

La Suceava, 5 decembrie 2023

O. Bouriaud

PN-III-P4-PCE-2021-1677

Proiect PCE108 / 5.10.2011 "SAFEClim"

Raport științific sintetic (01.01.2023-31.12.2023)

Etapa 2 - Estimarea stării viitoare a pădurilor României pe baza proiecțiilor modelelor folosind estimatori statistici cu includerea incertitudinii.

Activitățile proiectului

A2.1. Măsurarea în teren ale trăsăturilor speciilor principale investigate.

A2.2. Ajustarea și calibrarea unor modele de prezență a speciilor forestiere.

A2.3. Analiza rezultatelor modelelor de distribuție a speciilor, studii de caz selectate pentru evaluarea regională.

Cuprins

REZUMAT EXECUTIV AL ACTIVITĂȚILOR ÎN ETAPA II (2023)	2
DESCRIEREA STIINTIFICA CU PUNEREA ÎN EVIDENȚĂ A REZULTATELOR ETAPEI	4
A2.1. MĂSURAREA ÎN TEREN ALE TRĂSĂTURILOR SPECIILOR PRINCIPALE INVESTIGATE	4
A2.2. AJUSTAREA ȘI CALIBRAREA UNOR MODELE DE PREZENȚĂ A SPECIILOR FORESTIERE	9
<i>Calibrarea modelului de prezență a speciilor</i>	9
<i>Calibrarea modelului RandomForest</i>	10
<i>Calibrarea modelului IKS</i>	11
<i>Calibrarea modelului de estimare a stării viitoare</i>	13
A2.3. ANALIZA REZULTATELOR MODELELOR DE DISTRIBUȚIE A SPECIILOR, STUDII DE CAZ SELECTATE PENTRU EVALUAREA REGIONALĂ	14
<i>Rezultatele modelări în baza scenariul RCP4.5 mediu</i>	15
<i>Distribuția speciilor potrivit scenariilor pesimiste: RCP4.5 pesimist, RCP8.5</i>	18
<i>Consecințele pentru masa lemnoasă la nivel de țară</i>	18
<i>Alegerea studiilor de caz pentru modelarea regională</i>	19
CONCLUZIILE	22
ANEXE	23
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE	24

Rezumat executiv al activităților în etapa II (2023)

Etapa a constat în trei acțiuni complementare: în prima acțiune (A2.1. *Măsurarea în teren ale trăsăturilor speciilor principale investigate*), au fost măsurate caracteristicile fundamentale (trăsături) ale speciilor forestiere în parcelele de inventariere create în cadrul proiectului. Scopul acestei acțiuni a fost de a obține informații cantitative privind principalele trăsături ale speciilor forestiere de-a lungul unui gradient controlat privitor la compoziție.

Trăsăturile fundamentale măsurate sunt: înălțimea totală a arborilor, densitatea lemnului și biometria coroanelor. Gradientul controlat de compoziție a fost completat și s-au făcut toate măsurătorile de teren necesare, de la inventar la măsurători la laborator. Pentru studiul privind biometria coroanelor am folosit metode de înaltă precizie bazate pe scanarea arborilor în 3D cu ajutorul unui scanner LiDAR terestru. Prelucrarea norilor de punct a fost de asemenea bazată pe algoritmi avansați. Aceste informații vor fi folosite pentru activitățile de modelare ulterioare.

În cadrul celei de-a doua activități (A2.2. *Ajustarea și calibrarea unor modele de prezență a speciilor forestiere*), datele privind prezența-absența speciilor forestiere din setul de date IFN au fost utilizate pentru a ajusta, calibra și valida modelele de distribuție a speciilor. Aceste modele, care fac parte din familia modelelor de distribuție, permit proiectarea compatibilității climatice viitoare a fiecărei specii în funcție de scenariile climatice date. Modelele de compatibilitate și de distribuție a speciilor au permis realizarea unor predicții la nivel de țară cu privire la compoziția speciilor viitoare și a volumului de lemn pe picior.

Rezultatele modelării arată schimbări îngrijorătoare în distribuția speciilor în România. Setul hărților dinamice care prezintă aceste schimbări pentru două scenarii sunt disponibile online pe site-ul proiectului (<https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/>).

Rezultatele arată faptul că toate pădurile vor suferi schimbări majore în compoziția lor, doar câteva specii reușind să își mențină distribuția actuală. Molidul, un arbore emblematic și de mare importanță economică, va suferi una dintre cele mai mari contracții ale arealului natural dintre toate speciile. Munții Carpați vor deveni un adevărat refugiu pentru o serie întreagă de specii, beneficiind de o climă azonală mult mai favorabilă decât în zonele de câmpie. O serie întreagă de specii de foioase valoroase își vor găsi acolo refugiul, înlocuindu-se astfel speciile de rășinoase.

În cadrul ultimei activități (A2.3. *Analiza rezultatelor modelelor de distribuție a speciilor, studii de caz selectate pentru evaluarea regională*), rezultatele simulărilor de proiecție a speciilor sunt analizate pentru a determina impactul schimbărilor în compoziție asupra evoluției stocurilor în viitor. Aceste previziuni se bazează pe ipoteze clasice din literatura de specialitate, spre exemplu ipoteza diseminării arborilor „full scale migration”, dar rămân foarte optimiste, astfel încât modelarea reprezintă o previziune foarte optimistă a evoluției resurselor forestiere. Modelele arată că există o diferență semnificativă între schimbările de compoziție din zonele de câmpie și cele montane. Gama de specii afectate de viitoarea ieșire din zona de compatibilitate este foarte diferită în funcție de altitudine. Astfel, au fost evidențiate două gradient care vor fi utilizate pentru studiile regionale: pe de o parte, un gradient de altitudine care va permite examinarea tranziției dintre zonele de foioase din câmpie și zonele muntoase, iar pe de altă parte, un gradient latitudinal care va pune în contrast zonele din nordul țării cu cele din sudul țării.

În cadrul activității A2.1. (*Măsurarea în teren ale trăsăturilor speciilor principale investigate*) a fost dezvoltat un articol care prezintă o metoda de folosire a tehnologiei LiDAR terestră pentru optimizarea stabilirii modelelor allometrice, care a fost trimis spre evaluare într-un jurnal cotate ISI: Dănila I, Bouriaud O. Coșofreț C. **Optimizing tree sampling for biomass model fitting using a terrestrial laser scanner**. Biomass and Bioenergy.

Un articol cu privire la densitatea lemnului, aceasta fiind o trăsătură fundamentală a speciilor forestiere, a fost publicat în jurnalul Forest Ecology and Management (Petrișan C. et al. 2023. **Deadwood density, C stocks and their controlling factors in a beech-silver fir mixed virgin European forest**. For Ecol Manage 539, 121007).

În cadrul activității A2.2 (*Ajustarea și calibrarea unor modele de prezență a speciilor forestiere*) a fost dezvoltat și trimis spre evaluare un articol ISI dedicat efectului managementului asupra bilanțului de carbon. Acest studiu se concentrează asupra coroanei arborilor, ca locul de absorbție a luminii și a CO₂: Bouriaud et al. **Selective harvest regulates leaf area without affecting ecosystem fluxes**. Global Biogeochemical Cycles.

Un articol a fost publicat în jurnalul Forests, care descrie co-ocurența a speciilor și asocierea lor: Palaghianu C. Coșofreț C. 2023. **Patterns of forest species association in a broadleaf forest in Romania**. Forests, 14(6), 1118.

Conform planului, au fost calibrate și implementate modele de distribuție a speciilor. Hărțile care arată schimbările în distribuția spațială a speciilor forestiere sunt disponibile pe site-ul web al proiectului la:

<https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/harti-de-schimbari-de-distributie/>

În cadrul activității A2.3 (*Analiza rezultatelor modelelor de distribuție a speciilor, studii de caz selectate pentru evaluarea regională*) a fost dezvoltat un articol cu titlul „**Comparing the efficiency of forest mitigation policies: Is sequestering more efficient than using wood?**” care urmează a fi trimis spre evaluare într-un interval de câteva săptămâni.

Predicțiile privind distribuția viitoare a speciilor forestiere și consecințele acestora asupra stocurilor de biomasă forestieră din România au fost prezentate și discutate cu decidenți din minister (secretar de stat pentru păduri, directori de departament, consilieri ai ministrului Mediului, Apelor și Pădurilor). Aceste rezultate ale proiectului au fost folosite pentru redactarea unor propuneri de politici publice pentru a permite adaptarea pădurilor la schimbările climatice.

Proiectul a fost promovat prin participarea la întâlniri de lucru din cadrul ministerului în cursul procesului de elaborare a noului cod silvic, prin participarea cu o prezentare la un eveniment al administratorilor de păduri din 21.03.2023 (<https://www.egco.ro/2023/03/22/conferinta-organizata-de-episcopia-greco-catolica-de-oradea-cu-ocazia-zilei-internationale-a-padurilor/>) și în mas media prin intermediul emisiunii „Plantăm fapte bune în România” animată de dl. dr. ing. Mihai Enescu, vizibilă pe Youtube la : <https://youtu.be/uIVzSThSDHo>.

Bilanț : 2 articole ISI publicate, 2 articole ISI în evaluare ; 1 articol BDI publicat ; 3 participări la conferințe internaționale (ne-clasificate ISI) și la o conferință cu specific profesional.

Descrierea științifică cu punerea în evidență a rezultatelor etapei

A2.1. Măsurarea în teren ale trăsăturilor speciilor principale investigate.

În această etapă au fost amplasate un număr de 21 de suprafețe de probă în arborete gospodărite cu compoziție din speciile țintă (conform Tabelul 6, RST - Etapa I) (Figura 1). Astfel a fost completat tabelul cu gradientul ecologic constituit inițial (Tabelul 1), cumulând în prezent un număr total de 31 de suprafețe de probă, cele mai multe fiind localizate în partea estică a României (în regiunea Moldova, cu jud. Bacău, Neamț și Suceava). În vestul țării au fost amplasate 6 suprafețe pentru amestecul de specii de evercinee xerofite, în cadrul județului Bihor. Pentru 23 de suprafețe din numărul total au fost preluate cu scannerul laser terestru modelele 3D a terenului, acțiune desfășurată în perioada de repaus vegetativ (arborii fără frunze) conform protocolului de cercetare.

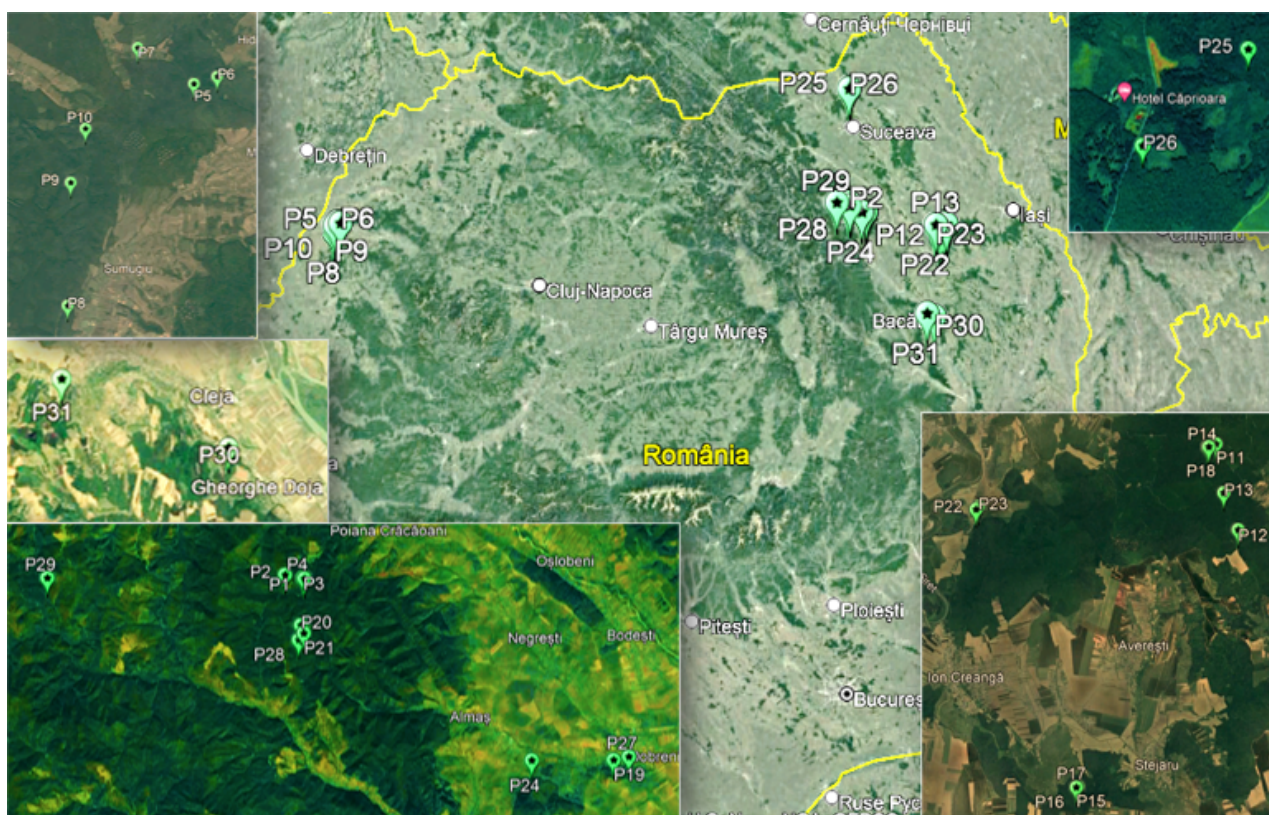


Fig. 1. Localizarea suprafețelor de probă create prin proiectul la nivel național și local.

Toate suprafețele de probă au fost inventariate în mod clasic la amplasare pe teren, unde arborii identificați au primit un număr curent, cărora le-au fost măsurată distanța orizontală de la aceștia până la centru suprafeței de probă, unghiul format cu direcția nordului (azimutul) față de centru, două diametre de bază ($h = 1,3$ m) pe direcții perpendiculare, înălțimile totale și elagate pe clase de diametre și specie. Arborii au fost materializați în teren cu bandă de culoare galbenă și negru printr-un inel pe trunchi la înălțimea de 1,3 m (Anexa 2). Operația a fost necesară pentru a facilita ulterior identificarea acestora pe modelele 3D obținute, favorizând și o ușoară decupare a suprafețelor de probă în aplicația Z+F LaserControl 9.0.2, dedicată TLS-ului Z+F Imager 5010. De asemenea, în această etapă au fost prelevate carote de creștere cu burghiul Pressler de la toți arborii pentru analize de laborator (densitate și productivitate) (Anexa 2).

Tabelul 1. Suprafețele de probă amplasate după gradientul ecologic constituit.

Numărul suprafeței de probă	de	Compoziția	Localizarea suprafețelor	Număr de arbori	Anul instalării
P1		MoBr	47°02'45.25"N	28	2022
P2		BrPam	47°02'49.84"N	24	2022
P3		Mo	47°02'46.03"N	27	2022
P4		MoPam	47°02'46.17"N	17	2022
P5		CeGo	46°55'49.12"N 21°59'29.7"E	17	2022
P6		Ce	46°55'56.19"N	10	2022
P7		CeCa	46°56'18.8"N 21°58'16.72"E	10	2022
P8		CeGi	46°52'35.34"N 21°57'04.8"E	19	2022
P9		Go	46°54'19.68"N	16	2022
P10		CeTe/Ju	46°55'06.63"N	22	2022
P11		Fa	46°55'8.43"N 27° 4'28.32"E	10	2023
P12		FaGo	46°53'53.22"N 27° 4'52.61"E	18	2023
P13		CaGo	46°54'25.76"N 27° 4'36.00"E	20	2023
P14		FaCa	46°55'6.15"N 27° 4'19.21"E	14	2023
P15		MeFa	46°50'14.86"N 27°01'15.3"E	12	2023
P16		StCa	46°50'14.1"N 27°01'16.85"E	8	2023
P17		St	46°50'15.49"N 27°01'17.5"E	11	2023
P18		Ca	46°55'6.04"N 27°04'17.59"E	8	2023
P19		Me	46°59'23.00"N	16	2023
P20		FaPam	47°01'55.6"N 26°16'24.79"E	11	2023
P21		BrFa	47° 1'47.00"N 26°16'29.00"E	12	2023
P22		JuSt	46°54'19.15"N	12	2023
P23		Ju	46°54'21.37"N	12	2023
P24		JuCa	46°59'25.00"N	13	2023
P25		ScCa	47°42'19.00" N 26°18'21.00"	15	2023
P26		GoSt	47°41'59.00"N	16	2023
P27		MeSc	46°59'26.00"N	23	2023
P28		Br	47° 1'40.00"N 26°16'21.00"E	16	2023
P29		MoFa	47° 2'53.00"N 26° 9'50.00"E	19	2023
P30		Sc	46°22'57.00"N	13	2023
P31		GoPlt	46°24'3.00"N 26°53'15.00"E	23	2023

Carotele prelevate au fost scanate în primă fază cu ajutorul unui scanner de birou pentru imagini grafice (Epson Expression 10000XL) la rezoluție înaltă (600 dpi) pentru determinarea caracteristicilor biometrice ale acestora. Lungimea s-a măsurat cu ajutorul aplicației Coorecorder 8.1 și exportate cu C.Dendro 8.1. Uscarea carotelor s-a realizat în etuvă (de tipul BIOBASE BOV-T105F) la temperatura de 49°C până la o masă constantă între două cântăriri succesive.

Pentru scanarea laser a suprafețelor s-a folosit scannerul laser terestru Z+F Imager 5010 de tip „phase shift” după cum a fost menționat în etapa precedentă, utilizând principiile de scanare amintite (caracteristicile tehnice de utilizare a aparatului laser) și schema de amplasare adoptată a echipamentelor necesare (Anexa 1). Dispozitivul de amplasare a echipamentelor a fost ales prin asigurarea vizibilității din fiecare punct de stație a minim trei repere fixe, necesar a fi poziționate la o distanță minimă de 1,5 m. Așadar, a fost adoptat un număr de 7 puncte de stație și 6 ținte/ repere fixe (sfere de 200 mm) pentru realizarea fuzionării (coregistrare) a norilor de puncte obținuți (Figura 3). În acest sens, au fost efectuate testări în raport cu volumul datelor stocate și cu ocluzia incidentă în coronament. Pentru scanarea din centrul suprafețelor s-a ales o rezoluție și o calitate mai înaltă față de celelalte 6 puncte de stație care au fost poziționate pe raza cercului de probă. Raza cercului este 12,62 m în plan orizontal pentru suprafețe de probă circulare de 500 m². Pentru că arboretele întâlnite/ instalate sunt divers distribuite în suprafață, s-a evitat instalarea aparatului la mai puțin de 1,5 m de arbori sau ținte, pentru a reduce obturarea

câmpului de scanare. De regulă, o scanare durează în medie circa 14 minute pentru rezoluție și calitate ridicată sau 7 minute valori mai reduse.

După coregistrarea scanărilor și exportul suprafețelor delimitate în aplicația dedicată TLS-lui (Z+F LaserControl), arborii au fost individualizați cu ajutorul aplicației CloudCompare V2.12.4 (Figura 3), proces pentru care a fost necesar un timp mai îndelungat.

Ponderea speciilor se poate analiza pentru fiecare suprafață de probă (Figura 2), compoziția fiind determinată cumulat în raport cu suprafața de bază (G) a arborilor. Căutarea arboretelor potrivite pentru includerea în gradientul compozițional nu a fost ușoară în contextul respectării proporției de participare a speciilor. Arboretele selectate dintr-o singură specie (considerare pure) prezintă specia principală în compoziție peste 90%, iar pentru arboretele propuse pentru două specii, proporțiile dorite se încadrează în limita de 30-70(%). Mai dificil a fost de realizat compoziția CeCa (suprafața de probă 10), GoPlt (piața 31) și MeSc (piața 27) pentru arboretele considerate mature. Carpenul este o specie ajutătoare în compoziție în primele faze de dezvoltare, plopul suferă în ultima perioadă datorită condițiilor climatice, iar asocierea dintre mesteacăn și salcâm nu este una obișnuită, salcâmul având cicluri de producție mai scurte.

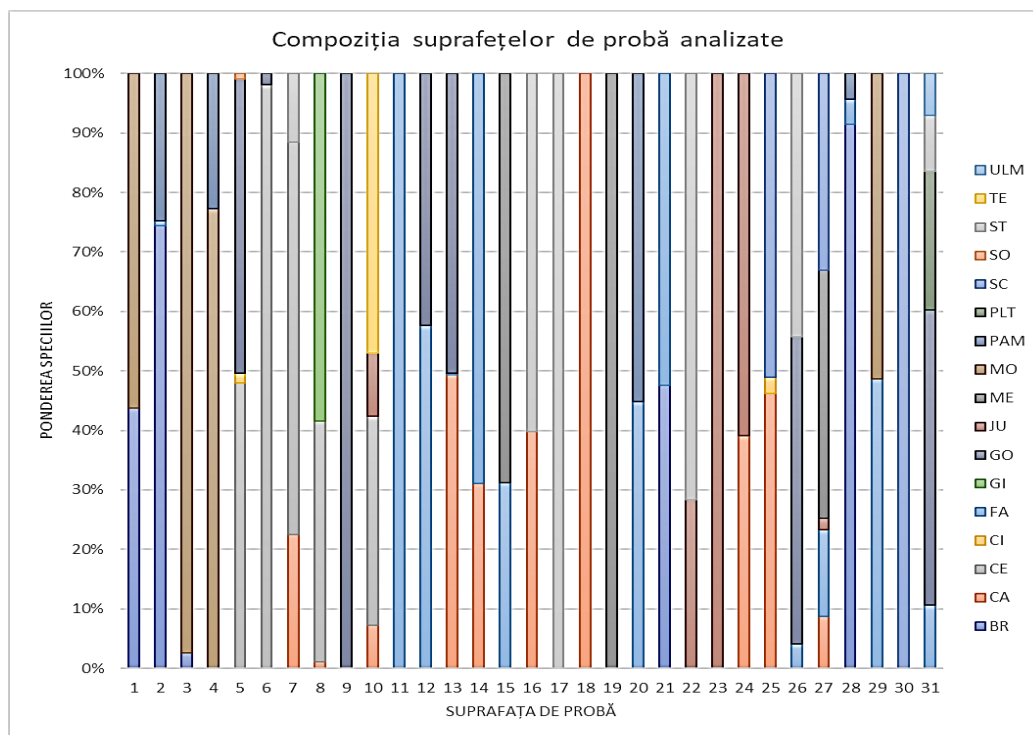


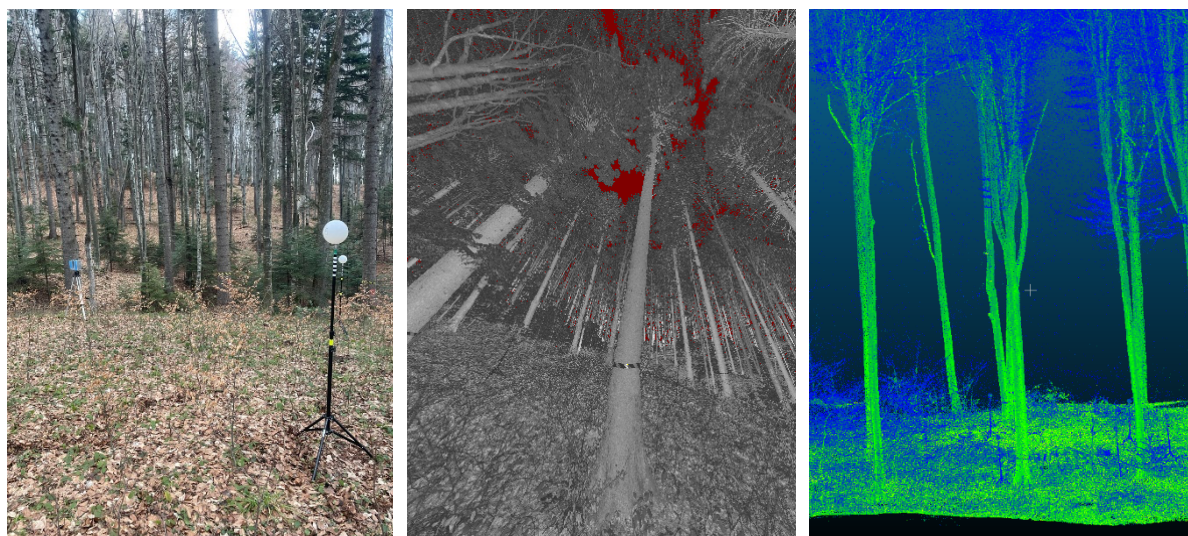
Fig. 2. Ponderea speciilor în compoziția suprafețelor de probă analizate.

Pentru toate suprafețele de probă instalate se regăsesc în compoziție un număr de 17 specii forestiere (Tabelul 2). Numeric cea mai bine reprezentată specie este fagul (*Fagus sylvatica*) cu un număr de 74 de exemplare, urmată de molid (*Picea abies*) cu 61 de exemplare, iar cea mai slabă specie reprezentată fiind sorbul (*Sorbus torminalis*) cu un singur exemplar întâlnit în vestul țării.

În total au fost inventariați 492 de arbori în cadrul celor 31 de suprafețe de probă, cu un diametru mediu de cca. 36,5 cm și înălțime medie de cca. 26,4 m. După diametru, cele mai mari valori au fost înregistrate la specia Stejar cu cca. 89,8 cm, iar pentru înălțime valoarea maximă este înregistrată la Molid (42,2 m) în piața de probă 29 (arboret cu structură plurienă).

Tabelul 2. Variația caracteristicilor biometrice în suprafețele de probă analizate.

Nr.crt.	Specia	Arbori	Diametru (cm)			Înălțimea (m)		
			Media±StdDev	Min	Max	Media±StdDev	Min	Max
1	BR	44	32,13±7,93	9,2	63,5	32,13±7,93	7	41,5
2	CA	59	31,62±10,62	8,05	54,75	24±5,97	10,8	32,8
3	CE	31	37,81±14,94	9,1	66,15	26,64±4,25	14,8	32,1
4	CI	2	24,08±5,34	20,3	27,85	24,3	-	-
5	FA	74	36,28±17,07	8,3	75,65	26,7±9,38	6,8	38,1
6	GI	7	39,29±16,17	8,65	55,95	23,45±3,89	20,7	26,2
7	GO	57	35,46±11,94	12,6	62,8	25,21±4,59	13,6	35
8	JU	31	33,97±9,14	20,1	56,55	20±3,66	11,8	25,9
9	ME	34	31,92±9,18	18,85	52,6	22,86±4,08	15,6	27,8
10	MO	61	38,72±10,2	20,2	76	33,57±5,59	15,8	42,2
11	PAM	22	34,12±8,09	18,6	47,5	29,23±3,84	24,4	36,1
12	PLT	3	37,88±5,34	33,3	43,75	24,83±1,55	23,1	26,1
13	SC	21	42,75±12,26	25,35	77,3	24,41±6,11	12,8	38,1
14	SO	1	14,3	-	-	14,8	-	-
15	ST	28	44,89±15,63	23,15	89,75	25,93±3,94	16,6	33,3
16	TE	13	24,8±11,42	8,4	40,3	18,86±4,53	12	24,2
17	ULM	4	17,78±3,6	14,45	22,8	15,55±1,2	14,7	16,4
Total general		492	36,46±13,31	8,05	89,75	26,39±7,2	6,8	42,2



a)

b)

c)

Fig. 3. Procesul de prelucrare a norilor de puncte. Imagini din cadrul suprafeței de probă 21 (BrFa): Imagini din teren, în timpul scanărilor 3D a terenului (a), din timpul coregistrării norilor de puncte în aplicația Z+F LaserControl (b) și din momentul individualizării arborilor (aplicația CloudCompare).

Măsurătorile efectuate pe teren au fost introduse într-o bază de date. Scanările au fost, de asemenea, procesate pentru a extrage date cantitative despre coroanele arborilor. Scopul proiectului este de a măsura parametrii biometrici/dendrometrici ai coroanelor arborilor pentru a cuantifica impactul amestecurilor de specii asupra morfologiei coroanelor. Măsurătorile TLS arată fără echivoc că forma și volumul coroanelor arborilor din aceeași specie pot varia foarte mult, în funcție de apropierea dintre arbori. După cum arată figura 4, nu numai lungimea, ci și direcția și volumul ocupat de ramurile unui arbore pot varia foarte mult.

Pentru aceste analize, norii 3D de înaltă precizie obținuți din scanări au fost utilizați pentru a extrage partea corespunzătoare coroanelor verzi ale arborilor. Algoritmii bazați pe triangulații Delaunay sunt apoi utilizați pentru a determina învelișul exterior convex al coroanelor. Prin ajustarea formelor convexe (Fig. 5), este posibilă estimarea suprafeței de contact a coroanei și a volumului pe care îl ocupă. Datorită acestor modele, este posibil să se cunoască dimensiunile coroanei în toate direcțiile și, mai ales, volumul, care este una dintre caracteristicile fundamentale ale speciei, dar care este foarte greu de estimat.

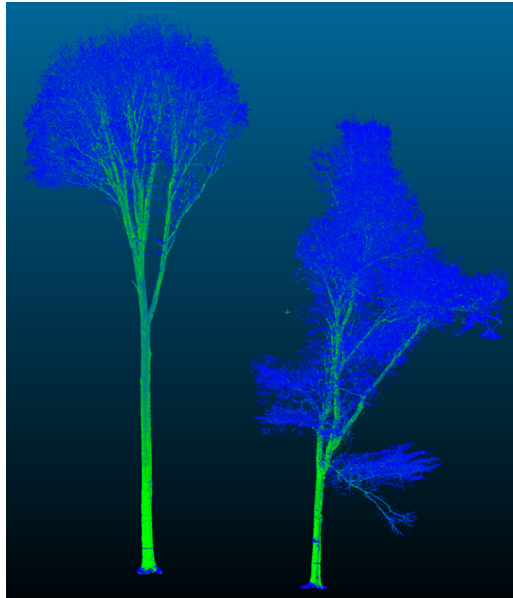


Fig 4. Scanări TLS de înaltă precizie a doi arbori eșantionați în suprafețele de probă create. Figura ilustrează variabilitatea formei și a volumului coroanelor arborilor observată în cadrul unei singure specii.



Fig 5. Scanarea 3D de înaltă precizie a unui arbore cu TLS în suprafețele de probă create (stânga), permite estimarea volumului convex a coroanei, reconstituită prin interpolări Delaunay (dreapta).

A2.2. Ajustarea și calibrarea unor modele de prezență a speciilor forestiere.

Calibrarea modelului de prezență a speciilor

În baza acordului privind folosirea datelor IFN pentru proiectul PCE-108, datele culese la nivel de arbore au fost prelucrate pentru a crea matricea de prezență-absență a speciilor principale. Modelele de distribuție ale speciilor sunt modele care asociază prezența unei anume specii, pe baza parametrilor climatici. Prezența sau absența poate fi corelată cu diverși parametri climatici, pentru a defini probabilitatea ca o specie să fie observată în anumite condiții climatice. Aceste modele de compatibilitate (sau potrivire) climatică sunt folosite mai departe pentru a transpune condiții climatice (actuale sau viitoare) în zone geografice. Zonele de potrivire sunt zonele în care climatul este conform condițiilor necesare pentru prezența speciei analizate.

Mai multe modele de potrivire climatică au fost dezvoltate la nivel european, spre exemplu Mauri et al. 2017, Chakraborty et al. 2021 care propun și hărți de distribuție spațială. În aceste studii, modelul de potrivire climatică se bazează pe un ansamblu mare de parametri climatici, care creează o anvelopă multi-dimensională în interiorul căreia prezența speciei este posibilă. Modelele au fost dezvoltate în baza datelor setului de date EU-Forest (Mauri et al. 2017), care cuprinde aproape toate țările din EU, și la care au participat inventarele forestiere naționale cu mii de puncte de observație. Dar, modelele dezvoltate de Mauri et al. (2017) și Chakraborty et al. (2021) se bazează pe ipoteze foarte grele, anume: stabilitatea în timp a relațiilor între variabilele climatice și prezența unei specii, stabilitatea în timp a relațiilor dintre parametrii climatici (datorită faptului că modelele sunt multi-dimensionale, „forma” norului multi-dimensional definește prezența speciilor, și trebuie să rămână constantă în timp, ceea ce nu este confirmat în practică).

O altă dificultate întâmpinată în dezvoltarea acestor modele de distribuție ale speciilor este faptul că matricele de prezență-absență din seturile de date constituie descriu nișa creată, nu și nișa teoretică. Chiar și în cazul acestor două studii (op. cit.) care folosesc un set de date european, nișa observată nu cuprinde nișa teoretică. Motivele pentru această discrepanță au fost discutate de mai de mult (Barbet-Massin et al. 2012, Senay et al. 2013):

- gestiunea favorizează anumite specii, în defavoarea altora;
- migrația speciilor este lentă, foarte lentă, iar zona de compatibilitate este mult mai mobilă.

Ca urmare, speciile se întâlnesc în zone în care nu mai sunt compatibile (fenomen numit „trailing edge”, Svenning and Sandel 2013) pentru că ieșirea din zona de compatibilitate nu înseamnă o mortalitate neapărat rapidă. Iar fenomenul simetric se întâmplă: zonele noi de compatibilitate nu sunt ocupate rapid („leading edge”), tot din cauza propagării redusă a speciilor forestiere. Aceste „time-lags” (Ells et al. 2023) creează o imagine falsă asupra potențialului speciilor, dar și a posibilității de apariție a unor ansamble fitologice.

Molidul este una dintre speciile favorizate în România, care a ocupat mai mult spațiu decât ar fi asigurat un echilibru natural, de exemplu în detrimentul bradului. Astfel, pentru a rezolva aceste probleme, mai mulți autori au recurs la pseudo-date ce au fost create prin aplicarea unui algoritm care estimează prezența unei specii (Senay et al. 2013). Una dintre consecințele acestei abordări este că datele utilizate pentru calibrarea modelului de distribuție nu mai sunt observații, ci predicții ale algoritmului.

Relațiile între variabilele climatice pot influența ajustarea modelelor, dacă modelul este calibrat pe un set de date cu o colinearitate ridicată între variabile. Au fost elaborate mai multe metode de reducere sau atenuare a colinearității. Dintre aceste metode, care sunt metode de reducere, cele mai utilizate sunt cele bazate pe teste recursive care elimină succesiv o variabilă și măsoară impactul asupra calității

predicției unui anumit model. Abordările corelative au avut un oarecare succes, dar sunt limitate atunci când scopul este de a crea modele bazate pe un set mare de variabile ale căror relații pot fi neliniare.

În plus față de coliniaritate, modelele construite pe un set mare de variabile suferă aproape întotdeauna de ceea ce se numește adaptare multiplă („overfitting”). Adaptarea multiplă apare atunci când nu numai informațiile variabilelor sunt învățate de un model, ci și legăturile dintre variabile sunt învățate prin procesul de ajustare a modelului. Aceste legături constituie o învățare nedorită, deoarece aduc în model memoria unor procese trecute care nu sunt adaptate la situațiile viitoare în care modelul va fi solicitat să facă predicții. Acest fenomen este cu atât mai supărător în cazul modelelor de predicție a distribuției speciilor, care, prin definiție, vor trebui să prevadă distribuțiile viitoare, în condiții climatice despre care știm că vor fi diferite de cele actuale.

Pentru calibrare, am folosit faptul că modelele de predicție a compatibilității climatice au fost dezvoltate în baza unui set de date parțial pentru România. Acest set de date este sistematic spațial, dar nu acoperă decât un sfert a volumului total de date.

Statisticile utilizate pentru a analiza performanța modelului sunt fie proporții de coerență între predicții și observații, fie statistici mai complexe care utilizează proporții ponderate. Una dintre cele mai frecvent utilizate statistici este "statistica competențelor reale" (True Skills Statistics, Allouche et al. 2006). Limitările statisticilor SST sunt bine cunoscute, dar datele de inventar pot fi utilizate pentru a ne proteja împotriva problemelor pe care le poate cauza utilizarea lor. De asemenea, este de remarcat omogenitatea dintre datele utilizate pentru a ajusta aceste modele (și, prin urmare, utilizarea statisticilor) și datele utilizate pentru validarea și calibrarea externă.

Calibrarea modelului RandomForest

Un model RandomForest (RF) este un model adaptat bazat pe un algoritm de învățare automată, dezvoltat pentru a rezolva probleme de regresie sau de clasificare. Principiul său este de a crea un set de arbori de regresie pe baza unei subeșantionări aleatorii a datelor dintr-un set de instruire. Mediile predicțiilor din acești arbori sunt apoi folosite pentru a prezice noi valori ale datelor. Prin urmare, este o abordare de tip bootstrap. Ca în cazul oricărui arbore de regresie, unul dintre punctele critice este găsirea punctelor de ramificare, care sunt stabilite de algoritm pe baza unor extrageri aleatorii succesive, pentru care se testează variabila explicativă care oferă cea mai bună predicție posibilă.

Atunci când se adaptează un model RF, principalul parametru de adaptare este numărul de variabile explicative care trebuie luate în considerare pentru fiecare ramură a arborilor de decizie. Algoritmul de auto-optimizare sprijină aceste evoluții cu soluții standard. Acestea se bazează pe autoevaluarea creată de validarea încrucișată, care urmărește, în esență, minimizarea deviației medii pătratice (RMSE). Este posibil să se intervină în ajustare și să se caute numărul de variabile explicative în afara algoritmului propriu-zis de învățare a modelului RF, dar rezultatele nu au arătat nicio îmbunătățire cantitativă a RMSE.

La fel ca toate modelele bazate pe învățare automată, modelul este grav limitat de faptul că predicțiile sunt ele însele întotdeauna limitate de intervalul de valori furnizate de observație. În mod intrinsec, aceste modele nu sunt capabile să producă extrapolări. Acest lucru subliniază importanța setului de instruire, care trebuie să fie cât mai complet posibil, deoarece are o influență directă asupra predicțiilor. În acest caz, calibrarea s-a bazat pe setul de date consolidate din ciclul 1 al IFN.

Ajustările s-au bazat pe pachete de funcții foarte populare pe platforma R, anume randomForest și biomod2. Pachetul "caret" este utilizat pentru a testa o optimizare externă.

Calibrarea modelului IKS

În contrast, modelul IKS este un model foarte econom, bazat pe un număr restrâns de parametri, și care definește zona de compatibilitate climatică pentru o anumită specie în baza a doar trei indicatori. Pentru un asemenea model efortul de calibrare este redus la trei parametri (desigur, pentru fiecare specie în parte). Robustețea modelului conferită de parcimonia sa a făcut posibilă evitarea multor dificultăți.

Pentru fag, efortul de calibrare reprezintă 14,0% care este proporția punctelor de observație IFN pentru care prognoza este greșită (Fig. 6). Pentru brad și molid (Figura 7) proporția este mai mică, fiind de 3,7% și respectiv 8,4%. Pentru gorun și salcâm de 7,5% și 3,7%. Pentru stejar și brad, limita a fost legată de pragul minim anual de temperatură pe care aceste specii îl pot tolera. Scăderea pragurilor de temperatură rezolvă problema.

Principalul motiv al diferenței dintre distribuția reală observată și cea prognozată de model, în cazul fagului este faptul că pragul modelului pentru temperaturile minime este prea mic. Acest lucru poate fi observat prin examinarea histogramei altitudinilor în cele două clase. Punctele pentru care modelul prezice corect prezența și punctele pentru care modelul nu prezice prezența, în timp ce datele din teren arată prezența speciei (Figura 8).

Acest lucru poate fi observat prin examinarea histogramei altitudinilor în cele două clase: punctele pentru care modelul prezice corect prezența și punctele pentru care modelul nu prezice prezența, în timp ce datele din teren arată prezența speciei. Pentru salcâm, diferențele sunt explicate mai degrabă printr-o limită de rezistență față de secete mai mică decât cea reală, pentru zona sudică a țării. Însă, întrecerea acestor limite de secetă se datorează datorită faptului că estimarea rezervei de apă utilă a solului este foarte dificilă, și poate fi greșită local.

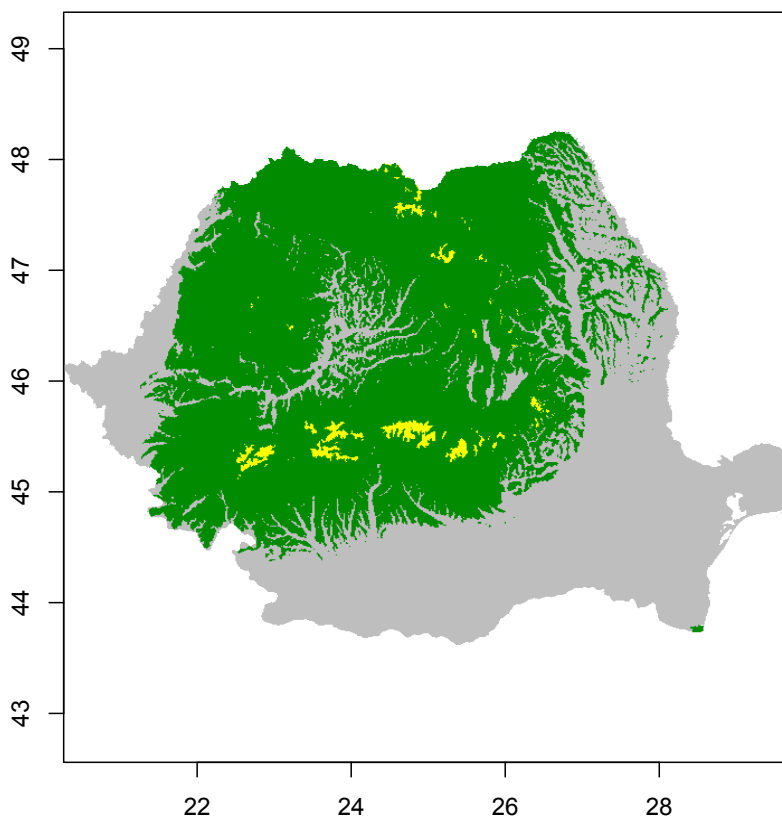


Fig 6. Exemplul de calibrare a modelului IKS pentru Romania : prezența fagului la altitudini mari nu era bine reprezentată de model. Aceste zone sunt colorate cu galben deschis.

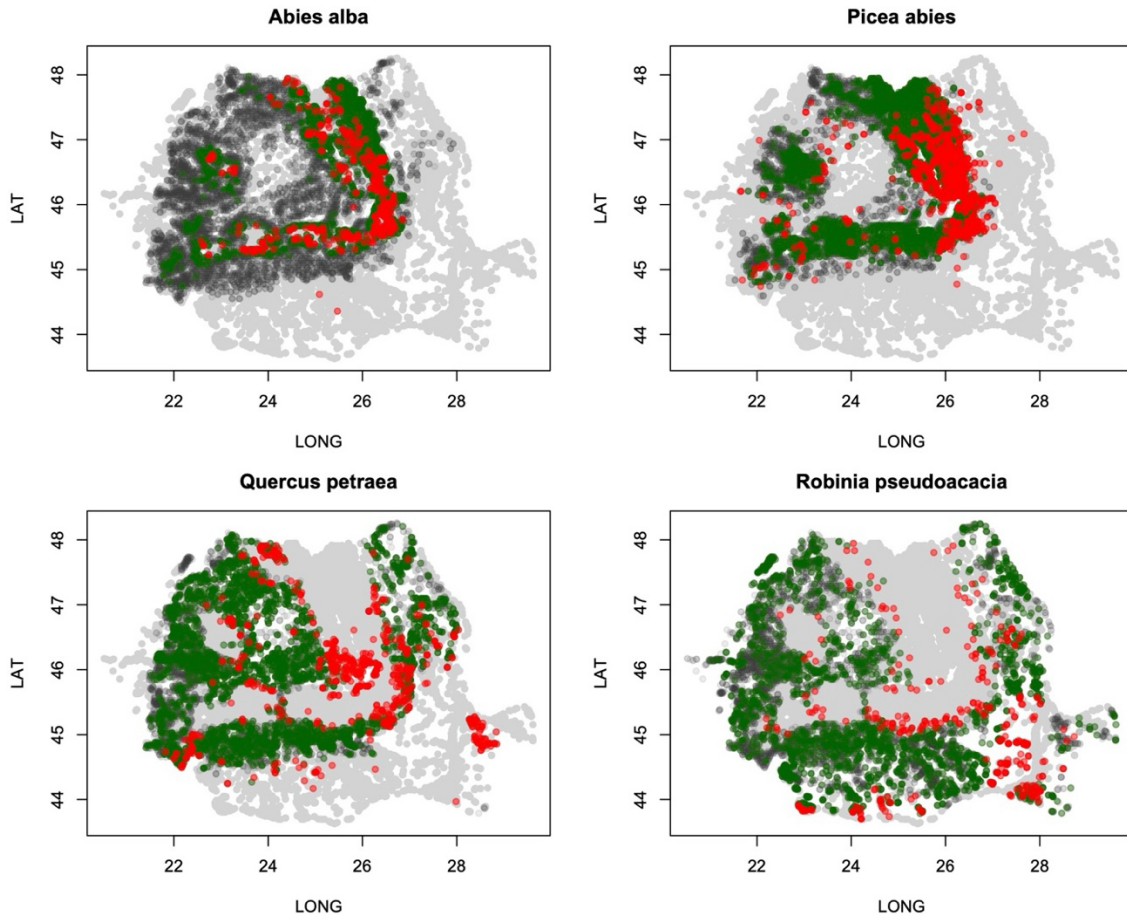


Fig. 7. Hărți care arată diferențele dintre prezența observată (rețeaua IFN) și prezența prezisă de modelul IKS pentru patru specii. Punctele roșii indică punctele în care specia este prezentă, dar prezența nu este prezisă de model.

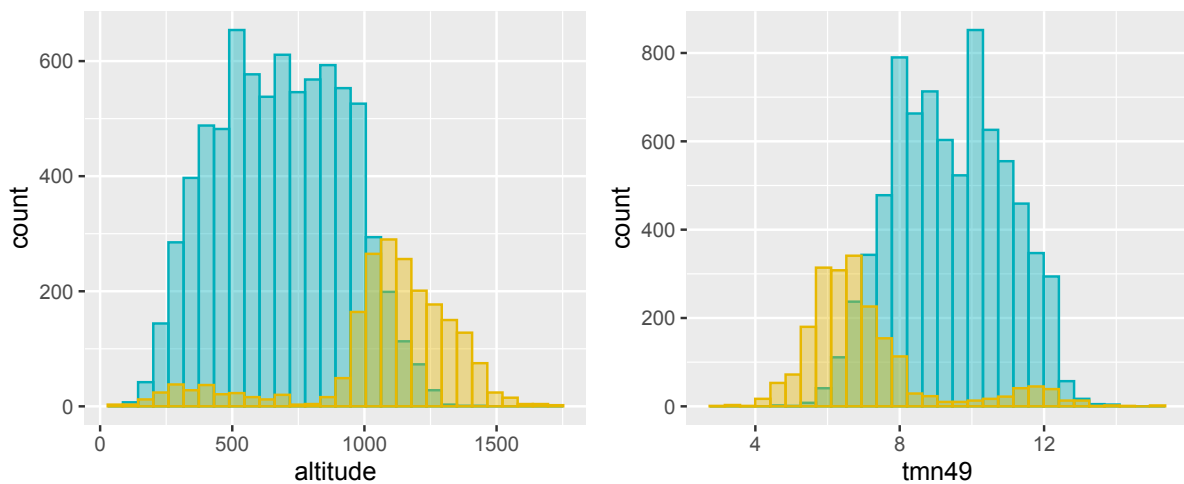


Fig. 8. Compararea distribuției altitudinilor (stânga) și a temperaturilor (dreapta) pentru zonele în care modelul prevede corect prezența fagului (albastru) și zonele în care modelul necalibrat nu prevede prezența fagului deși este prezent (galben).

Calibrarea modelului de estimare a stării viitoare

Estimarea stării viitoare a pădurilor României cere două etape succesive. Prima etapă reprezintă predicția potrivirii climatice a speciilor, iar în a doua etapă este preluată compoziția potențială viitoare (exemplu pentru Fag) și se estimează volumul sau productivitatea care ar putea fi observată. Modelul de predicție a volumului și a productivității are trei componente ce trebuie calibrate: prima este mortalitatea arboretelor, a doua este regenerarea și a treia este productivitatea arboretelor.

Mortalitatea este unul dintre procesele cel mai greu de modelat. În acest caz, mortalitatea capătă o importanță deosebită deoarece modelul de compatibilitate climatică poate identifica speciile care se vor muta în afara zonei lor de compatibilitate. Însă determinarea comportamentului acestor specii și a probabilității de mortalitate este încă o sarcină foarte dificilă.

În contextul simulării stării viitoare a pădurilor, parametrii care trebuie ajustați sunt, de exemplu, durata de viață a unui arboret după ce acesta a părăsit zona de compatibilitate. Mortalitatea nu este imediată, cu excepția accidentelor, așa cum arată extinderea zonelor marginale care au fost deja clar identificate. După ieșirea din zona de compatibilitate, arboretele pot rezista câteva decenii. În acest caz, regulile de mortalitate au fost definite după cum urmează:

- orice arbore situat în zona de incompatibilitate are o durată maximă de supraviețuire de 20 de ani
- orice arbore de peste 80 de ani în afara zonei sale de compatibilitate va muri în 10 ani

Regulile de compatibilitate sunt evaluate la două date diferite, care corespund celor două orizonturi de predicție ale modelelor de distribuție a speciilor, care la rândul lor depind de orizonturile de predicție a climei: 2050 și 2070.

Vârsta-cheie de 80 de ani este determinată pe baza observațiilor IFN: aceasta este vârsta pe care o poate atinge un arbore debilitat. Determinarea acestei vârste va face obiectul unor cercetări suplimentare în viitor. Ea reprezintă o viziune destul de optimistă, în care vigoarea arborilor este suficientă în stadiile tinere.

Cea de-a doua componentă cheie, regenerarea, este procesul prin care sunt înlocuite arboretele recoltate sau debilitate/uscate. Acesta este unul dintre procesele asupra căruia este posibil să se exercite cea mai mare influență, prin favorizarea anumitor specii. În acest caz, au fost menținute doar speciile cele mai compatibile. Scopul acestui filtru este de a produce o versiune optimistă a ceea ce se poate face pentru a ne adapta la schimbările climatice. Regenerarea, permițând înlocuirea speciilor destinate să dispară, nu permite, evident, refacerea rapidă a stocului de biomasă.

Dispersia speciilor este cel mai mare obstacol în calea răspândirii lor. Speciile mai favorabile nu se pot instala/regenera fără ajutor, cu excepția cazului în care există deja fructificație la arborii din arboret. Modelarea trebuie apoi să se bazeze pe o ipoteză de lucru cunoscută sub numele de dispersie totală. Din nou, aceasta este o ipoteză foarte optimistă, deoarece presupune că orice specie poate fi regenerată în orice moment. Mai multe modele de predicție fac această ipoteză, mai mult sau mai puțin implicit.

Modelul de productivitate calibrat este un model de productivitate la nivel de arboret. Unele modele de creștere sunt modele care operează la nivelul arborelui. Aceste modele sunt adesea mai ușor de ajustat. Cu toate acestea, ele sunt, de asemenea, mai sensibile la variațiile de sănătatea a arborelui, deoarece se concentrează asupra unui individ și nu asupra unui grup de indivizi unde au loc întotdeauna un anumit număr de compensații și interacțiuni. Dificultatea de a prevedea productivitatea constă în luarea în considerare a celor doi factori majori de schimbare: compoziția speciilor și condițiile climatice.

Modelele statistice parametrice se ocupă de interacțiunile dintre variabilele de intrare. Multitudinea variabilelor de intrare poate da impresia că un model este fidel, fără ca acest lucru să fie cu adevărat așa. Mai mult, modelarea interacțiunilor poate fi foarte dificilă în cazul simulărilor mari, deoarece acestea se pot compensa parțial între ele. Abordările care utilizează algoritmi de învățare pe calculator pot încorpora aceste interacțiuni într-un mod mai flexibil. În acest caz, aplicarea lor este justificată de

faptul că cele două mari familii de parametri se schimbă simultan: compoziția speciilor și parametrii climatici. În plus, productivitatea va scădea ca urmare a creșterii secetei prognozate la nivel global.

A2.3. Analiza rezultatelor modelelor de distribuție a speciilor, studii de caz selectate pentru evaluarea regională.

Modelele calibrate au fost utilizate pentru a estima potențiala distribuție a principalelor specii forestiere în 2050 și 2070 (2070 este sfârșitul orizontului pentru scenariile RCP, după care climatul rămâne la nivelul la care a ajuns în 2070). Au fost utilizate trei scenarii RCP, care alimentează diferite modele de proiecție climatică. În acest caz, pentru previziuni, a fost utilizată media proiecțiilor climatice. Această abordare este un standard, cunoscută sub numele de ansamblu de modele, are ca scop introducerea unei forme de robustețe în predicții, deoarece se bazează pe media predicțiilor modelelor climatice. Proiecțiile privind distribuția viitoare a speciilor au fost făcute pentru fiecare specie.

Scenariul pesimist, RCP8.5, prezintă un interes științific redus. Acest scenariu este însoțit de o creștere a temperaturii estimată la aproximativ 4,5°C. La această temperatură, având în vedere stagnarea relativă a nivelului de precipitații, durata, frecvența și intensitatea secetei sunt de așa natură încât practic nicio specie din pădurile temperate nu va supraviețui. Prin urmare, acest scenariu prevede o formă de deșert biotic în Carpați, unde numai speciile cu adevărat mediteraneene pot supraviețui (Fig. 9).

În schimb, scenariul RCP2 prevede schimbări destul de ușoare, deoarece temperaturile nu vor crește cu mult, mai puțin de 1°C. Nici acest scenariu nu este interesant, nu pentru că prevede o formă de status quo, ceea ce ar fi o veste excelentă pentru păduri, ci pentru că nu este deloc realist. Comunitatea științifică preconizează un scenariu în care temperaturile vor crește cu aproximativ 2,7°C până la sfârșitul secolului viitor (Emissions Gap Report 2021, Meinshausen et al. 2022).

Comparația dintre distribuția actuală a speciilor și observațiile făcute de IFN arată zone de divergență, în ciuda calibrării. Aceste zone de divergență prezintă un interes deosebit, deoarece demonstrează prezența unui dezechilibru între distribuția actuală a anumitor specii și aria lor de compatibilitate. În cazul molidului, această zonă este caracterizată de altitudini joase și medii și de temperaturi medii destul de ridicate. Conform modelului IKS, aceste zone nu sunt zone de compatibilitate cu molidul, deși datele IFN arată că, în practică, specia este prezentă în aceste zone. Aceste zone sunt de zone de limită, care sunt zone care marchează o dinamică climatică recentă, în care specia analizată a ieșit într-adevăr din aria sa climatică normală, dar nu a înregistrat o mortalitate masivă. Acestea sunt, de asemenea, zonele în care specia nu va fi compatibilă în viitor, astfel încât nu există nicio îndoială că nu va supraviețui mult timp în aceste zone de regresie.

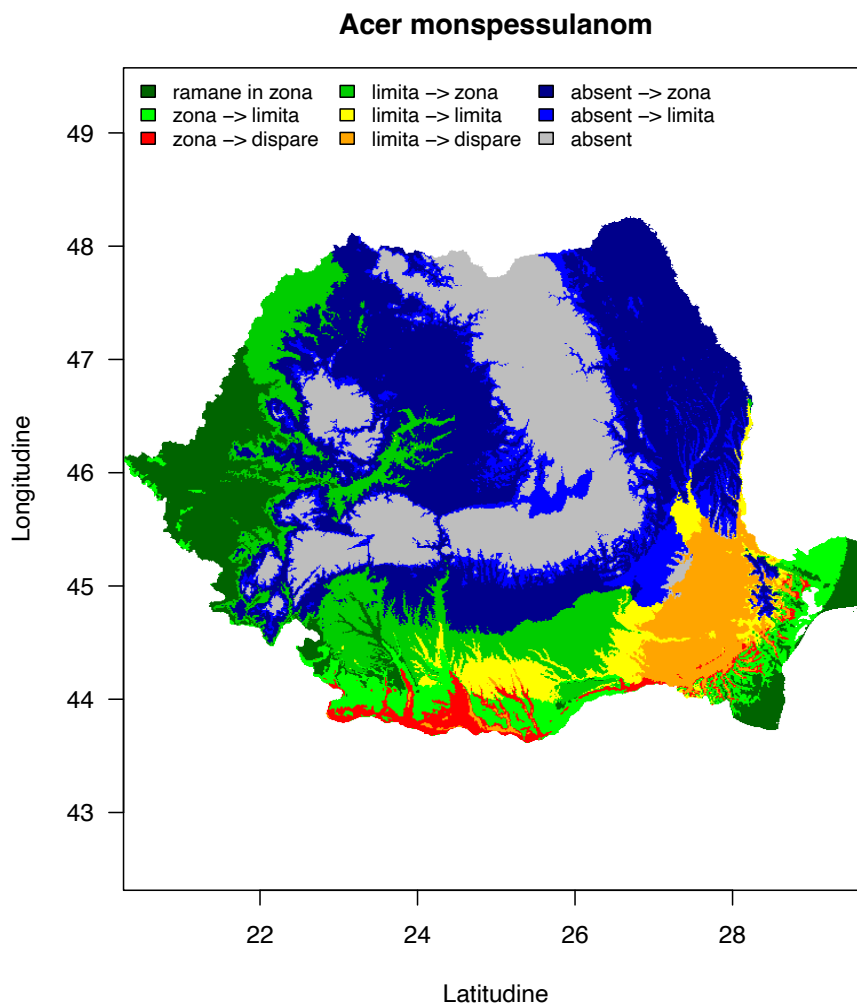


Fig. 9. Exemplu de specie submediteraneana/mediteraneana care areareal potential să crească înRCP4.5 și 8.5.

Am preferat să folosim estimările din modelul IKS, în primul rând pentru că acest model se bazează pe un set mai robust de doar trei parametri climatici și, în al doilea rând, pentru că modelul ia în considerare deficitul de apă ca factor principal în distribuția speciilor în mod explicit. Pe măsură ce temperaturile cresc, atât temperatura maximă, cât și intensitatea deficitului de apă tolerabil devin principalii factori limitativi, în conformitate cu studiile recente privind productivitatea pădurilor și mortalitatea arborilor.

Rezultatele modelări în baza scenariul RCP4.5 mediu

Hărțile care arată schimbările în distribuția spațială a speciilor forestiere sunt disponibile pe site-ul web al proiectului la:

<https://usv.ro/cercetare/proiecte/programe-pncdi-iii/safeclim/harti-de-schimbari-de-distributie/>

Aceste hărți oferă o evaluare vizuală a amplitudinii schimbărilor în compoziția speciilor pe care le va provoca chiar și o schimbare climatică moderată (RCP4.5). În special, se poate vedea amploarea zonelor în care specii importante precum fagul și molidul nu vor mai fi compatibile. Distribuția spațială potențială a unui număr de specii va fi mult redusă. Un alt fenomen este deplasarea zonelor de compatibilitate. O anumită specie poate păstra mai mult sau mai puțin aceeași zonă de compatibilitate,

dar, în practică, acest lucru implică o schimbare totală a localizării speciei respective. Un astfel de fenomen implică dispariția (totală sau parțială) a unor zone de non-compatibilitate actuală și apariția unor zone nou compatibile.

Un exemplu de specii pentru care suprafața de compatibilitate scade foarte mult este molidul în comparație cu mesteacănul (*Betula pendula*). Un exemplu de specii pentru care suprafața de compatibilitate climatică este deplasată aproape integral este dat de fag.

Tabelul 3. Evoluția în suprafața (ha) a acoperirii potențială a speciilor forestiere în viitor sub scenariul RCP4.5 mediu.

Specia	Reducere (ha)	Reducere (% din suprafața)	Extindere (ha)	Extindere (% din suprafața)	Evoluția netă (ha)
<i>Abies alba</i>	92829	31.0	40480	13.5	-52349
<i>Abies grandis</i>	2116921	68.9	4021243	130.8	1904322
<i>Acer campestre</i>	15018	17.2	42861	49.0	27843
<i>Acer monspessulanom</i>	7	17.0	60	141.5	53
<i>Acer negundo</i>	407	12.3	1611	48.5	1204
<i>Acer platanoides</i>	2985	15.3	3603	18.4	618
<i>Acer pseudoplatanus</i>	23655	24.2	19014	19.5	-4641
<i>Betula pendula</i>	37885	26.0	1004	0.7	-36881
<i>Betula pubescens</i>	17	29.4	0	0.0	-17
<i>Carpinus betulus</i>	128864	23.8	246948	45.7	118084
<i>Castanea sativa</i>	236	16.6	1229	86.5	993
<i>Cedrus atlantica</i>	1148639	29.8	9508511	246.4	8359872
<i>Celtis australis</i>	0	0.0	231	96.4	231
<i>Fagus sylvatica</i>	594857	27.0	549310	25.0	-45547
<i>Fraxinus angustifolia</i>	0	0.0	20600	117.5	20600
<i>Fraxinus excelsior</i>	19822	19.5	34249	33.8	14427
<i>Larix decidua</i>	3060	22.2	225	1.6	-2835
<i>Ostrya carpinifolia</i>	2106845	15.4	5904405	43.2	3797560
<i>Picea abies</i>	456427	30.5	852	0.1	-455575
<i>Pinus cembra</i>	313	38.6	0	0.0	-313
<i>Pinus nigra</i>	5532	21.3	14131	54.4	8600
<i>Pinus sylvestris</i>	6663	10.1	61	0.1	-6602
<i>Populus tremula</i>	23667	19.8	590	0.5	-23076
<i>Prunus avium</i>	16902	19.4	39525	45.3	22624
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	4164	49.6	9517	113.4	5352
<i>Quercus cerris</i>	45405	14.9	157023	51.6	111619
<i>Quercus frainetto</i>	17832	15.4	47023	40.6	29191
<i>Quercus ilex</i>	0	0.0	9896428	772.2	9896428
<i>Quercus petraea</i>	163869	26.5	337233	54.5	173364
<i>Quercus pubescens</i>	2529	21.8	9110	78.6	6582
<i>Quercus robur</i>	30451	19.6	72288	46.4	41837
<i>Salix caprea</i>	1023	19.5	4900	93.4	3877
<i>Robinia pseudacacia</i>	61293	17.9	188395	55.0	127102
<i>Tilia cordata</i>	12618	16.6	35	0.0	-12583
<i>Tilia platyphyllos</i>	1691	27.7	1	0.0	-1690
<i>Sorbus domestica</i>	74	9.1	147	18.1	73
<i>Tilia cordata</i>	17574	18.4	26414	27.6	8840
<i>Tilia platyphyllos</i>	10894	18.7	27113	46.6	16219

O estimare cantitativă a schimbărilor arealului potențial a speciilor sub scenariul RCP4.5 mediu, este prezentat în mod sintetic în tabelul 3.

Nu în mod surprinzător, speciile întâlnite la altitudini mai mari sunt dintre cele pentru care este prognozat o contractare a arealului potențial: *Picea abies*, *Pinus cembra*, dar și *Populus tremula*, *Sorbus aucuparia*. La extremitatea cealaltă a gradientului figurează speciile mediteraneane cu extinderi foarte

mari: *Acer monspessulanum*, *Castanea sativa*, *Fraxinus angustifolia*, *Cedrus atlantica*. Molidul și bradul cu zâmbru sunt specii care pierd mult din suprafața arealului lor actual.

Pentru mai multe specii, cum ar fi fagul, diferențele dintre suprafețele zonelor de compatibilitate nu sunt mari, dar ele ascund faptul că o retragere puternică a anumitor zone este compensată de apariția unor noi zone de compatibilitate. Printre exemple se numără: *Acer pseudoplatanus*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *frainetto* și *robur*, *Tilia cordata*. Aceste specii pentru care se constată o deplasare a zonei de compatibilitate sunt, în orice caz, specii care vor dispărea treptat din zonele în care se găsesc în prezent. Ele vor apărea în zonele de compatibilitate doar dacă le ajutăm să facă acest lucru.

Pentru fag, suprafața zonei care iese din compatibilitate este de aproape 600,000 ha, din cele 2,201,046 actuale (reprezintă circa 27% din suprafața lui actuală). Pentru gorun, suprafața pierdută este de 163,869 ha, din cele 618,448 ha actuale, adică 26,5%. Cea mai mare pierdere relativă la speciile principale se observă la molid cu 456,427 ha (30,5%).

O diferență majoră între specii este faptul că uneori apar zone noi, iar pentru altele nu. Spre exemplu, molidul pierde din suprafața totală (diferența netă este de -455,575 ha). În schimb, pentru gorun suprafața zonelor potrivite depășește suprafața zonelor care devin nepotrivite, astfel încât diferența netă este de + 173,364 ha.

Pentru majoritatea speciilor, diferența de distribuție spațială este sinonimă cu urcarea în altitudine (Tab. 4). În medie, distribuția actuală situează fagul la 500 m (de la 110 la 1210 m), dar în condiții RCP4.5 media crește la 800 m (120 – 1750 m). Pentru molid, urcarea este de circa 150 m, și se traduce prin pierderea a ~ 40% din suprafața actuală acoperită. În contrast, mai multe specii de foioase tari beneficiază de această urcare în altitudine și își văd creșterea semnificativă a zonei de compatibilitate. Pentru aceste specii, creșterea altitudinii impune o migrație foarte puternică, dar le oferă în același timp posibilitatea de a găsi un refugiu climatic.

Schematic, putem considera că speciile cu cerințe climatice față de temperaturile ridicate și de un deficit semnificativ de apă își vor vedea aria de răspândire potențială diminuată considerabil în următoarele decenii. Doar speciile cu un grad ridicat de reziliență față de seceta, cum ar fi speciile submediteraneene, vor vedea o creștere a ariei lor de compatibilitate, iar aceasta va fi în zonele de câmpie. În schimb, speciile prezente la altitudini joase sau medii vor beneficia de golul lăsat de celelalte specii și își vor putea găsi un refugiu apreciabil în Carpați.

Tab. 4. Schimbarea altitudinii medii și minimale a distribuției speciilor.

	Alt. medie 2020	Alt. medie 2070	Min. alt. 2020	Min. alt. 2070
Brad	923	1005	361	406
Molid	1139	1200	203	358
Fag	685	815	118	128
Cer	307	345	33	125
Gorun	390	445	84	116
Stejar	188	235	0	17
Carpen	412	480	44	103
Frasin	361	510	12	105
Paltin de munte	396	600	0	1
Salcâm	275	330	0	33
Tei pucios	363	410	46	120

Distribuția speciilor potrivit scenariilor pesimiste: RCP4.5 pesimist, RCP8.5

Scenariul pesimist RCP4.5, spre deosebire de scenariul mediu RCP4.5, aduce schimbările mult mai aproape de scenariul 8.5 (Tab. 5). În scenariul pesimist 4.5, temperaturile medii anuale vor crește cu 3,3 °C, mult mai mult decât în scenariul mediu (2,2 °C). Scenariul mediu RCP8.5 prevede o încălzire medie de 3,6 °C. Având în vedere stagnarea relativă a precipitațiilor, deficitul de apă în toate aceste scenarii va crește brusc. Cea mai mare creștere se înregistrează, desigur, în scenariul 8.5, pentru care intensitatea totală este dublă față de cea din scenariul 4.5.

Tablelul 5. Evoluția suprafeței zonelor de potrivire (procent din suprafața actuală) în funcție de scenariile climatice.

	RCP4.5 mediu	RCP4.5 pesimist	RCP8.5 mediu
Brad	74,8	37,4	39,3
Paltin de munte	81,1	44,5	44,7
Mesteacan	76,9	47,4	47,9
Carpen	75,2	37,5	37,4
Fag	75,4	37,9	38,9
Molid	81,0	47,2	50,2
Plop tremulator	85,0	56,6	56,3
Cer	81,4	63,6	57,5
Gorun	70,4	29,5	30,9
Stejar	82,7	46,5	44,8

Efectele schimbărilor preconizate în scenariile mai pesimiste decât medii RCP4.5 sunt foarte puternice și arată o contracție foarte accentuată, în special a speciilor care sunt în prezent foarte importante, cum ar fi fagul și molidul. Cea mai mare reducere a prezenței speciilor dominante este cea a stejarului. Aceste rezultate ridică în mod clar problema promovării altor specii mai rezistente sau chiar a introducerii de noi specii.

Consecințele pentru masa lemnoasă la nivel de țară

Mai multe surse de informații au fost utilizate pentru a prognoza modificările stocurilor de biomasă forestieră: în primul rând, starea inițială a pădurilor, care a fost calibrată pe baza măsurătorilor din inventarul forestier național; în al doilea rând, previziunile privind compatibilitatea viitoare a speciilor, care au ghidat dezvoltarea, supraviețuirea și regenerarea arboretelor; și în al treilea rând, clima, care impune constrângeri de productivitate pentru majoritatea speciilor. Aceste informații au fost combinate pentru a produce predicții privind compoziția pădurii, structura pe clase de vârstă, volumul și productivitatea viitoare. Volumele și productivitatea viitoare au fost estimate cu ajutorul unui algoritm de învățare automată de tipul randomForest.

Speciile relocate nu pot recrea un stoc echivalent cu cel pierdut în intervalul a câteva decenii. În primul rând, migrația lor este foarte lentă, iar acest lucru nu garantează faptul că aceste specii vor produce semințele în abundența necesară. Chiar și cu ajutorul unui model de dispersie totală, reconstrucția unui arboret necesită timp, iar stocul mediu rămâne foarte scăzut la nivel local. Având în vedere amploarea spațială a mortalității și modificările în compoziția arboretului, productivitatea este mult mai scăzută. Presiunea climatică negativă agravează această situație.

Rezultatele modelului arată o creștere a stocului timp de două decenii (Fig. 10), urmată de un declin foarte pronunțat. Creșterea stocului la începutul perioadei se explică prin productivitatea încă destul de ridicată (în limitele normale) care are loc până când condițiile climatice devin prea restrictive. De asemenea, structura pe clase de vârstă împinge spre acest vârf de producție și de volum, după care creșterea arboretelor nou create determină o scădere a stocului. Constrângerile legate de înlocuirea arboretelor se adaugă și încep să determine o scădere semnificativă atât a volumului, cât și a producției începând cu 2050. În acest caz, reconstrucția arboretelor este accelerată în mod artificial de o capacitate ipotetică de plantare a puieților.

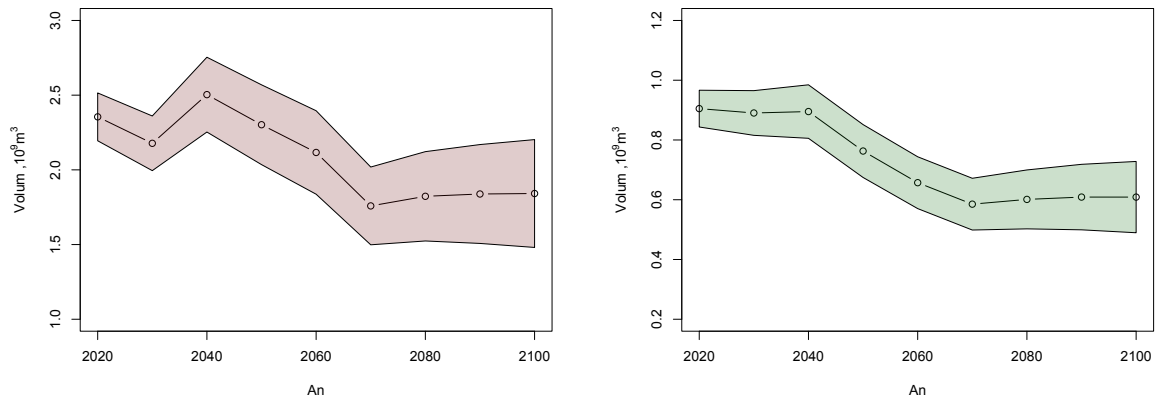


Fig. 10. Evoluția stocului total de lemn pe picior în România, ținând cont de evoluția climatului (scenariul RCP4.5) și a migrația speciilor. Această variantă este una foarte optimistă (Stânga). Evoluția stocului total de lemn pe picior a speciilor principale fag și molid în România, ținând cont de evoluția climatului (scenariul RCP4.5) (Dreapta).

Scăderea stocului total este strâns legată de cea a principalelor specii care, de obicei, susțineau până în prezent stocul, cum ar fi fag și molid. Contribuția acestor două specii a scăzut puternic în ciuda migrației asistate reprezentate în model. Creșterea contribuției celorlalte specii nu este suficientă pentru a compensa scăderea volumului acestor specii principale. Aceste calcule arată faptul că o politică voluntară de plantare masivă a unor specii mai bine adaptate poate să atenueze efectul schimbărilor climatice, dar totodată previn asupra faptului că, chiar dacă am reuși să schimbăm compoziția pădurilor în mod activ (printr-un scenariu de tip *full-scale assisted migration*) nivelul stocului va scădea în viitorii 50 ani cu 20-25%. Fără această asistență reducerea va fi de cel puțin 40%.

Alegerea studiilor de caz pentru modelarea regională

Analizele privind distribuția viitoare a speciilor au arătat vulnerabilitatea câtorva specii importante, cum ar fi fagul și molidul, care vor suferi modificări profunde ale arealului lor chiar și în scenarii climatice moderate. Dar speciile montane nu sunt singurele care vor suferi modificări profunde ale distribuției lor: speciile de câmpie sunt, de asemenea, profund afectate. Cu toate acestea, schimbările din pădurile de câmpie nu sunt comparabile cu cele din pădurile de munte: în munți, majoritatea speciilor vor trebui să urce la altitudini mai mari pentru a găsi un regim termic mai satisfăcător. Pe de altă parte, în zonele de câmpie, nu a avut loc nicio translație, ci mai degrabă o înlocuire a compoziției speciilor. Profilurile schimbărilor sunt foarte diferite în funcție de relief. În plus, aceste zone de relief diferite implică grupuri diferite de specii. Productivitățile sunt diferite, la fel ca și metodele de gestionare.

Ca urmare, analizele realizate arată faptul că zonele de interes pentru studiul la nivel regional trebuie să acopere diverse situații geografice, să aibă specii diferite (ca specii principale dar și în amestec). Pentru a fi reprezentative zonelor de schimbare de compoziții, trebuie să cuprindă un gradient mergând de la altitudini scăzute la munte, și să fie localizate în zone cu un gradient termic diferit. După analiza datelor disponibile, au fost alese trei ocoale din Nord-Estul țării, ocoalele Botoșani, Frasin și Pojorâta care

reprezintă un gradient altitudinal și bioclimatic pe același latitudine, dar cu specii dominante foarte diferite și reprezentative.

Tabelul 6. Altitudine minimă și maximă în ocoalele silvice selecționate pentru analizele regionale.

Altitudine (m)	Botosani OS	Frasin OS	Maneciu OS	Pojorata OS
Min	80	500	550	600
Max	460	1100	1500	1650

Am ales și ocolul Maneciu în complement, care este reprezentativ ocoalelor din sudul Carpaților cu un gradient altitudinal foarte mare. Suprafața totală reprezentată de aceste ocoale este de 47023 ha. Localizarea ocoalelor este prezentată în figura 11.

Ocolul silvic Botosani este localizat în zona de deal, în Nord Estul României unde altitudinea variază între 80 și 460 de metri, panta maximă a terenului este de 36°. Compoziția este dominată de Q. petraea, structura arboretelor este echienă iar acestea au o clasă de producție medie (Tab. 7).

Ocolul Silvic Frasin este localizat în zona de munte a județului Suceava. Arboretele sunt localizate la altitudini ce variază între 500 și 1100 de metri iar panta terenului variază între 0-46°. Compoziția este dominată de P. abies și A. alba (Tab. 7), structura dominantă a arboretului fiind cea echienă și relativ echienă. Aceste arborete sunt caracterizate de o productivitate ridicată.

Ocolul Silvic Maneciu este localizat în zona de munte a județului Prahova. Altitudinea variază între 550 și 1500 m iar panta maximă a terenului este de 50°. Arboretele dominante sunt arboretele pure de fag împreună cu arboretele de amestec formate din fag și brad (Tab. 7). Structura pădurii este echienă și relativ echienă pe 47% din suprafață și plurienă și relativ plurienă pe 53% din suprafață. Productivitatea arboretelor este una medie.

Ocolul Silvic Pojorâta este un ocol silvic din zona de munte a județului Suceava. Altitudinea variază între 600 și 1650 de metri iar panta între 2-50°. Arboretele dominante sunt arboretele pure de molid dar o proporție ridicată este dată și de arboretele de amestec (molid cu brad, molid cu brad și fag). Structura arboretelor este dominată de structura echienă acestea având o productivitate ridicată și medie.

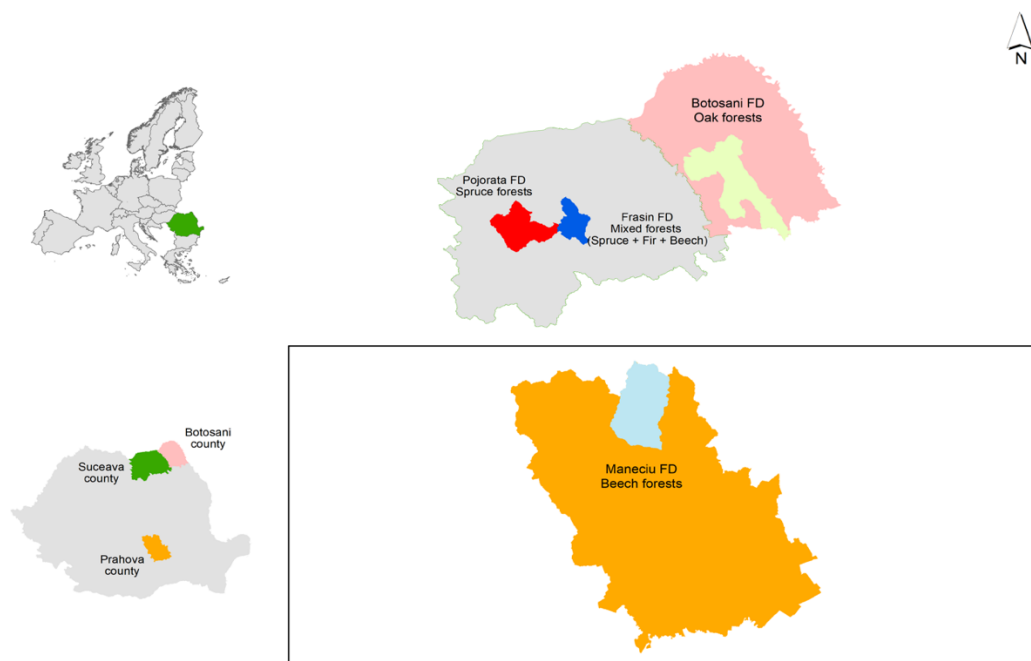


Fig. 11. Localizare ocoale silvice alese pentru modelări la nivel regional.

Tabelul 7. Compoziție arboretelor din ocoalele silvice alese pentru modelări.

Compoziție	Botosani OS	Frasin OS	Maneciu OS	Pojorata OS
Arborete mixte cu F. sylvatica	6%			
Arborete de Q. petraea	82%			
Arborete de Q. robur	12%			
Arborete pure de P. abies		0.5%	0.5%	65%
Arborete de amestec P. abies cu A. alba		90%	5.5%	20%
Arborete de amestec A.alba și P. abies		1%		15%
Arborete de F. sylvatica		9%	64%	
Arborete de A. alba și F. sylvatica			25%	
Suprafața totală, ha	5442	9917	18873	12791

Concluziile

Activitățile desfășurate în cadrul proiectului au făcut posibilă atingerea obiectivelor stabilite. Acestea pot fi împărțite în două categorii. În primul rând, au fost efectuate măsurători ale principalelor caracteristici ale speciilor forestiere pe teren și în laborator, utilizând rețeaua de piețe de probă creată în cadrul proiectului. Aceste măsurători esențiale permit documentarea trăsăturilor speciilor, care influențează comportamentul acestora în fața schimbărilor globale. Cunoașterea acestor trăsături va permite o mai bună modelare a comportamentului viitor. În al doilea rând, datele obținute au fost utilizate pentru a calibra modelele de distribuție a speciilor. Cel mai bun model s-a dovedit a fi modelul IKS, deoarece acesta include deficitul de apă în algoritmul său de calcul, iar deficitul de apă va fi una dintre principalele constrângeri în viitor.

Modelele de compatibilitate și de distribuție a speciilor au permis realizarea unor predicții la nivelul României cu privire la compoziția speciilor viitoare și a volumului de lemn. Hărțile care arată schimbările în distribuția speciilor din România sunt disponibile online pe pagina proiectului. Rezultatele conturează o adevărată provocare care este greu de cuprins și de reprezentat, dacă nivelul emisiilor continuă în ritmul actual. Modelul principal de compatibilitate a speciilor, modelul IKS, va face obiectul unor publicații pentru a îl promova și a arăta capacitatea lui comparativ cu alte modele.

Toate pădurile vor suferi schimbări majore în compoziția lor, doar câteva specii reușind să își mențină distribuția actuală. Molidul, un arbore emblematic și de mare importanță economică, va suferi una dintre cele mai mari contracții dintre toate speciile. Carpații tind să devină un adevărat refugiu pentru o serie întreagă de specii, beneficiind de o climă azonală mult mai favorabilă decât în zonele de câmpie. O serie întreagă de specii de foioase valoroase își vor găsi acolo refugiul, înlocuind speciile rășinoase.

Activitatea desfășurată ne-a permis, de asemenea, să aflăm mai multe despre efectele schimbărilor climatice asupra pădurilor din România. Calculele efectuate în cadrul proiectului au permis evidențierea influenței fundamentale atât a structurii actuale a arboretelor (în ceea ce privește structura pe clase de vârstă și compoziția actuală), cât și a viitoarelor modificări de distribuție. Aceste analize au evidențiat importanța acțiunilor viitoare, care au făcut obiectul unor recomandări pentru politicile publice.

Acestea pot fi rezumate după cum urmează:

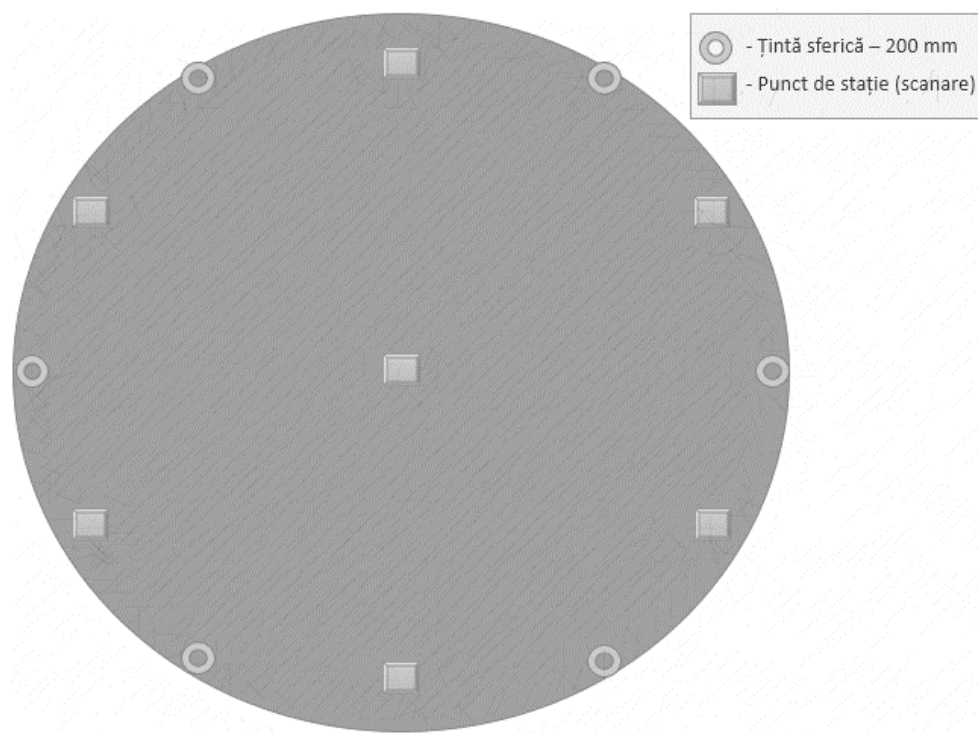
Schimbările foarte puternice în distribuția speciilor trebuie să fie deja incluse în planurile actuale de gestionare a pădurilor, deoarece prescrierea speciilor trebuie să țină cont de schimbările în distribuția speciilor, care vor avea loc într-un interval de timp mult mai scurt decât durata unui ciclu de producție.

Schimbările climatice se reflectă în schimbările de altitudine pentru toate speciile forestiere. Migrația puternică a acestor specii depășește cu mult capacitatea lor de a se deplasa în mod natural. Așadar, migrația speciilor trebuie să se bazeze neapărat pe o politică puternică de ajutorare a migrației, bazată pe producția de puiți în pepiniere și pe plantarea pe scară largă.

Producția de semințe va deveni o problemă extrem de importantă. Trebuie să anticipăm nevoia prin identificarea speciilor viitorului și să lucrăm în beneficiul lor pe teren. În viitor, capacitatea de a produce semințe va fi factorul limitativ în ceea ce privește capacitatea noastră de a face față schimbărilor climatice.

Metodele de gestionare silvică trebuie să învețe să producă noi tipuri funcționale, cum ar fi insulele de senescență, insulele de rezistență și insulele de migrație. Aceste insule ar trebui să reprezinte un efort practic de adaptare anticipată, prin identificarea arboretelor capabile să reziste la schimbare și a celor capabile să ofere un punct de plecare pentru migrație. Plantațiile experimentale la scară largă ar ajuta, de asemenea, la identificarea speciilor și a proveniențelor capabile să răspundă la schimbările geografice anticipate.

Anexe



Anexa 1. Schema de amplasare a dispozitivului de scanare pentru obținerea modelului 3D a terenului din cadrul suprafețelor de probă de formă circulară de 500 m²



a)

b)

c)

Anexa 2. Imagini preluate din activitățile de teren. Prelevarea carote de creștere (a), TLS-ul Z+F Imager 5010 în procesul de scanarea a plotului 20 (FaPam), poziționat în centrul suprafeței de probă (b) și Modul de materializare a arborilor cu inelul pe fus la înălțimea de 1,3 m, în plotul P26 - GoSt (c).

Referințe bibliografice

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, 43(6), 1223-1232.
- Barbet-Massin, M., Jiguet, F., Albert, C. H., & Thuiller, W. (2012). Selecting pseudo-absences for species distribution models: How, where and how many?. *Methods in ecology and evolution*, 3(2), 327-338.
- Chakraborty, D., Móricz, N., Rasztoivits, E., Dobor, L., & Schueler, S. (2021). Provisioning forest and conservation science with high-resolution maps of potential distribution of major European tree species under climate change. *Annals of Forest Science*, 78(2), 1-18.
- Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On—A World of Climate Promises Not Yet Delivered (United Nations Environment Programme, 2021).
- Essl, F., García-Rodríguez, A., Lenzner, B., Alexander, J. M., Capinha, C., Gaüzère, P., ... & Dullinger, S. (2023). Potential sources of time lags in calibrating species distribution models. *Journal of Biogeography*.
- Iturbide, M., Bedia, J., Herrera, S., del Hierro, O., Pinto, M., & Gutiérrez, J. M. (2015). A framework for species distribution modelling with improved pseudo-absence generation. *Ecological Modelling*, 312, 166-174.
- Mauri, A., Girardello, M., Strona, G., Beck, P. S., Forzieri, G., Caudullo, G., ... & Cescatti, A. (2022). EU-Trees4F, a dataset on the future distribution of European tree species. *Scientific data*, 9(1), 37.
- Meinshausen, M. et al. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C. *Nature* 604, 304–309 (2022).
- Senay, S. D., Worner, S. P., & Ikeda, T. (2013). Novel three-step pseudo-absence selection technique for improved species distribution modelling. *PloS one*, 8(8), e71218.
- Svenning, J. C., & Sandel, B. (2013). Disequilibrium vegetation dynamics under future climate change. *American Journal of Botany*, 100(7), 1266-1286.