Kolus, H.R., Huntzinger, D.N., Schwalm, C.R., Fisher, J.B., McKay, N., Fang, Y., Michalak, A.M., Schaefer, K., Wei, Y., Poulter, B., Mao, J., Parazoo, N.C., Shi, X., 2019. Land carbon models underestimate the severity and duration of drought's impact on plant productivity. *Sci Rep* 9, 2758. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39373-1>
- Konnert, M., Fady, B., Gömöry, D., A'Hara, S., Wolter, F., Ducci, F., Koskela, J., Bozzano, M., Maaten, T., Kowalczyk, J., 2015. Use and transfer of forest reproductive material: in Europe in the context of climate change. Bioversity International, Rome, Italy.
- Kozłowski, T.T., Pallardy, S.G., 1997. Growth control in woody plants. Elsevier.
- Lebourgeois, F., Eberlé, P., Mérian, P., Seynave, I., 2014. Social status-mediated tree-ring responses to climate of *Abies alba* and *Fagus sylvatica* shift in importance with increasing stand basal area. *Forest Ecology and Management* 328, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.038>
- Leifsson, C., Buras, A., Rammig, A., Zang, C., 2023. Changing climate sensitivity of secondary growth following extreme drought events in forest ecosystems: a global analysis. *Environ. Res. Lett.* 18, 014021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca9e5>
- Leonelli, G., Pelfini, M., 2008. Influence of climate and climate anomalies on norway spruce tree-ring growth at different altitudes and on glacier responses: examples from the central italian alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 90, 75–86. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2008.00335.x>

- Levanič, T., Gričar, J., Gagen, M., Jalkanen, R., Loader, N.J., McCarroll, D., Oven, P., Robertson, I., 2009. The climate sensitivity of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Trees* 23, 169–180. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0265-0>
- Lévesque, M., Saurer, M., Siegwolf, R., Eilmann, B., Brang, P., Bugmann, H., Rigling, A., 2013. Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch. *Glob Change Biol* 19, 3184–3199. <https://doi.org/10.1111/gcb.12268>
- Li, J., Wang, Z., Lai, C., Zhang, Z., 2019. Tree-ring-width based streamflow reconstruction based on the random forest algorithm for the source region of the Yangtze River, China. *CATENA* 183, 104216. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104216>
- Liaw, A., Wiener, M., 2002. Classification and Regression by randomForest 2.
- Lloret, F., Keeling, E.G., Sala, A., 2011. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120, 1909–1920. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>
- Lloyd-Hughes, B., 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theor Appl Climatol* 117, 607–611. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1025-7>
- Lüdecke, D., Lüdecke, M.D., 2015. Package 'sjPlot': R package version 1.
- Mathes, T., Seidel, D., Annighöfer, P., 2023. Response to extreme events: do morphological differences affect the ability of beech (*Fagus sylvatica* L.) to resist drought stress? *Forestry: An International Journal of Forest Research* 96, 355–371. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpac056>
- Matisons, R., Elferts, D., Krišāns, O., Schneck, V., Gärtner, H., Bast, A., Wojda, T., Kowalczyk, J., Jansons, Ā., 2021a. Non-linear regional weather-growth relationships indicate limited adaptability of the eastern Baltic Scots pine. *Forest Ecology and Management* 479, 118600. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118600>
- Matisons, R., Elferts, D., Krišāns, O., Schneck, V., Gärtner, H., Wojda, T., Kowalczyk, J., Jansons, Ā., 2021b. Nonlinear Weather-Growth Relationships Suggest Disproportional Growth Changes of Norway Spruce in the Eastern Baltic Region. *Forests* 12, 661. <https://doi.org/10.3390/f12060661>
- Maxwell, R.S., Larsson, L.-A., 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia* 67, 125841. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125841>
- McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D.G., Yezpe, E.A., 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist* 178, 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- McDowell, N.G., Fisher, R.A., Xu, C., Domec, J.C., Hölttä, T., Mackay, D.S., Sperry, J.S., Boutz, A., Dickman, L., Gehres, N., Limousin, J.M., Macalady, A., Martínez-Vilalta, J., Mencuccini, M., Plaut, J.A., Ogée, J., Pangle, R.E., Rasse, D.P., Ryan, M.G., Sevanto, S., Waring, R.H., Williams, A.P., Yezpe, E.A., Pockman, W.T., 2013. Evaluating theories of drought-induced vegetation mortality using a multimodel-experiment framework. *New Phytologist* 200, 304–321. <https://doi.org/10.1111/nph.12465>
- Michelot, A., Simard, S., Rathgeber, C., Dufrene, E., Damesin, C., 2012. Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. *Tree Physiology* 32, 1033–1045. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps052>
- Millar, C.I., Stephenson, N.L., Stephens, S.L., 2007. CLIMATE CHANGE AND FORESTS OF THE FUTURE: MANAGING IN THE FACE OF UNCERTAINTY. *Ecological Applications* 17, 2145–2151. <https://doi.org/10.1890/06-1715.1>
- Moreno, A., Hasenauer, H., 2016. Spatial downscaling of European climate data. *Intl Journal of Climatology* 36, 1444–1458. <https://doi.org/10.1002/joc.4436>
- Mráz, P., Ronikier, M., 2016. Biogeography of the Carpathians: evolutionary and spatial facets of biodiversity. *Biol. J. Linn. Soc.* 119, 528–559. <https://doi.org/10.1111/bj.12918>
- Nagavciuc, V., Roibu, C.-C., Ionita, M., Mursa, A., Cotos, M.-G., Popa, I., 2019. Different climate response of three tree ring proxies of *Pinus sylvestris* from the Eastern Carpathians, Romania. *Dendrochronologia* 54, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.02.007>
- Netherer, S., Matthews, B., Katzensteiner, K., Blackwell, E., Henschke, P., Hietz, P., Pennerstorfer, J., Rosner, S., Kikuta, S., Schume, H., Schopf, A., 2015. Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytol* 205, 1128–1141. <https://doi.org/10.1111/nph.13166>
- Netherer, S., Panassiti, B., Pennerstorfer, J., Matthews, B., 2019. Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands. *Front. For. Glob. Change* 2, 39. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00039>

- O'Brien, R.M., 2007. A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. *Qual Quant* 41, 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- Pohlert, T., Pohlert, M.T., Kendall, S., 2016. Package 'trend'. Title non-parametric trend tests and change-point detection.
- Ponocná, T., Spyt, B., Kaczka, R., Büntgen, U., Tremli, V., 2016. Growth trends and climate responses of Norway spruce along elevational gradients in East-Central Europe. *Trees* 30, 1633–1646. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1396-3>
- Poorter, H., Niklas, K.J., Reich, P.B., Oleksyn, J., Poot, P., Mommer, L., 2012. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. *New Phytologist* 193, 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Popa, A., Popa, I., Badea, O., Bosela, M., 2024a. Non-linear response of Norway spruce to climate variation along elevational and age gradients in the Carpathians. *Environmental Research* 119073. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119073>
- Popa, A., Van Der Maaten, E., Popa, I., Van Der Maaten-Theunissen, M., 2024b. Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the eastern Carpathians. *Science of The Total Environment* 169167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169167>
- Popa, A., Van Der Maaten, E., Popa, I., Van Der Maaten-Theunissen, M., 2023. Early warning signals indicate climate change-induced stress in Norway spruce in the eastern Carpathians. *Science of The Total Environment* 169167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169167>
- Popa, I., 2004. Fundamente metodologice și aplicații de dendrocronologie. Editura Tehnică Silvică.
- Pucher, C., 2023. Description and Evaluation of Downscaled Daily Climate Data Version 4. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22962671.v1>
- R Core Team, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Rutherford, A., 2011. ANOVA and ANCOVA: a GLM approach. John Wiley & Sons.
- Ryan, M.G., Sapes, G., Sala, A., Hood, S.M., 2015. Tree physiology and bark beetles. *New Phytol* 205, 955–957. <https://doi.org/10.1111/nph.13256>
- Rydval, M., Larsson, L.-Å., McGlynn, L., Gunnarson, B.E., Loader, N.J., Young, G.H.F., Wilson, R., 2014. Blue intensity for dendroclimatology: Should we have the blues? Experiments from Scotland. *Dendrochronologia* 32, 191–204. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2014.04.003>
- Savva, Y., Oleksyn, J., Reich, P.B., Tjoelker, M.G., Vaganov, E.A., Modrzyński, J., 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees* 20, 735–746. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0088-9>
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E.H., Rietkerk, M., Sugihara, G., 2009. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 461, 53–59. <https://doi.org/10.1038/nature08227>
- Schmucker, J., Uhl, E., Schmied, G., Pretzsch, H., 2023. Growth and drought reaction of European hornbeam, European white elm, field maple and wild service tree. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02441-1>
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T.E.E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübke, T., Nelson, D.B., Rammig, A., Rigling, A., Rose, L., Ruehr, N.K., Schumann, K., Weiser, F., Werner, C., Wohlgemuth, T., Zang, C.S., Kahmen, A., 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology* 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
- Schurman, J.S., Babst, F., Björklund, J., Rydval, M., Bače, R., Čada, V., Janda, P., Mikolas, M., Saulnier, M., Trotsiuk, V., Svoboda, M., 2019. The climatic drivers of primary *Picea* forest growth along the Carpathian arc are changing under rising temperatures. *Glob Change Biol* 25, 3136–3150. <https://doi.org/10.1111/gcb.14721>
- Schuster, R., Oberhuber, W., 2013. Age-dependent climate–growth relationships and regeneration of *Picea abies* in a drought-prone mixed-coniferous forest in the Alps. *Can. J. For. Res.* 43, 609–618. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2012-0426>
- Schwarz, J., Skiadaresis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V., Bauhus, J., 2020. Quantifying Growth Responses of Trees to Drought—a Critique of Commonly Used Resilience Indices and Recommendations for Future Studies. *Curr Forestry Rep* 6, 185–200. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00119-2>
- Seidl, R., Fernandes, P.M., Fonseca, T.F., Gillet, F., Jönsson, A.M., Merganičová, K., Netherer, S., Arpacı, A., Bontemps, J.-D., Bugmann, H., González-Olabarria, J.R., Lasch, P., Meredieu, C., Moreira, F., Schelhaas, M.-J., Mohren, F., 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling* 222, 903–924. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040>

- Selås, V., Piovesan, G., Adams, J.M., Bernabei, M., 2002. Climatic factors controlling reproduction and growth of Norway spruce in southern Norway 32, 9.
- Shestakova, T.A., Aguilera, M., Ferrio, J.P., Gutierrez, E., Voltas, J., 2014. Unravelling spatiotemporal tree-ring signals in Mediterranean oaks: a variance-covariance modelling approach of carbon and oxygen isotope ratios. *Tree Physiology* 34, 819–838. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu037>
- Shestakova, T.A., Gutiérrez, E., Kirdyanov, A.V., Camarero, J.J., Génova, M., Knorre, A.A., Linares, J.C., Resco de Dios, V., Sánchez-Salguero, R., Voltas, J., 2016. Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 662–667. <https://doi.org/10.1073/pnas.1514717113>
- Shestakova, T.A., Gutiérrez, E., Voltas, J., 2018. A roadmap to disentangling ecogeographical patterns of spatial synchrony in dendrosciences. *Trees* 32, 359–370. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1653-0>
- Sidor, C.G., Popa, I., Vlad, R., Cherubini, P., 2015. Different tree-ring responses of Norway spruce to air temperature across an altitudinal gradient in the Eastern Carpathians (Romania). *Trees* 29, 985–997. <https://doi.org/10.1007/s00468-015-1178-3>
- Speer, J.H., 2010. *Fundamentals of tree-ring research*. University of Arizona Press.
- Stanescu, V., Sofletea, N., Popescu, O., 1997. *Flora forestiera lemnoasa a Romaniei [Woody forest flora of Romania]*. Editura Ceres, Bucuresti, Romania, pp. 451.[in Romanian].
- Știrbu, M.-I., Roibu, C.-C., Carrer, M., Mursa, A., Unterholzner, L., Prendin, A.L., 2022. Contrasting Climate Sensitivity of *Pinus cembra* Tree-Ring Traits in the Carpathians. *Front. Plant Sci.* 13, 855003. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855003>
- Svobodová, K., Langbehn, T., Björklund, J., Rydval, M., Trotsiuk, V., Morrissey, R.C., Čada, V., Janda, P., Begovič, K., Ágh-Lăbusová, J., Schurman, J.S., Nováková, M., Kozák, D., Kameniar, O., Synek, M., Mikoláš, M., Svoboda, M., 2019. Increased sensitivity to drought across successional stages in natural Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests of the Calimani Mountains, Romania. *Trees* 33, 1345–1359. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01862-1>
- Synek, M., Janda, P., Mikoláš, M., Nagel, T.A., Schurman, J.S., Pettit, J.L., Trotsiuk, V., Morrissey, R.C., Bače, R., Čada, V., Brang, P., Bugmann, H., Begovič, K., Chaskovskyy, O., Dušátko, M., Frankovič, M., Kameniar, O., Kníř, T., Kozák, D., Langbehn, T., Málek, J., Rodrigo, R., Saulnier, M., Teodosiu, M., Vostarek, O., Svoboda, M., 2020. Contrasting patterns of natural mortality in primary *Picea* forests of the Carpathian Mountains. *Forest Ecology and Management* 457, 117734. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117734>
- Thurm, E.A., Uhl, E., Pretzsch, H., 2016. Mixture reduces climate sensitivity of Douglas-fir stem growth. *Forest Ecology and Management* 376, 205–220. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.020>
- Treml, V., Kašpar, J., Kuželová, H., Gryc, V., 2015. Differences in intra-annual wood formation in *Picea abies* across the treeline ecotone, Giant Mountains, Czech Republic. *Trees* 29, 515–526. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1129-4>
- Treml, V., Mašek, J., Tumajer, J., Rydval, M., Čada, V., Ledvinka, O., Svoboda, M., 2022. Trends in climatically driven extreme growth reductions of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Central Europe. *Glob Change Biol* 28, 557–570. <https://doi.org/10.1111/gcb.15922>
- Trumbore, S., Brando, P., Hartmann, H., 2015. Forest health and global change. *Science* 349, 814–818. <https://doi.org/10.1126/science.aac6759>
- UNEP (Ed.), 2008. *Carpathians environment outlook 2008*. UNEP, New York, NY.
- United Nations Environment Programme, 2023. *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*.
- Unterholzner, L., Castagneri, D., Cerrato, R., Știrbu, M.-I., Roibu, C.-C., Carrer, M., 2024. Climate response of a glacial relict conifer across its distribution range is invariant in space but not in time. *Science of The Total Environment* 906, 167512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167512>
- Uyanık, G.K., Güler, N., 2013. A Study on Multiple Linear Regression Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 106, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.027>
- van der Maaten-Theunissen, M., Kahle, H.-P., van der Maaten, E., 2013. Drought sensitivity of Norway spruce is higher than that of silver fir along an altitudinal gradient in southwestern Germany. *Annals of Forest Science* 70, 185–193. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0241-0>

- van der Maaten-Theunissen, M., Trouillier, M., Schwarz, J., Skiadaresis, G., Thurm, E.A., van der Maaten, E., 2021. pointRes 2.0: New functions to describe tree resilience. *Dendrochronologia* 70, 125899. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125899>
- van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Bouriaud, O., 2015. pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia* 35, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.006>
- Van Meerbeek, K., Jucker, T., Svenning, J., 2021. Unifying the concepts of stability and resilience in ecology. *Journal of Ecology* 109, 3114–3132. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13651>
- Vitali, V., Büntgen, U., Bauhus, J., 2017. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Glob Change Biol* 23, 5108–5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>
- Vitasse, Y., Bottero, A., Cailleret, M., Bigler, C., Fonti, P., Gessler, A., Lévesque, M., Rohner, B., Weber, P., Rigling, A., Wohlgemuth, T., 2019. Contrasting resistance and resilience to extreme drought and late spring frost in five major European tree species. *Glob Change Biol* 25, 3781–3792. <https://doi.org/10.1111/gcb.14803>
- Wang, Q., Fan, X., Wang, M., 2014. Recent warming amplification over high elevation regions across the globe. *Clim Dyn* 43, 87–101. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1889-3>
- Wilmking, M., Maaten-Theunissen, M., Maaten, E., Scharnweber, T., Buras, A., Biermann, C., Gurskaya, M., Hallinger, M., Lange, J., Shetti, R., Smiljanic, M., Trouillier, M., 2020. Global assessment of relationships between climate and tree growth. *Glob Change Biol* 26, 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>
- Wilson, R., Rao, R., Rydval, M., Wood, C., Larsson, L.-Å., Luckman, B.H., 2014. Blue Intensity for dendroclimatology: The BC blues: A case study from British Columbia, Canada. *The Holocene* 24, 1428–1438. <https://doi.org/10.1177/0959683614544051>
- Wood, S., Wood, M.S., 2015. Package 'mgcv'. R package version 1, 729.
- Zang, C.S., Buras, A., Esquivel-Muelbert, A., Jump, A.S., Rigling, A., Rammig, A., 2020. Standardized drought indices in ecological research: Why one size does not fit all. *Global Change Biology* 26, 322–324. <https://doi.org/10.1111/gcb.14809>
- Zhang, X., Fan, Z., Shi, Z., Pan, L., Kwon, S., Yang, X., Liu, Y., 2022. Tree characteristics and drought severity modulate the growth resilience of natural Mongolian pine to extreme drought episodes. *Science of The Total Environment* 830, 154742. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154742>
- Zhang, Y., Keenan, T.F., Zhou, S., 2021. Exacerbated drought impacts on global ecosystems due to structural overshoot. *Nat Ecol Evol* 5, 1490–1498. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01551-8>