

Universitatea Alexandru Ioan Cuza din Iași
Facultatea de Geografie și Geologie
Școala doctorală de Geoștiințe



Evaluarea impactului natural și antropic asupra vegetației forestiere din Parcul Natural Putna-Vrancea prin teledetecție și analiză spațială

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Coordonator științific:

Prof. univ. dr. habil. ing. Iuliana Gabriela BREABĂN

Doctorand: Adrian George Istrate

Președinte comisie doctorat: Prof. univ. dr. habil. Mircea Nicușor NICOARĂ

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. habil. Iuliana Gabriela BREABAN

Referenți oficiali: Conf. univ. dr. habil. Radu-Daniel PINTILII

Conf. univ. dr. Ștefan BILAȘCO

CS I dr. habil. Róbert Eugen SZÉP

Comisia de îndrumare și integritate academică:

Prof. dr. ing. habil. ONIGA Ersilia-Valeria-Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Conf. dr. Adrian URSU - Universitatea „Al.I.Cuza” din Iași

Lect.dr. Pavel ICHIM - Universitatea „Al.I.Cuza” din Iași

Cuprins

Introducere.....	4
1. Cadrul geografic și istoricul Parcului Natural Putna-Vrancea.....	5
1.1. Localizarea și caracteristicile geografice ale PNPV.....	5
1.1.1. Substratul litologic.....	5
1.1.2. Altitudinea.....	5
1.1.3. Panta.....	6
1.1.4. Expoziția versanților.....	6
1.1.5. Solurile.....	6
1.1.6. Clima.....	7
1.1.7. Flora.....	8
1.1.8. Fauna.....	8
1.2. Istoricul cercetărilor în parcurile naturale la nivel internațional și național.....	9
1.2.1. Etapa cartografierii istorice.....	9
1.2.2. Noi tendințe în cercetarea internațională.....	10
1.2.3. Literatura de specialitate din Romania.....	10
2. Date și metodologie.....	11
2.1. Metodologia analizei bibliometrice.....	11
2.2. Metodologia de analiză activității antropice.....	11
2.3. Metodologie -utilizarea datelor parcelare din PNPV pentru studierea caracteristicilor vegetației forestiere.....	12
2.4. Datele climatice.....	12
2.7. Metodologie Remote sensing.....	13
3. Compoziția vegetației forestiere.....	14
3.1. Compoziția și distribuția vegetației forestiere din PNPV.....	14
3.2. Distribuția speciilor în funcție de vârstă.....	14
3.3. Specia dominantă la nivel de unitate amenajistică.....	15
4. Factorii naturali care influențează vegetația forestieră.....	16
4.1. Factorii abiotici.....	16
3.1.1. Caracteristicile geomorfometrice și influența acestora asupra vegetației.....	16
3.1.2. Tipurile de sol și substratul litologic.....	17
3.1.3. Doborâturile de vânt.....	18
3.1.4. Incendiile de vegetație.....	19
3.1.5. Stratul de zăpadă.....	19
3.1.6. Clima.....	20
3.1.7. Analiza variației termice a suprafețelor forestiere în funcție de specia dominantă.....	21
3.2 Factorii biotici.....	22
5. Influența factorilor antropici asupra pădurii în ultimele două secole.....	24
5.1. Exploatarea forestieră istorică și modernă.....	24
5.1.1 Suprafața împădurită la sfârșitul sec XVIII- 1789.....	24
4.1.2 Suprafața împădurită la sfârșitul sec XIX - 1895.....	24

4.1.3 Suprafața împădurită în 1957	25
4.1.4 Suprafața împădurită în 1975	26
4.1.5 Suprafața împădurită în perioada actuală (2017-2019)	26
5.2. Dinamica spațio-temporală a pădurilor	26
4.3. Influența antropică asupra caracteristicilor actuale ale pădurii din PNPV	28
6. Estimarea favorabilității pentru principalele specii lemnoase din PNPV	30
6.1. Factorilor ecologici ce influențează dispunerea speciilor din fisa ecologică	30
6.2. Estimarea Favorabilității pentru principalele specii lemnoase din PNPV	31
6.2.1. Fagul (Fagus silvatica)	31
6.2.2. Bradul.....	32
6.2.3.Molidul.....	34
6.2.4. Gorunul	35
6.2.5. Aninul.....	36
6.3. Suprapuneri și diferențieri ale favorabilității spațiale.....	37
6.4. Structura speciilor de arbori din zonele de protecție integrală (ZPI).....	38
7. Monitorizarea vegetației cu ajutorul imaginilor satelitare	39
8. Parcul Natural Putna-Vrancea în contextul schimbărilor climatice globale.....	41
Concluzii.....	42
Bibliografie selectivă	43

Introducere

În contextul intensificării presiunilor antropice asupra resurselor naturale, cercetarea ariilor protejate capătă o importanță fundamentală pentru înțelegerea proceselor ecologice și pentru fundamentarea strategiilor de conservare a biodiversității. Pădurile, ca ecosisteme-cheie în reglarea climatică, protecția solurilor, menținerea diversității biologice și stocarea carbonului, reprezintă elemente esențiale pentru stabilitatea mediului. Studiul acestora în cadrul ariilor naturale protejate furnizează date relevante privind funcționarea și vulnerabilitatea ecosistemelor, contribuind la definirea unor politici eficiente de conservare și management. Parcul Natural Putna-Vrancea (PNPV), situat în zona de Curbură a Carpaților, se remarcă prin peisajul montan complex, pădurile extinse și biodiversitatea ridicată, constituind un cadru propice pentru analiza interacțiunilor dintre factorii abiotici (relief, sol, climă), factorii biotici (specii vegetale și faunistice) și presiunile antropice istorice și contemporane.

Obiectivul central al tezei este evaluarea influenței factorilor naturali și a dinamicii istorice a utilizării terenurilor asupra vegetației forestiere din PNPV, cu accent pe distribuția speciilor dominante și pe impactul perturbărilor naturale și antropice asupra stabilității, compoziției și capacității de regenerare a pădurilor. Structura lucrării este organizată progresiv: primul capitol descrie cadrul fizico-geografic al ariei studiate (altitudini, substrat litologic, pantă, climat), al doilea capitol detaliază metodologia, care îmbină surse cartografice istorice cu tehnici moderne de teledetecție, analiză GIS și modelare climatică, iar capitolele următoare prezintă rezultatele privind evoluția suprafețelor împădurite, distribuția speciilor forestiere și impactul factorilor ecologici și antropici asupra acestora.

1. Cadrul geografic și istoricul Parcului Natural Putna-Vrancea

1.1. Localizarea și caracteristicile geografice ale PNPV

Parcul Natural Putna-Vrancea este situat în zona de Curbură a Carpaților Orientali, având o poziționare strategică la contactul dintre masivele muntoase și depresiunile subcarpatice. Relieful său este predominant montan, cu văi adânci și culmi împădurite, ceea ce determină o mare diversitate a condițiilor ecologice. Extinderea geografică a ariei protejate include ecosisteme forestiere întinse, zone de pășune montană și albiile râurilor, contribuind la complexitatea peisajului și la valoarea conservativă a regiunii.

Zonarea funcțională a PNPV în conformitate cu reglementările naționale privind managementul ariilor naturale protejate (OUG 57/2007 și Legea nr. 49/2011) delimitează și diferențiază zone în funcție de gradul de protecție și de tipurile de activități permise, urmărindu-se conservarea biodiversității și dezvoltarea durabilă a comunităților locale. (Planul de management al PNPV, 2021). Astfel au fost identificate 4 zone funcționale (Fig 2)

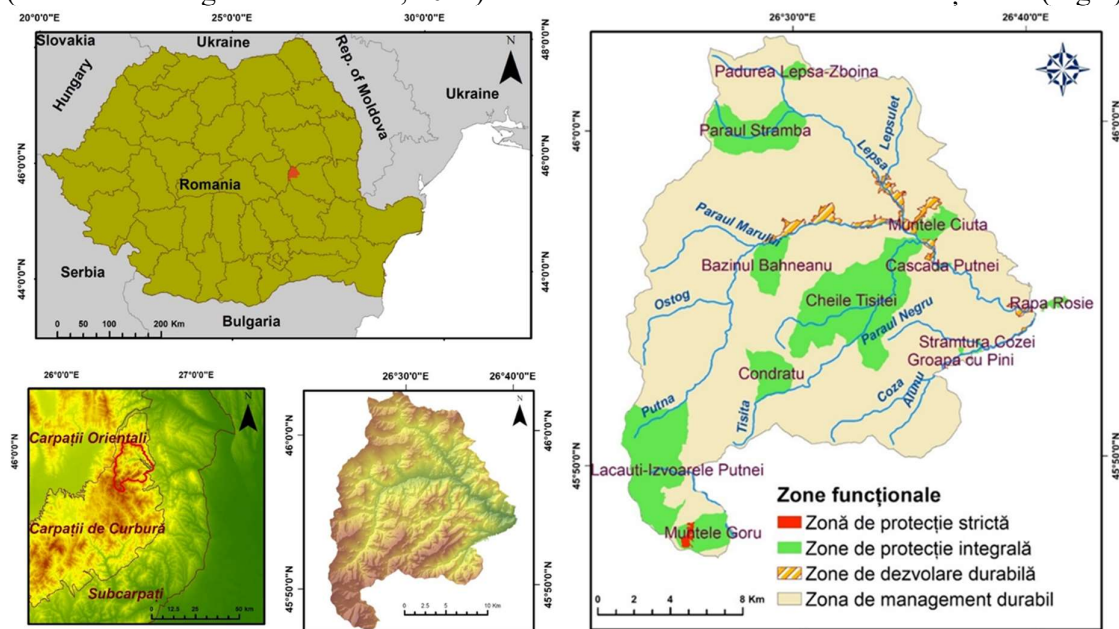


Figura 1. Localizarea Parcului Natural Putna Vrancea în cadrul României și al Carpaților de Curbură (stânga) și Zonarea funcțională a Parcului Natural Putna Vrancea conform planului de management (dreapta)

1.1.1. Substratul litologic

Structura geologică a PNPV este dominată de formațiuni sedimentare, în special gresii, marne și conglomerate, care imprimă caracteristici variate substratului (Dumitrescu et al., 1965; Ursu și Juravle, 2015).. Această diversitate litologică influențează stabilitatea versanților, fertilitatea solurilor și, implicit, tipologia vegetației forestiere (Doniță et al., 2005).. În zonele cu roci dure, eroziunea este redusă, în timp ce rocile friabile favorizează procese de instabilitate geomorfologică, cu efecte asupra distribuției ecosistemelor (Qiao et al., 2020; Șofletea și Curtu, 2007).

1.1.2. Altitudinea

Altitudinea variază între aproximativ 500 m și peste 1700 m, determinând o etajare altitudinală pronunțată a vegetației. Etajele de fag domină altitudinile joase și medii, bradul și molidul ocupă altitudini mai mari, iar în zona subalpină apar jneapănul și vegetația specifică

gurilor alpine. Această diferențiere altitudinală condiționează microclimatul și structura ecosistemelor forestiere (Doniță et al., 2005)..

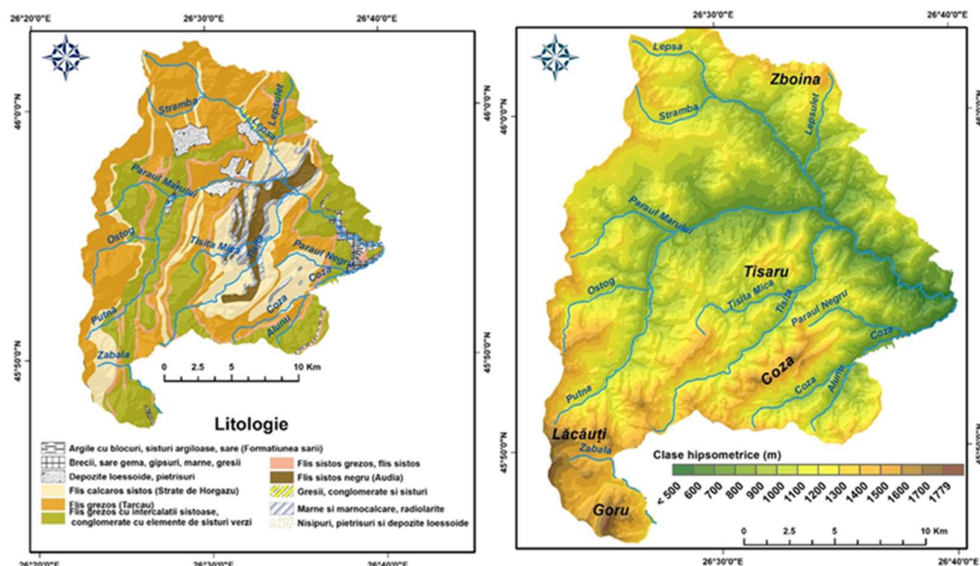


Figura 2. Harta litologică a PNPV (după Dumitrescu et al, 1965) (în partea stângă) și Harta hipsometrică a Parcului Natural Putna Vrancea (în dreapta)

1.1.3. Panta

Relieful este marcat de pante accentuate, frecvent depășind 30–35°, ceea ce influențează atât dinamica proceselor geomorfologice, cât și accesibilitatea pentru activitățile umane. Pantele abrupte contribuie la fragmentarea habitatelor și la apariția unor microhabitate variate, cu rol important pentru diversitatea biologică. În același timp, acestea determină vulnerabilități sporite la eroziune și alunecări de teren.

1.1.4. Expoziția versanților

Expoziția versanților determină diferențe semnificative de microclimat, radiație solară și umiditate a solului. Versanții sudici sunt mai expuși la radiație și au un regim termic mai ridicat, favorizând speciile termofile, în timp ce versanții nordici sunt caracterizați prin umiditate și temperaturi mai scăzute, favorabile speciilor higrofile. Această variație contribuie la diversitatea vegetației și la adaptabilitatea speciilor forestiere.

1.1.5. Solurile

Solurile din PNPV reflectă substratul litologic și condițiile climatice montane, fiind reprezentate preponderent de cambisoluri și spodosoluri. În zonele înalte apar soluri acide, sărace în nutrienți, care limitează dezvoltarea speciilor forestiere, în timp ce solurile de la altitudini mai joase prezintă fertilitate mai bună și susțin etajele de fag și gorun. Variabilitatea pedologică joacă un rol esențial în distribuția și productivitatea arboretelor.

Figura 3. Distribuția spațială a principalelor tipuri de sol din cadrul Parcului Natural Putna-Vrancea (după Florea et al., 1963-1994)

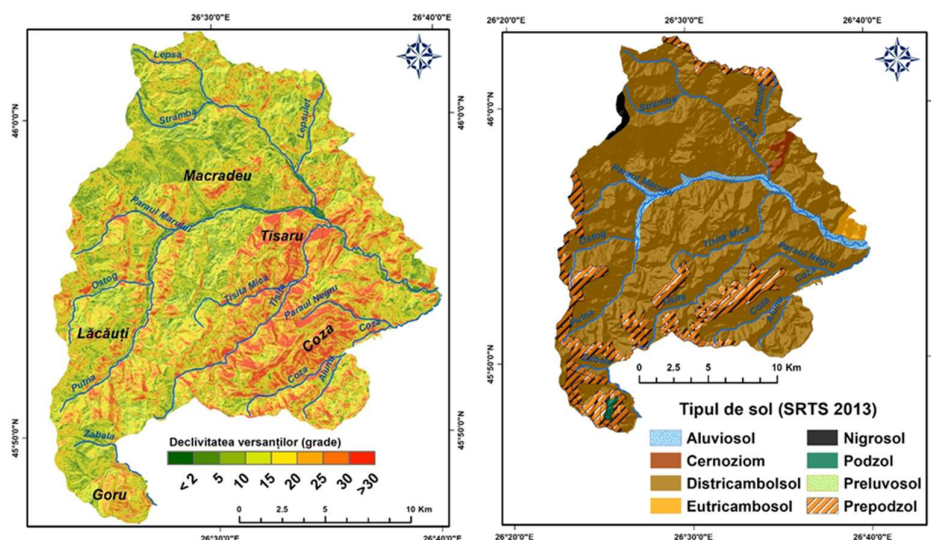


Figura 3. Harta declivității versanților (în stânga) și harta solurilor (în dreapta)

1.1.6. Clima

Climatul este tipic montan, caracterizat prin temperaturi medii scăzute, amplitudini termice sezoniere pronunțate și precipitații ridicate, cu o distribuție neuniformă pe altitudine. Zăpada persistă în zona înaltă pe perioade îndelungate, influențând regimul hidric și dinamica vegetației. Variabilitatea climatică recentă, marcată de creșterea temperaturilor și oscilațiile precipitațiilor, reprezintă un factor de presiune suplimentar asupra ecosistemelor forestiere (Fig. 4).

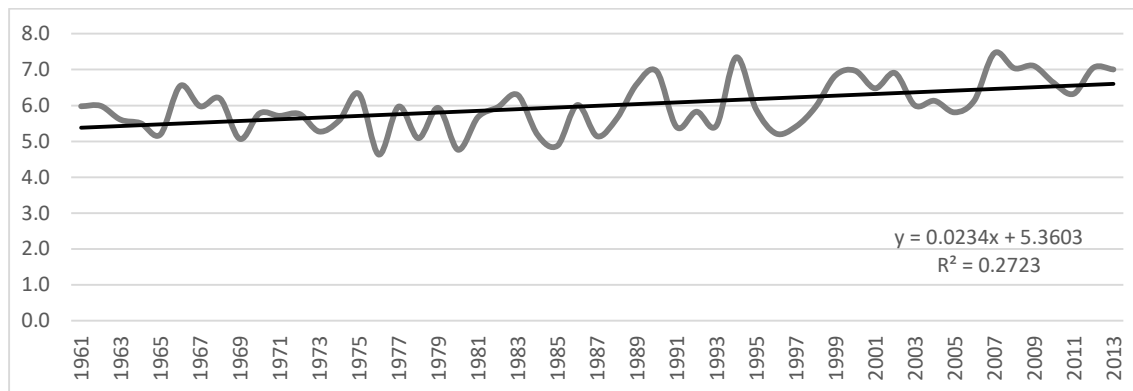


Figura 4. Variația multianuală a temperaturii medii în Parcul Natural Putna-Vrancea (sursa datelor: ROCADA, Dumitrescu și Bârsan, 2015)

Analiza evoluției cantităților medii anuale de precipitații în Parcul Natural Putna-Vrancea (PNPV) în intervalul 1961–2013 arată o variabilitate semnificativă de la un an la altul, fără să se observe o tendință clară crescătoare sau descrescătoare. În perioada analizată se remarcă alternanța între ani cu cantități mari de precipitații (de exemplu 1972, 1991, 2005) și ani mai secetoși (precum 1963, 1986, 2000) (fig 5.).

Distribuția precipitațiilor sugerează o variabilitate interanuală accentuată, tipică regiunilor montane cu influențe climatice complexe. Această fluctuație reflectă regimul climatic local, puternic influențat de particularitățile geografice și altitudinale ale zonei.

Implicațiile acestor fluctuații se resimt la nivel ecologic, influențând direct vegetația, fauna, regimul hidrologic și stabilitatea solului. Astfel, monitorizarea atentă a precipitațiilor și

înțelegerea acestor variații sunt necesare pentru adaptarea strategiilor de conservare și gestionare sustenabilă a ecosistemelor din Parcul Natural Putna Vrancea.

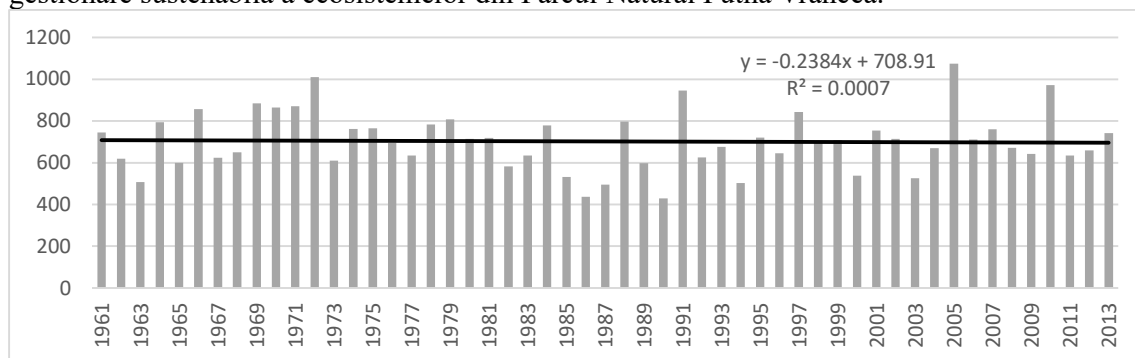


Fig. 5. Cantitatea de precipitații anuale în Parcul Natural Putna-Vrancea (sursa datelor: ROCADA, Dumitrescu și Bârsan, 2015)

1.1.7 Flora

Flora parcului este diversă, cuprinzând atât specii comune zonelor montane ale Carpaților, cât și elemente rare sau endemice. Vegetația forestieră este dominată de fag, brad, molid și gorun, organizate în etaje altitudinale clare. În zonele de tranziție apar amestecuri complexe de specii, iar în arealele subalpine se întâlnesc comunități de jneapăn și pajiști alpine. Diversitatea floristică conferă parcului o valoare deosebită pentru conservare. Speciile de interes comunitar întâlnite pe suprafața PNPV sunt: papucul doamnei (*Cypripedium calceolus*), clopoțelul (*Campanula serrata*), iarba gâtului (*Tozzia alpina* subsp. *Carpathica*)-inclusă pe lista roșie. Speciile de interes conservativ sunt: jneapănul (*Pinus mugo*), bulbucul de munte (*Trollius europaeus*), tisa (*Taxus baccata*), floarea de colț (*Leontopodium alpinum*), cea mai mică specie de papură (*Typha minima*)- inclusă pe lista roșie (Fig. 6).



Figura 6. Specii de interes comunitar și conservativ: a) papucul doamnei (*Cypripedium calceolus*), b) floarea de colț (*Leontopodium alpinum*), c) bulbucul de munte (*Trollius europaeus*)

1.1.8 Fauna

Fauna PNPV este caracteristică ecosistemelor montane carpatine și include specii cu valoare de conservare ridicată, precum ursul brun, lupul și râsul, alături de ungulate precum cerbul și mistrețul. Diversitatea faunistică este susținută de integritatea habitatelor forestiere și de conectivitatea acestora cu areale naturale din vecinătate. Prezența carnivorelor mari confirmă valoarea ecologică a parcului ca refugiu pentru specii protejate la nivel european (Fig 7).



Figura 7. Specii din fauna PNPV

1.2. Istoricul cercetărilor în parcurile naturale la nivel internațional și național

Cercetările asupra ariilor protejate au cunoscut o evoluție etapizată: de la cartografierea și inventarierea resurselor naturale în secolele XVIII–XIX, la dezvoltarea unor abordări moderne bazate pe teledetecție, GIS și modelare ecologică. La nivel național, studiile dedicate PNPV și altor parcuri naturale au urmărit atât descrierea cadrului fizico-geografic, cât și evaluarea resurselor biologice și a presiunilor antropice, oferind baza pentru planuri de management adaptativ.

1.2.1 Etapa cartografierii istorice

Primele reprezentări cartografice ale zonei datează din secolul al XVIII-lea și surprind extinderea suprafețelor forestiere și utilizările tradiționale ale terenurilor. Aceste hărți constituie surse valoroase pentru analiza diacronică a peisajului, permițând identificarea transformărilor structurale ale pădurilor în ultimele secole (Timar et al., 2010; <http://geoportost.ios-regensburg.de/>; <https://maps.arcanum.com/en/>). Ele reprezintă, de asemenea, un punct de plecare pentru corelarea schimbărilor istorice cu presiunile antropice și cu contextul natural (Skaloš et al., 2011; Bürgi et al., 2015; Ławniczak și Kubiak, 2021, Istrate et al., 2023).

Materialele cartografice istorice sunt utile pentru analiza retrospectivă a modului de utilizare al terenului și schimbarea acestuia în timp (de exemplu, Kienast, 1993; Petit și Lambin, 2002). Hărțile istorice (hărți cadastrale vechi, hărți topografice, hărți militare, hărți tematice) care conțin informații despre modul de utilizare al terenului se pot constitui ca straturi temporale în analiza evoluției suprafețelor împădurite și nu numai. Acestea pot servi ca bază pentru reconstrucția modului de utilizare a terenurilor din trecut, mai ales atunci când sunt utilizate într-un sistem de informații geografice (S.I.G.). Comparațiile dintre hărțile istorice și cele moderne evidențiază principalele schimbări care au avut loc. Pentru unele areale, datele privind utilizarea terenului pot fi generate direct din hărți istorice. În general, selecția hărților vechi pentru studiile privind dinamica utilizării terenurilor depinde de momentul în care au fost elaborate, de amploarea lor, și scopul studiului.

Numeroase informații istorice despre utilizarea terenurilor sunt disponibile sub formă de hărți începând cu secolul al XIX-lea, mai ales pentru Europa. Colecții de hărți topografice

sunt disponibile pentru fostul Imperiu Austriac (Timar et al., 2010; <http://geoportost.ios-regensburg.de/> sau <https://maps.arcanum.com/en/>), Belgia (Depuydt, 1975), Țările de Jos, Portugalia și multe alte țări europene (Böhme, 1989) și regiuni (Nordrhein-Westfalen, 1967). Multe dintre aceste hărți sunt deja scanate și disponibile pe Internet, așa cum este cazul Franței (<http://www.geoportail.gouv.fr>), Regatul Unit (<http://www.british-history.ac.uk/>; <http://maps.nls.uk/>), Germania (<http://gso.gbv.de/>), Suedia (<http://www.lantmateriet.se/>), Republica Cehă (<http://geoportal.cuzk.cz/>), Italia (<http://www.igmi.org/>), România (<http://geo-spatial.org/>) sau pentru întreaga Europă (Arcanum Adatbázis Kft, 2015; <https://maps.arcanum.com/en/>; <https://www.oldmapsonline.org/>).

Pentru teritoriul României, au fost realizate studii în care s-au utilizat informații din hărțile topografice realizate în secolele XVIII, XIX și XX, în care s-a urmărit îndeosebi evoluția suprafețelor împădurite. Munteanu et al., (2016) au modelat gradul de perturbare a pădurilor contemporane în funcție de utilizarea istorică a terenurilor realizată pe baza hărților topografice digitalizate din 1860 și 1960. Alte studii s-au concentrat pe analiza diacronică a suprafețelor ocupate cu diferite tipuri de vegetație pentru areale mai restrânse precum bazine hidrografice (Timár et al., 2007; Ursu et al., 2007; Osaci-Costache și Ene, 2010; Chelaru et al., 2013; Armaș et al., 2014; Ursu et al., 2015) unități de relief (Osaci-Costache, 2004; Osaci-Costache și Achim, 2008; Săvulescu și Mihai, 2011; Stângă și Niacșu, 2016) sau unități administrative (Pătru-Stupariu et al., 2011; Afloari et al., 2018; Horodnic et al., 2018). Pentru partea nordică a Parcului Natural Putna-Vrancea, Istrate et al., (2021), au analizat schimbările în utilizarea terenului și gradul de fragmentare cu privire specială asupra dinamicii evoluției suprafețelor împădurite prin utilizarea informațiilor din hărțile topografice din 1896 și 1975, ulterior în 2023 Istrate et al., au analizat schimbările pentru toată suprafața Parcului Natural Putna-Vrancea.

1.2.2. Noi tendințe în cercetarea internațională

La nivel global, cercetarea ariilor protejate este orientată către integrarea tehnologiilor de teledetecție multispectrală și radar, utilizarea bazelor de date climatice la scară fină și aplicarea modelelor predictive de distribuție a speciilor. Aceste metode facilitează monitorizarea schimbărilor ecologice în timp real și oferă perspective asupra adaptării ecosistemelor la schimbările climatice și la presiunile antropice.

1.2.3. Literatura de specialitate din Romania

În România, literatura de specialitate reflectă preocupări constante pentru studiul ecosistemelor forestiere și al ariilor protejate, cu accent pe dinamica vegetației, impactul factorilor climatici și presiunile exercitate de activitățile umane (Rujoiu-Mare et al., 2017; Ursu, 2009; Ciutea, 2022;). Cercetările dedicate PNPV au contribuit la înțelegerea particularităților sale ecologice și la conturarea unor recomandări de management bazate pe date empirice și analize spațiale (Chiriac, 2009).

2. Date și metodologie

2.1. Metodologia analizei bibliometrice

Lucrarea a debutat printr-o analiză bibliometrică menită să contureze stadiul actual al cercetărilor privind ariile protejate și teledetecția forestieră. S-a realizat o trecere critică în revistă a literaturii internaționale și naționale, cu accent pe tendințele moderne de monitorizare prin satelit și pe aplicarea indicilor de vegetație. Această etapă a permis fundamentarea metodologică a studiului și evidențierea golurilor de cunoaștere pentru PNPV.

2.2. Metodologia de analiză activității antropice

Pentru a surprinde impactul utilizării istorice a terenurilor asupra vegetației, au fost integrate hărți istorice (1789, 1895) și ortofotoplanuri recente. Acestea au fost georeferențiere și digitizate manual, permițând analiza diacronică a transformărilor forestiere. Elementul de noutate constă în suprapunerea acestor date istorice cu informațiile moderne obținute din imagini satelitare, ceea ce a permis cuantificarea dinamicii suprafețelor împădurite și a presiunilor antropice (exploatare, plantații, conversii de teren).

În ultima etapă, cea a analizei rezultatelor, au fost realizate hărți ale modului de utilizare al terenului pentru fiecare din cele cinci perioade analizate, precum și hărți ale zonelor împădurite. Transformarea fișierelor vectoriale în rastere și apoi efectuarea unor operații matematice cu acestea au permis realizarea evoluției spațio-temporale, în special, a suprafețelor ocupate cu păduri din ultimii 230 de ani.

S-au putut evidenția schimbările în cadrul modului de utilizare a terenului între anii 1895 și 2005. Materialele cartografice utilizate au fost Atlasul Moldovei din anul 1986 scara 1:50000, Harta topografică a României cu scara 1:25000, ediția 1971 și ortofotoplanuri din 2005.

Datele au fost digitizate cu ajutorul software-ului ArcGIS în proiecția oficială a României Stereo 70. Clasele de utilizare a terenurilor au fost păstrate conform metodologiei europene (AEE, 2006). În urma digitizării hărților și ortofotografiilor istorice au fost extrase 6 categorii de utilizare a terenului: suprafețe artificiale, teren arabil, pășuni, păduri, zone umede și corpuri de apă, roci goale. Pentru aceste categorii s-au calculat suprafețele și s-au realizat diagramele de distribuție a acestora (Fig. 8)

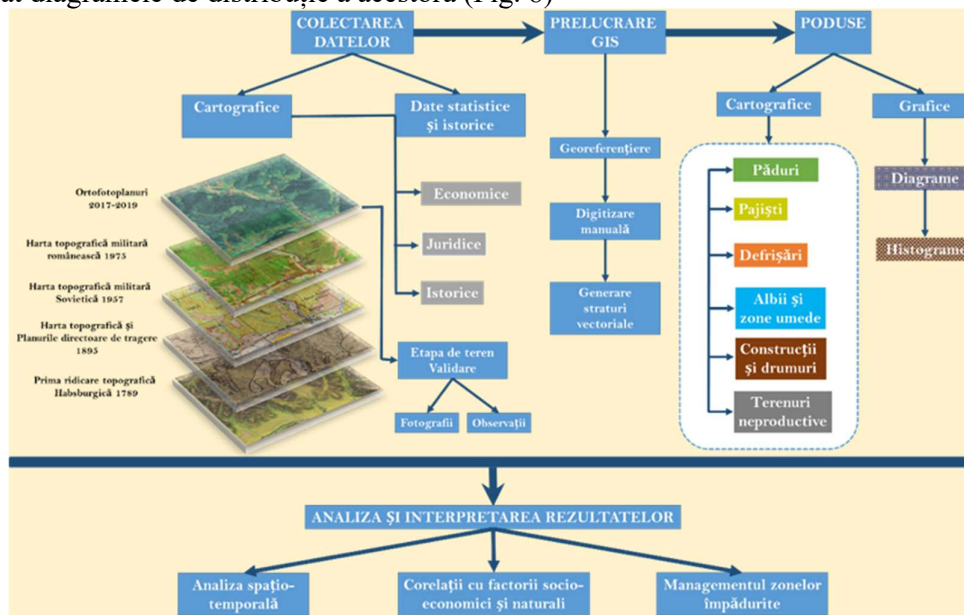


Figura 8. Reprezentarea schematică a metodologiei utilizate (după Istrate et al., 2022)

2.3. Metodologie -utilizarea datelor parcelare din PNPV pentru studierea caracteristicilor vegetației forestiere

Un aport metodologic semnificativ l-a avut integrarea datelor silvice parcelare, care au furnizat informații detaliate privind compoziția, structura și vârsta arboretelor. Aceste date, disponibile la nivel de unități de gospodărire, au fost corelate cu factorii ecologici (altitudine, pantă, sol, climă) și cu imaginile satelitare. Astfel, a fost posibilă validarea clasificărilor din teledetecție și elaborarea unor modele de favorabilitate pentru speciile dominante.

Pentru a face posibilă această analiză, informațiile conținute în descrierile parcelare, disponibile în format PDF, au fost extrase și introduse într-o bază de date compatibilă cu un sistem informațional geografic. Procesul a implicat mai întâi extragerea datelor-cheie (specii dominante, vârsta arboretului, volumul pe picior, clasa de bonitate, suprafața parcelei etc.), urmată de structurarea acestor date în tabele digitale. Fiindcă unele fișiere erau scanate, s-au utilizat aplicații OCR (Optical Character Recognition) pentru convertirea textului în format editabil. Această etapă a fost destul de cronofagă având în vedere volumul foarte mare de date.

2.4. Datele climatice

Metodologia a utilizat baza ROCADA (1961–2013) și datele reanalizei C3S, care oferă variabile climatice la rezoluții spațiale și temporale fine. Aceste date au permis caracterizarea tendințelor climatice pe termen lung (creșterea temperaturilor, variabilitatea precipitațiilor) și analiza impactului asupra vegetației forestiere. Inovația constă în integrarea acestor serii climatice cu hărțile istorice și imaginile satelitare, oferind o perspectivă integrată asupra factorilor de mediu.

2.5. Metodologie – Estimarea temperaturii suprafeței active utilizând imagini MODIS (2000–2022)

Pentru analiza regimului termic la nivelul suprafeței active (Land Surface Temperature – LST) în cadrul PNPV, au fost utilizate produse satelitare furnizate de senzorul MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), disponibil prin platforma NASA Earthdata (MOD11A2 – LST 8-Day Composite, nivel 3, rezoluție spațială de 1 km).

Au fost selectate valori medii multianuale pentru perioada 2000–2022, corespunzătoare următoarelor luni reprezentative din fiecare sezon: ianuarie (iarnă), aprilie (primăvară), iulie (vară) și octombrie (toamnă). Am ales aceste luni pentru a reflecta dinamica sezonieră a variațiilor termice la nivelul solului, cu impact direct asupra vegetației forestiere și a proceselor ecologice asociate

2.6. Analiza temperaturii suprafeței active în funcție de specia forestieră dominantă

Pentru a investiga relația dintre regimul termic al suprafeței active și compoziția forestieră a arboretelor din Parcul Natural Putna-Vrancea, a fost utilizată o serie de date satelitare MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibile prin produsul MOD11A2 (Land Surface Temperature – LST). Acest produs oferă temperaturi medii la sol la intervale de 8 zile, cu o rezoluție spațială de 1 km, fiind adecvat pentru analize climatice regionale multianuale.

Această abordare a permis identificarea diferențelor statistice și sezoniere între tipurile de acoperire forestieră, fiind esențială pentru evaluarea capacității diferitelor tipuri de păduri de a modula microclimatul local și de a răspunde la variațiile climatice regionale.

Prelucrarea și analiza datelor a fost realizată cu ajutorul softurilor QGIS (v3.28) și R (v4.2.1), utilizând pachetele raster, sf și ggplot2.

2.7. Metodologie Remote sensing

Unul dintre elementele centrale de noutate ale metodologiei îl reprezintă utilizarea imaginilor Sentinel-2 (2015–2022), preprocesate prin Sen2Cor pentru corecții atmosferice. Au fost calculați indici spectrali (NDVI, EVI, NBR etc.) care surprind starea vegetației, dinamica sezonieră și variațiile spațiale. Imaginile satelitare au fost reproiectate în Stereo70 și rasterizate la 12,5 m, pentru a asigura coerența analizelor. În combinație cu datele parcelare și climatice, acestea au permis realizarea de hărți multi-temporale și de modele predictive privind favorabilitatea speciilor forestiere.

Pentru atingerea obiectivului nostru (monitorizarea stării vegetației forestiere din Parcul Natural Putna- Vrancea folosind imagini Sentinel 2) au fost calculați o serie de indici radiometrici și biofizici. Aceștia sunt: Indicele de vegetație a diferențelor normalizate (NDVI), Indicele suprafeței foliare (LAI), Procentul de radiație absorbit de vegetație (FAPAR), Procentul de acoperire cu vegetație (FCOVER), Cantitatea/cantitatea de apă din suprafața foliară (Cw), Concentrația de clorofilă din suprafața foliară (Cab) și Factorul de integritate biosintetică (BIF).

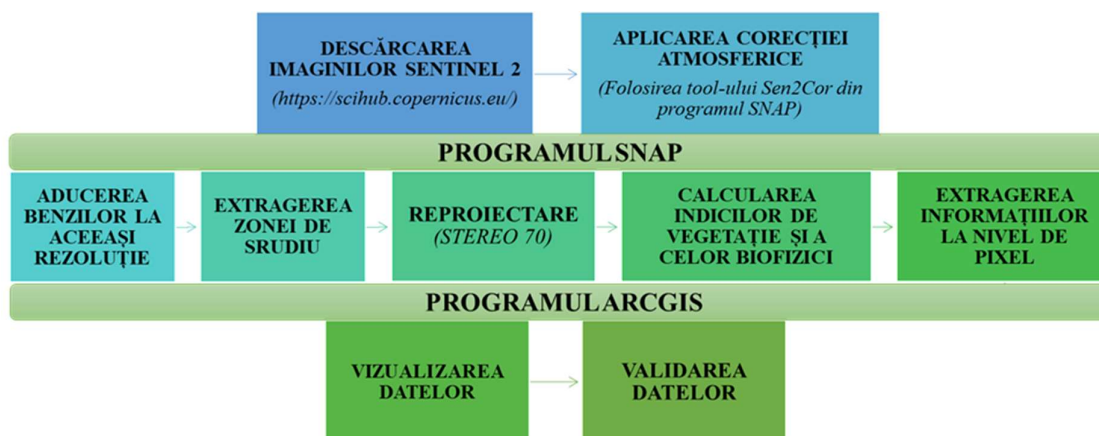


Figura 9. Fluxul de lucru pentru analiza indicilor de vegetație

3. Compoziția vegetației forestiere

3.1. Compoziția și distribuția vegetației forestiere din PNPV

Pe baza datelor parcelare, suprafața forestieră de aproximativ 31.600 ha din PNPV prezintă o diversitate ridicată de specii, însă dominată de câteva elemente majore. Fagul (36%) și molidul (34%) sunt speciile principale, co-dominante, urmate de brad (18%). Specii precum mesteacănul (5%), pinul (2%) și gorunul (1%) au o pondere redusă, iar restul speciilor (paltin, anin, carpen, plop, cireș, larice etc.) sunt dispersate sporadic. Distribuția eterogenă, cu un nucleu central al fagului și molidului, reflectă adaptabilitatea acestora la condițiile ecologice variate și relevă o zonă de tranziție ecologică între etajele de foioase și cele de conifere (fig. 10).

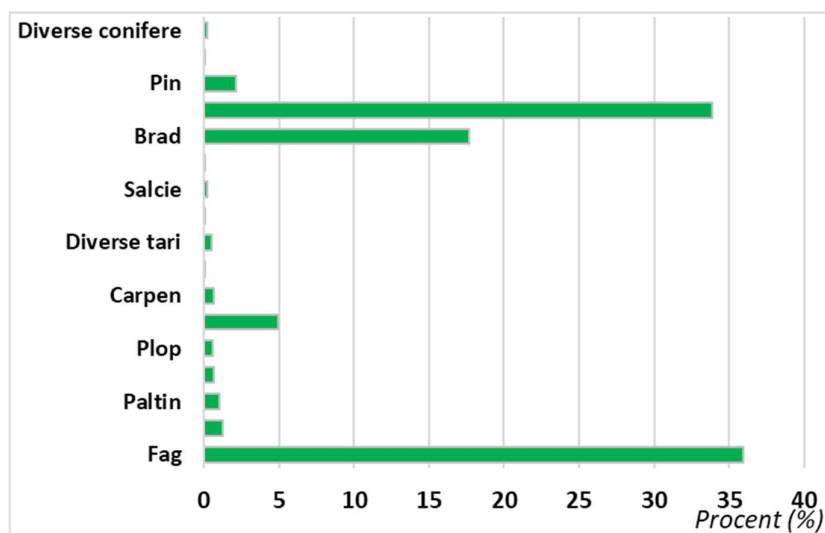


Figura 10. Procentul ocupat de principalele specii din totalul suprafeței împădurite analizate în cadrul PNPV

3.2. Distribuția speciilor în funcție de vârstă

Structura pe clase de vârstă indică o pădure eterogenă, cu procese active de regenerare și zone cu arbori maturi sau chiar seculari. Arboretele tinere (0–50 ani) acoperă suprafețe importante, sugerând regenerare naturală sau artificială, în timp ce pădurile de vârstă intermediară (51–120 ani) sunt cele mai extinse și biologic diversificate. Arboretele mature (peste 120 ani) apar fragmentar, dar sunt valoroase ecologic prin stocarea de carbon și prin habitatele oferite. Structura mozaicată pe vârste sporește biodiversitatea și reziliența pădurii, însă ponderea redusă a regenerărilor foarte tinere (<20 ani) semnalează o nevoie de măsuri silvotecnice suplimentare.

Analiza detaliată pe specii relevă modele distincte de structură. Bradul este concentrat în clasa 81–120 ani ($\approx 45\%$), cu regenerare moderată în clasele tinere. Molidul are o distribuție echilibrată, cu vârfuri la 20–50 și 81–120 ani, sugerând regenerări succesive. Pinul este dominat de păduri tinere și medii (20–80 ani), în timp ce laricele are prezență foarte redusă. Fagul se remarcă prin dominanța claselor de 81–160 ani ($>70\%$), indicând stabilitate și continuitate, iar gorunul prezintă o structură apropiată, dar mai puțin îmbătrânită. Carpenul și paltinul domină în clasele intermediare, cu rol important în regenerare, iar speciile pionier (mesteacăn, plop, salcie, anin) sunt prezente mai ales în clasele tinere și medii, reflectând succesiunea secundară și preferințele pentru habitate perturbate sau umede.

3.3. Specia dominantă la nivel de unitate amenajistică

Analiza datelor din unitățile amenajistice (UA) confirmă dominanța molidului (41,9% din suprafață, prezent în peste 1100 UA) și a fagului ($\approx 41\%$, peste 1000 UA), cele două specii acoperind împreună majoritatea pădurilor din parc. Bradul este dominant în $\approx 10\%$ din suprafață, iar speciile secundare – mesteacăn, pin, gorun – au ponderi mai mici (1–3%). Există și UA-uri ocupate integral de o singură specie (359 de UA-uri exclusiv cu molid, 143 exclusiv cu fag), ceea ce reflectă atât particularitățile ecologice, cât și influența managementului istoric.

3.4. Diversitatea speciilor pe unitate amenajistică

Diversitatea pe UA variază între 1 și 7 specii. Zonele sud-vestice și nord-estice sunt dominate de arborete monospecifice (1–2 specii), mai vulnerabile la factori de stres, în timp ce zonele centrale și sud-estice (ex. Tișița, Coza, Alunu) prezintă diversitate ridicată (5–7 specii). Majoritatea UA-urilor conțin însă 3–4 specii, ceea ce sugerează o structură moderat diversificată. Această distribuție spațială a diversității confirmă importanța diversității compoziționale pentru reziliența pădurii și evidențiază vulnerabilitatea pădurilor dominate de o singură specie la schimbările climatice și atacurile biotice.

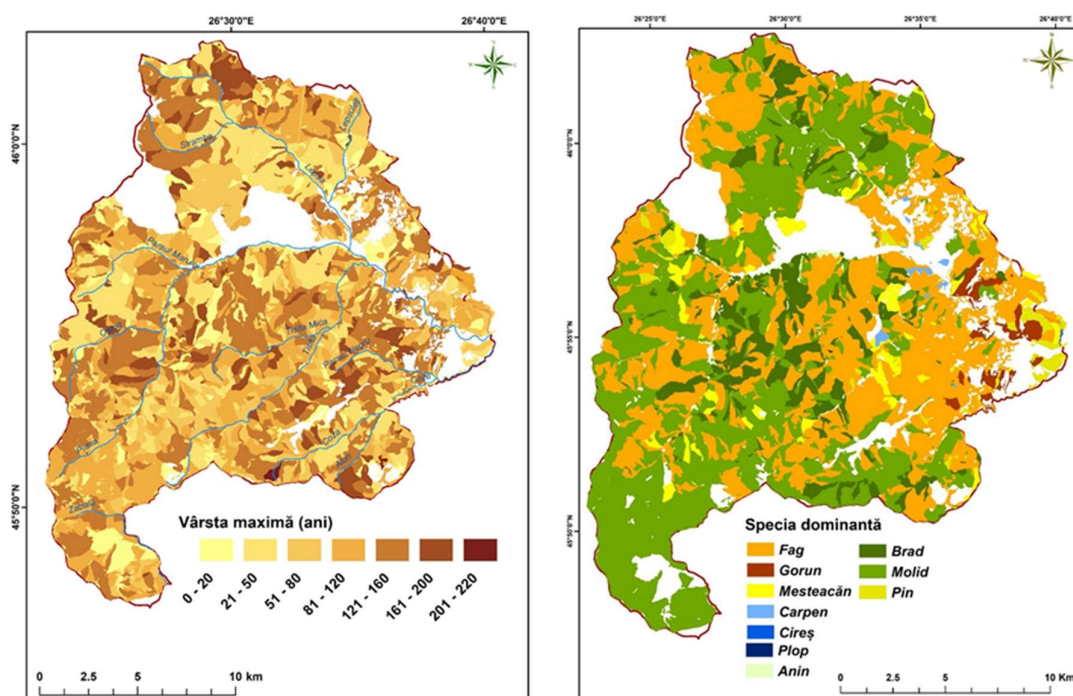


Figura 11. Vârsta maximă a arborilor (stânga) și specia dominantă (dreapta) din fiecare unitate amenajistică

4. Factorii naturali care influențează vegetația forestieră

4.1. Factorii abiotici

Factorii abiotici reprezintă componentele fizice și chimice ale mediului care influențează direct dezvoltarea și distribuția vegetației forestiere. În Parcul Natural Putna-Vrancea, aceștia includ în primul rând clima, relieful, solurile și condițiile hidrologice, fiecare având un rol determinant în configurarea peisajului forestier.

3.1.1. Caracteristicile geomorfometrice și influența acestora asupra vegetației

Analiza distribuției altitudinale confirmă etajarea clasică a vegetației din Carpații Orientali (Doniță et al., 2005). Fagul (*Fagus sylvatica*) domină zona montană superioară (1000–1300 m), în timp ce gorunul (*Quercus petraea*) se concentrează între 600–900 m, caracteristic etajului colinar-submontan (Eaton et al., 2016). Paltinul de munte (*Acer pseudoplatanus*) este bine reprezentat la 800–900 m (Șofletea & Curtu, 2007), iar carpenul (*Carpinus betulus*) preferă altitudinile de 600–900 m, asociindu-se cu gorunul (Leuschner & Ellenberg, 2017b). Speciile pionier, precum mestecănul, aninul, plopul și salcia, au o distribuție mai dispersată, reflectând adaptabilitatea la condiții variate (Atkinson, 1992; Claessens et al., 2010). Din datele obținute se remarcă o particularitate: plopul apare cu frecvență ridicată la 1000–1100 m, iar salcia ocupă constant terasele montane joase, ceea ce indică adaptări locale.

Coniferele prezintă o stratificare clară. Bradul (*Abies alba*) se concentrează la 900–1200 m, cu un maxim la 1100 m (Șofletea & Curtu, 2007), iar molidul (*Picea abies*) are o amplitudine mai mare (900–1400 m), ajungând până în zona subalpină (>1600 m) (Leuschner & Ellenberg, 2017a). Pinul (*Pinus sylvestris*, *P. nigra*) domină altitudinile joase (500–800 m), adesea pe terenuri degradate, sugerând regenerări artificiale (Enescu et al., 2022). Laricele (*Larix decidua*) este concentrat aproape exclusiv la 1000 m, ceea ce sugerează originea sa silviculturală, fiind rar întâlnit natural în Carpații de Curbură (Șofletea & Curtu, 2007). Cercetarea de față arată că structura verticală actuală reflectă atât condiții naturale, cât și intervenții antropice (Fig 13).

Analiza GIS evidențiază adaptabilitatea diferită a speciilor. Fagul și bradul se regăsesc pe pante abrupte (>25°), în timp ce gorunul și carpenul preferă pante moderate (10–25°). Speciile pionier (mestecăn, plop, salcie) se concentrează pe terenuri plane sau slab înclinate (<10°). Molidul domină pe pante de 15–30°, corespunzătoare zonelor montane superioare, iar pinul și laricele prezintă cea mai mare toleranță, fiind prezente inclusiv pe pante extreme (Enescu et al., 2022). Observațiile din teren arată o asociere foarte clară a aninului cu pante sub 5°, confirmând preferința sa pentru luncile râurilor (Fig 12).

Datele analizate confirmă diferențele între specii sciiofile și heliofile. Fagul și bradul preferă expozițiile nordice și umbrite (Leuschner et al., 2022), în timp ce gorunul, pinul și laricele domină versanții sudici, mai însoriți (Stănescu et al., 1997; Hanewinkel et al., 2013). Speciile cu plasticitate ecologică ridicată, precum paltinul, carpenul și mestecănul, se distribuie uniform, iar cele higrofile (aninul și salcia) apar preponderent pe expozițiile nordice și vestice. Analizele efectuate în PNPV arată și o particularitate locală: plopul tremurător are o frecvență ridicată pe expozițiile vestice, semnalând o adaptare mai largă decât cea cunoscută în literatura de specialitate.

În PNPV, alunecările de teren reprezintă procese cu impact major asupra pădurilor, afectând zonele Băhneanu, Greșu, Valea Tișței și Valea Putnei (Chiriac, 2009). Evenimentul cel mai semnificativ a avut loc în 2005, în Masivul Condratu: o alunecare de 1200 × 70 m a distrus arboretele de molid și arin, fiind urmată de formarea unui lac de baraj natural.

Observațiile de teren confirmă faptul că astfel de procese reduc stabilitatea pădurilor, dar generează și habitate noi, care diversifică structura peisajului și accelerează succesiunea ecologică.

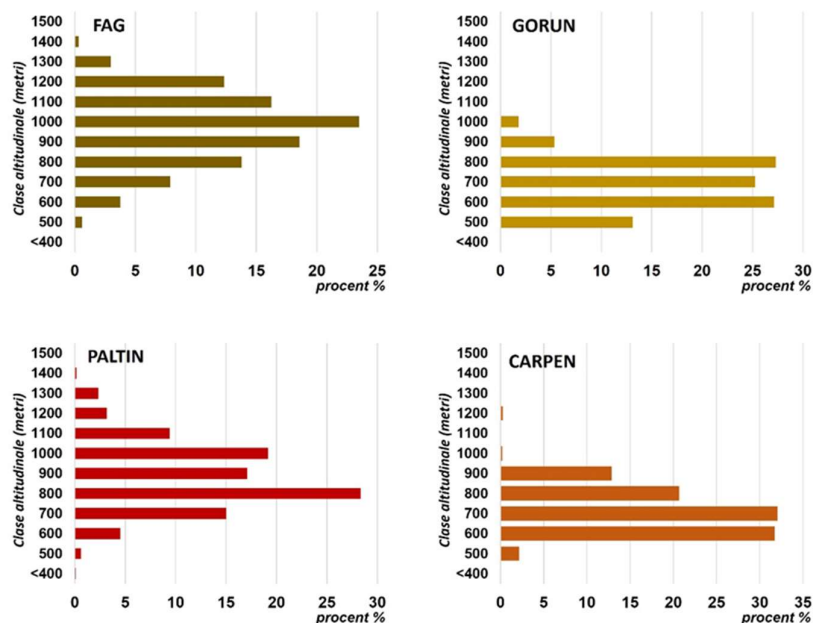


Figura 12. Distribuția altitudinală a principalelor specii de foioase din PNPV exprimată ca procent din arealul total al fiecărei specii

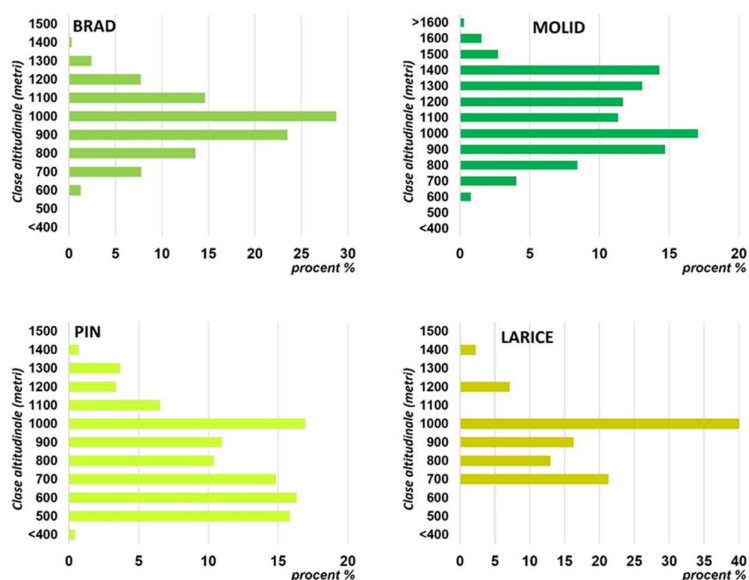


Figura 13. Distribuția altitudinală a speciilor de conifere din PNPV exprimată ca procent din arealul total al fiecărei specii

3.1.2. Tipurile de sol și substratul litologic

Relația dintre substratul litologic, tipurile de sol și vegetația forestieră din PNPV confirmă rolul central al factorilor edafici în distribuția speciilor. Rocile silicioase (șisturi, gresii) favorizează formarea districambosolurilor acide, sărace în baze, asociate cu fagul și carpenul (Leuschner et al., 2022), în timp ce rocile calcaroase și marnoase susțin apariția

eutricambosolurilor și rendzinelor, mai fertile și cu o capacitate crescută de reținere a apei (Bălțeanu et al., 2011). Analiza realizată arată că gorunul se instalează cu precădere pe substraturi silicioase și versanți uscați, în timp ce speciile higrofile (aninul, plopul, salcia) se asociază cu depozite loessoide și pietrișuri, corespunzătoare zonelor de vale și albiilor râurilor.

Pentru conifere, datele obținute confirmă preferința bradului și a molidului pentru flișul gros cu intercalații șistoase, substrat ce generează soluri acide, bine drenate și umede, tipice etajului montan mijlociu și superior (Stănescu et al., 1997). Pinul are o distribuție mai echilibrată, apărând pe flișuri și marne, ceea ce indică toleranța sa față de solurile sărace și uscate (Enescu et al., 2022). Laricele este corelat în special cu flișul șistos negru, ceea ce susține ipoteza unei prezențe asociate plantațiilor, dat fiind caracterul său alohton în Carpații de Curbură (Șofletea & Curtu, 2007). Această repartitie evidențiază legătura strânsă dintre substratul geologic și cerințele fiziologice ale speciilor forestiere.

Din punct de vedere pedologic, districambosolurile domină net suprafața PNPV, constituind principalul substrat edafic pentru fag, gorun, carpen și brad. Eutricambosolurile și preluvosolurile apar în proporții mai mici, dar găzduiesc specii cu cerințe mai ridicate de fertilitate sau umiditate, precum gorunul și aninul. Prezența aluviosolurilor, asociate speciilor higrofile, reflectă dinamica hidrologică a văilor montane și succesiunea pionieră a speciilor de luncă (Claessens et al., 2010). Această structură edafică complexă explică mozaicul forestier actual și susține ideea că diversitatea solurilor din PNPV favorizează coexistența unor specii cu ecologii foarte diferite, de la conifere sciiofile la foioase termofile sau higrofile.

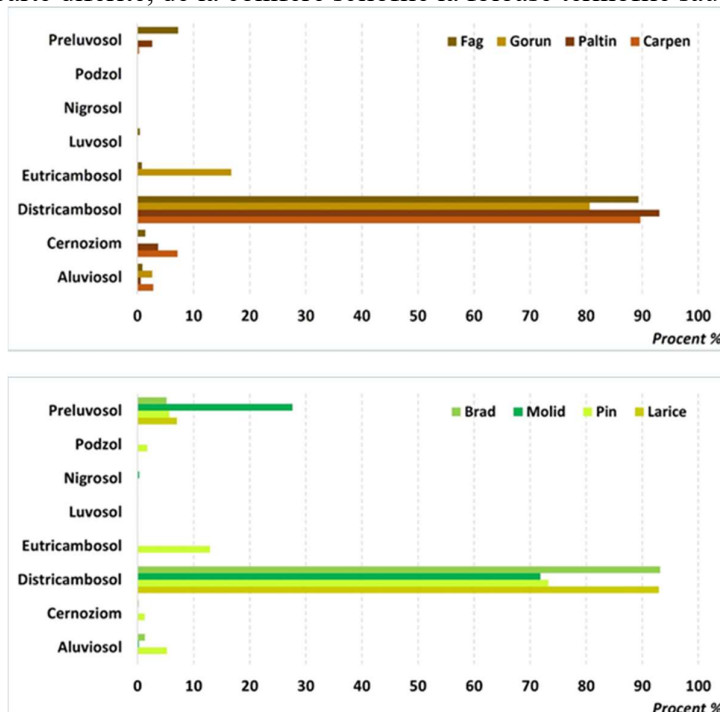


Figura 14. Distribuția pe tipuri de sol a principalelor specii de foioase și rășinoare din PNPV exprimată ca procent din arealul total al fiecărei specii

3.1.3. Doborâturile de vânt

Vântul reprezintă unul dintre cei mai importanți factori perturbatori ai ecosistemelor forestiere, influențând atât arborii individuali, cât și structura peisajului. Analiza vitezei și frecvenței vântului înregistrate la stația Lăcăuți (2015–2024) evidențiază o circulație predominant vestică, cu intensități maxime pe crestele Zboina și Coza (≈ 13 m/s) și viteze reduse în văile adăpostite (< 2 m/s) (Clima României, 2008). Distribuția spațială a curenților

eolien este direct corelată cu orientarea masivelor montane și cu morfologia văilor, ceea ce explică gradul variabil de vulnerabilitate al pădurilor.

Impactul vântului asupra arborilor diferă în funcție de specie, tipul de rădăcină și substratul edafic. Literatura de specialitate arată că viteze între 11–17 m/s pot cauza doborâturi de mică amploare, iar furtunile cu peste 17 m/s produc ruperi și smulgeri de arbori, cele extreme (>29 m/s) având efecte devastatoare (Popa, 2000; Popescu-Zeletin, 2008). În PNPV, molidul este cea mai expusă specie, datorită sistemului radicular superficial, fiind urmat de fag și, ocazional, de brad. În contrast, bradul și laricele, prin rădăcinile pivotante, prezintă o rezistență sporită, dar devin vulnerabile pe solurile superficiale (Șofletea & Curtu, 2007).

Consecințele economice și ecologice ale doborâturilor includ pierderi de volum lemnos, deprecierea masei lemnoase și apariția unor focare secundare de infestare cu insecte xilofage, precum *Ips typographus* (Schroeder & Lindelöw, 2002). În Carpați, peste 28% din păduri sunt considerate vulnerabile la doborâturi (Săvulescu & Mihai, 2011; Furtună, 2020), o situație accentuată de înlocuirea pădurilor mixte cu monoculturi de molid în perioada comunistă (Munteanu et al., 2016). Analiza realizată pentru PNPV confirmă că riscul cel mai mare se concentrează în pădurile pure de molid, în special pe versanții expuși vânturilor vestice, unde vulnerabilitatea structurală se combină cu intensitatea maximă a curenților atmosferici.

3.1.4. Incendiile de vegetație

Incendiile de vegetație constituie o amenințare recurentă pentru ecosistemele forestiere, fiind amplificate de schimbările climatice și de frecvența tot mai mare a secetelor și valurilor de căldură (Drăgan & Munteanu, 2023). La nivel european, ele afectează cel mai grav statele mediteraneene, însă România și Bulgaria sunt, de asemenea, incluse printre țările expuse. Statisticile IGSU pentru perioada 2000–2020 indică peste 150.000 de intervenții, cu vârfuri în anii 2012 și 2019, ceea ce arată o tendință de creștere a fenomenului. În general, incendiile din România afectează suprafețe mai mici decât în alte regiuni europene, dar frecvența lor ridicată reprezintă o problemă ecologică și socială semnificativă.

În PNPV, riscul de incendiu este clasificat ca scăzut-mediu (Mallinis et al., 2019), datorită predominanței pădurilor de fag și conifere la altitudini relativ mari, cu temperaturi mai reduse și regim pluviometric mai favorabil comparativ cu zonele de câmpie sau deal. Totuși, analiza geospațială arată că vulnerabilitatea crește în perioadele de tranziție (primăvară, toamnă), când vegetația ierboasă și uscăciunea sezonieră pot furniza material combustibil. Factorii antropici, precum arderea miriștilor și a vegetației uscate, rămân principala cauză a izbucnirii incendiilor, în special în apropierea drumurilor forestiere și a zonelor de agrement.

Istoria pădurilor vrâncene confirmă că incendiile au lăsat urme semnificative asupra peisajului forestier. Un exemplu major este seceta severă din 1946–1947, care a favorizat incendii de amploare pe Valea Zăbala și Valea Năruja, cuprinzând suprafețe mari de arborete tinere sau terenuri defrișate (Bogdan et al., 2015). Hărțile sovietice din 1957 evidențiază aproximativ 445 ha de pădure arsă în această zonă, ilustrând consecințele evenimentelor extreme asupra structurii vegetației. Astfel, deși riscul actual este moderat, atât contextul climatic emergent, cât și vulnerabilitatea istorică a regiunii subliniază necesitatea unor măsuri preventive de management și a unei monitorizări continue în PNPV.

3.1.5. Stratul de zăpadă

Stratul de zăpadă are efecte ambivalente asupra vegetației forestiere, acționând atât ca factor protector, cât și ca perturbator. Pe de o parte, menține o temperatură constantă și un nivel ridicat de umiditate la sol, favorizând germinația și supraviețuirea puieților; pe de altă

parte, acumulările masive pot provoca ruperea ramurilor, aplecarea trunchiurilor tinere și chiar doborâturi în combinație cu vânturi puternice (Schelhaas et al., 2003). Astfel, rolul său ecologic depinde de grosime, densitate, durată și interacțiunea cu alți factori abiotici.

Analiza datelor meteorologice din perioada 2015–2024 (stația Lăcăuți) arată un regim nival specific zonelor montane înalte, cu un sezon de 7–8 luni, între octombrie și mai, uneori prelungit până în iunie. Cele mai multe zile cu ninsoare sunt înregistrate în decembrie–februarie, cu un maxim în ianuarie ($\approx 12,7$ zile). Variabilitatea interanuală este pronunțată: iernile 2020–2022 au avut activitate nivală intensă, cu episoade târzii de ninsoare, în timp ce iernile 2015, 2018 și 2023 au fost mai blânde. Aceste diferențe reflectă influența schimbărilor climatice și a oscilațiilor atmosferice regionale asupra regimului de precipitații solide.

În ceea ce privește grosimea stratului de zăpadă, intervalul decembrie–martie este cel mai reprezentativ, cu valori frecvente între 50–110 cm și maxime extreme ce au depășit 170 cm în 2021 și 2022. Aceste acumulări prelungesc sezonul rece și întârzie procesele biologice de primăvară, inclusiv regenerarea și începerea ciclului vegetativ. În schimb, anii 2020 și 2023 s-au caracterizat prin grosimi reduse (< 30 cm) și persistență scurtă, cu efecte asupra rezervei hidrologice și stabilității pădurilor. Această variabilitate confirmă că stratul de zăpadă constituie un factor critic pentru dinamica ecosistemelor montane, atât prin rolul său protector, cât și prin potențialul de perturbare structurală.

3.1.6. Clima

Climatul reprezintă unul dintre principalii factori ecologici care modelează distribuția, compoziția și dinamica vegetației forestiere din Parcul Natural Putna-Vrancea (PNPV). Analizele climatice pentru intervalul 1961–2013 arată o tendință clară de creștere a temperaturii medii anuale, în special după 1980, în acord cu scenariile globale (IPCC, 2021; Bojariu et al., 2021). Precipitațiile, deși nu indică o tendință clară, prezintă o variabilitate interanuală accentuată, alternând perioade cu exces hidric și secete severe (Spinoni et al., 2015). Aceste caracteristici sunt amplificate de inversiunile termice și de relieful fragmentat, care generează un mozaic microclimatic cu efecte directe asupra fenologiei și regenerării speciilor.

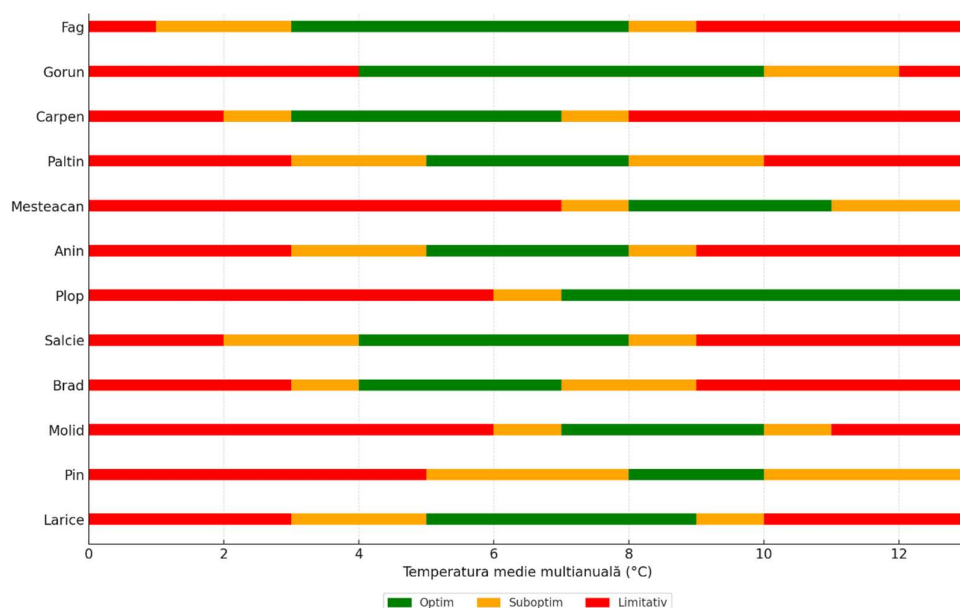


Fig 15. Intervalele termice ecologice pentru principalele specii forestiere din PNPV (după Stănescu et al., 1997)

Intervalele ecologice ale speciilor forestiere confirmă diferențieri clare de adaptabilitate termică și hidrică. Fagul (*Fagus sylvatica*) și gorunul (*Quercus petraea*), specii mezoterme, prezintă o plasticitate ecologică ridicată, în timp ce coniferele montane (*Abies alba*, *Picea abies*, *Larix decidua*) se dovedesc cele mai vulnerabile la scenariile de încălzire, având praguri optime sub 8 °C (Stănescu et al., 1997; Černý et al., 2024) (fig 15). Din perspectiva resurselor hidrice, speciile cu amplitudine ecologică largă, precum fagul și molidul, se încadrează în intervale optime de 700–1200 mm/an, în timp ce speciile xerofile (gorun, carpen, pin) sunt limitate de excesul pluviometric, iar cele higrofile (anin, salcie) devin vulnerabile la valori prea ridicate (>900 mm) (Fig 16). Această distribuție confirmă sensibilitatea pădurilor PNPV la modificările pluviometrice și riscul de restructurare floristică în condiții de stres climatic.

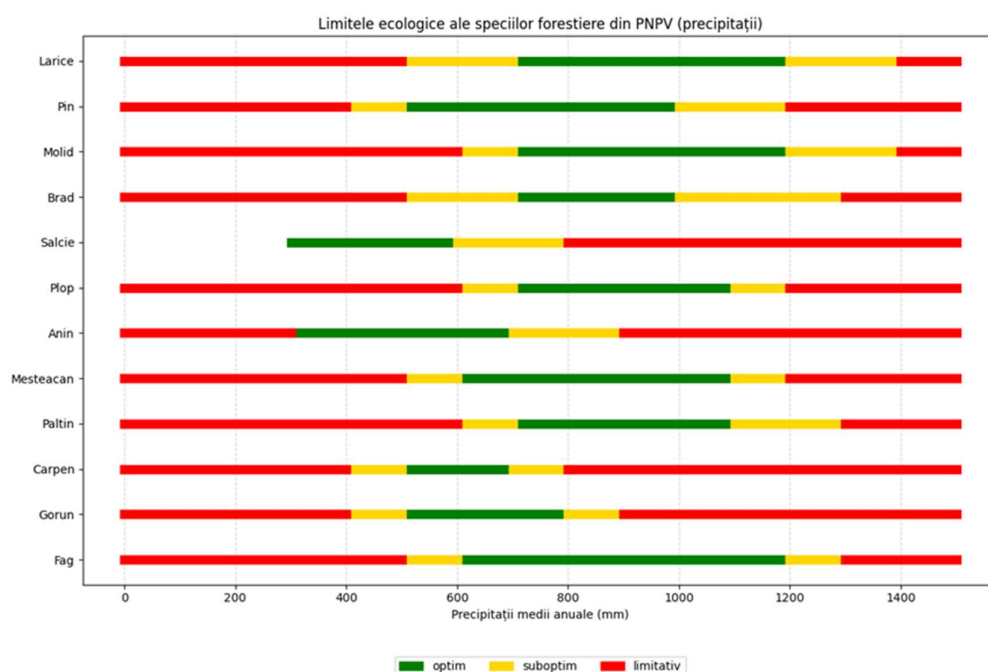


Fig 16. Intervalele hidrice ecologice pentru principalele specii forestiere din PNPV (după Stănescu et al., 1997)

3.1.7. Analiza variației termice a suprafețelor forestiere în funcție de specia dominantă

Datele satelitare MODIS pentru perioada 2000–2022 oferă o perspectivă suplimentară asupra dinamicii climatice prin analiza temperaturii suprafeței active (LST). În ianuarie, valorile negative persistă la altitudini mari, favorizând acumulări nival-pluviometrice, în timp ce în iulie se înregistrează diferențe pronunțate între zonele depresionare (>26 °C) și cele montane superioare (<21 °C). În aprilie și octombrie, regimul termic marchează tranzițiile sezoniere, cu efecte directe asupra debutului vegetației și a perioadei de repaus. Aceste date confirmă rolul factorilor topografici și al expoziției versanților în configurarea microclimatului forestier (Dumitrescu și Bîrsan, 2015).

Analiza LST pe unități amenajistice (UA) în funcție de specia dominantă (fig. 17) evidențiază capacitatea diferențiată a pădurilor de a modera microclimatul local. Arboretele de molid, brad și fag se comportă ca „amortizori termici”, menținând temperaturi scăzute vara și favorizând acumularea de frig iarna, în timp ce pădurile de pin, gorun sau anin înregistrează

amplitudini termice mai ridicate, asociate cu zone expuse și altitudini mai joase. Această relație bidirecțională, prin care compoziția forestieră influențează și este la rândul ei influențată de regimul termic, are implicații directe pentru strategiile de conservare și adaptare silvică în PNPV (Kramer et al., 2010; Dyderski et al., 2017).

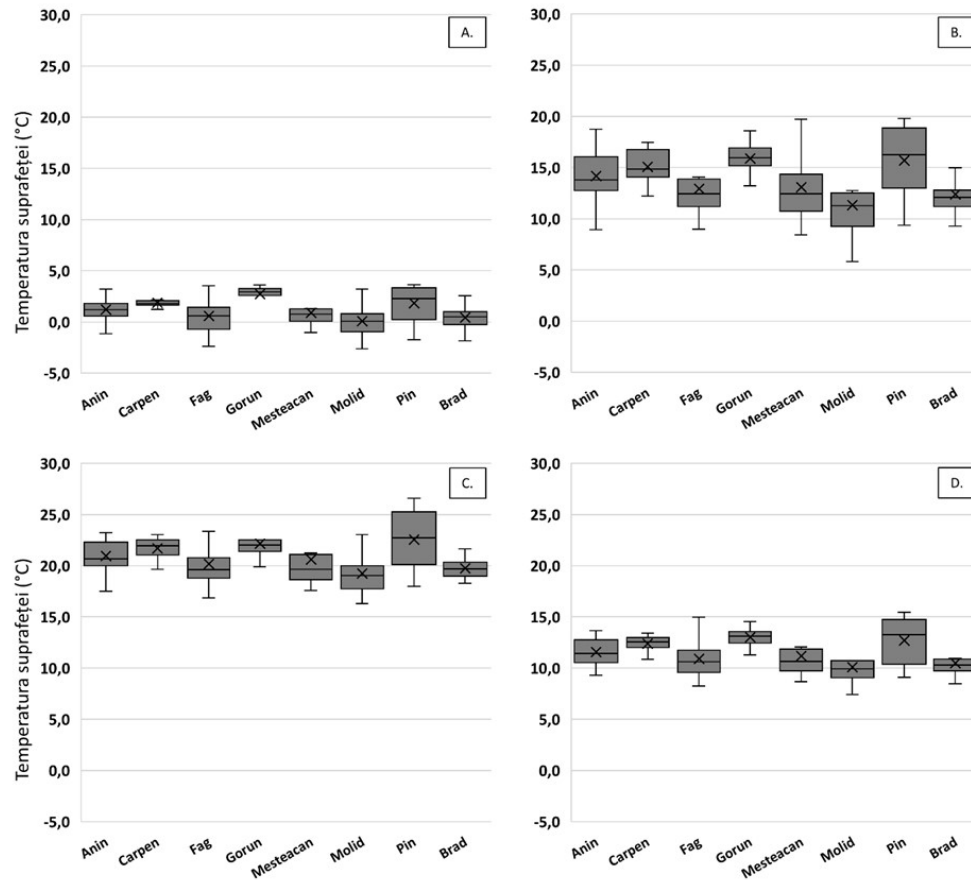


Figura 17. Variația temperaturii medii lunare multianuale (ianuarie - A, aprilie - B, iulie - C și octombrie - D) a suprafețelor de pădure în funcție de specia dominantă pentru UA-uri pe baza imaginilor satelitare MODIS

3.2 Factorii biotici

Ursul brun, prezent în efective semnificative în PNPV, produce vătămări arborilor prin zgâriere, exfolierea scoarței, mușcături sau chiar ruperea trunchiurilor. Aceste leziuni pot favoriza pătrunderea agenților patogeni, declanșând procese de putrezire sau uscarea arborilor tineri. Cu toate acestea, impactul este mai degrabă local și integrat în dinamica naturală a pădurii, fără a reprezenta o amenințare majoră pentru stabilitatea ecosistemelor, cu excepția situațiilor de suprapopulare (Zyśk-Gorczyńska et al., 2016). Cervidele (cerbul comun, căpriorul, capra neagră) afectează regenerarea forestieră prin consumul lujerilor, mugurilor și scoarței, mai ales iarna, și prin zdrelirea arborilor în perioada împerecherii sau curățării coarnelor. Coniferele tinere și fagul sunt cele mai vulnerabile. Leziunile astfel produse favorizează apariția putregaiului de trunchi și reduc rezistența arborilor la factori perturbatori, dar în PNPV efectele sunt moderate, fiind reglate de prădători naturali și de gestionarea cinegetică (Vlad, 2007).

Speciile din subfamilia Scolytinae constituie un factor biotic major de dezechilibru în pădurile europene, inclusiv în România. Printre acestea, *Scolytus multistriatus*, vector al grafiozei

ulmului, și *Xyleborinus saxesenii*, specie invazivă cu potențial global, afectează arborii slăbiți sau aflați sub stres hidric, reducând calitatea lemnului și accelerând declinul arborilor (Schedl, 1981; Webber, 2004; Hulcr & Stelinski, 2017). În pădurile montane, *Ips typographus* (gândacul tipograf al molidului) reprezintă cel mai agresiv dăunător, capabil să colonizeze rapid arbori aparent sănătoși, mai ales după furtuni sau secete, și să producă mortalitate în masă prin întreruperea fluxului de sevă și introducerea fungilor patogeni (Faccoli, 2009; Hlásny et al., 2019).

Factorii biotici exercită un impact diferențiat asupra pădurilor din PNPV, de la perturbări naturale punctuale (urs, cervide) până la riscuri cu efecte regionale și chiar continentale (gândacii de scoarță). În condițiile schimbărilor climatice și ale intensificării perturbărilor naturale, vulnerabilitatea arborilor la atacurile xilofagilor crește, mai ales în arboretele monospecifice de molid sau pin (Seidl et al., 2014). Monitorizarea populațiilor faunistice, reglarea densităților prin management adaptativ și utilizarea metodelor de control integrat (capcane feromonale, exploatarea preventivă a arborilor infestați) sunt esențiale pentru a menține reziliența pădurilor. În ansamblu, factorii biotici trebuie priviți nu doar ca agenți perturbatori, ci și ca părți integrante ale funcționării ecosistemelor forestiere, iar evaluarea lor corelată cu factorii abiotici oferă o imagine completă asupra stabilității pădurilor din PNPV.

5. Influența factorilor antropici asupra pădurii în ultimele două secole

Dezvoltarea socio-economică a Vrancei a avut un rol esențial în modelarea peisajului forestier al actualului PNPV. De la defrișările pentru pășuni și agricultură din secolul al XVIII-lea, până la exploatarea industriale moderne și reîmpăduririle masive din perioada comunistă, pădurile au trecut prin etape succesive de presiune și regenerare. Analiza diacronică pe baza hărților istorice și topografice (1789, 1895, 1957, 1975, 2017–2019) oferă o imagine de ansamblu asupra dinamicii spațiale a acoperirii forestiere și a influențelor antropice.

5.1. Exploatarea forestieră istorică și modernă

Este imposibil să studiem evoluția pădurilor din Parcul Natural Putna-Vrancea (PNPV) în ultimele două secole fără a lua în considerare caracteristicile sociale, economice și culturale ale regiunii Vrancea.

5.1.1 Suprafața împădurită la sfârșitul sec XVIII- 1789

În 1789, pădurea acoperea circa 88,6% din suprafața PNPV, fiind completată de pajiști (10,9%). Organizarea socială specifică „Țării Vrancei” – bazată pe proprietatea devălmașă – a favorizat exploatarea comună a resurselor. Primele defrișări vizibile au avut loc pentru obținerea pășunilor și fânețelor, dar pădurea rămânea dominantă (Fig18).

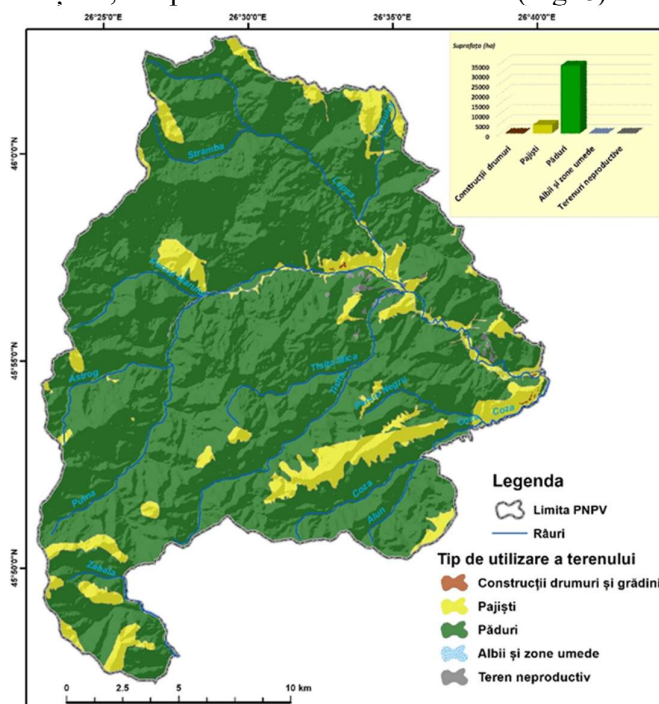


Figura 18. Categoriile de folosință a terenului în anul 1789 în limite actuale ale Parcului Natural Putna-Vrancea

4.1.2 Suprafața împădurită la sfârșitul sec XIX - 1895

Cartografierea detaliată relevă păduri pe 87% din teritoriu, cu pajiști extinse în jurul satelor Coza, Lepșa și Greșu. Presiunea demografică și contactul cu societățile forestiere străine au marcat începutul exploatărilor intensive. Construirea căilor ferate forestiere cu ecartament îngust a facilitat extragerea masivă a lemnului, în special din văile Tișitei, Putnei și Lepșei, iar gaterile hidraulice au devenit puncte centrale de procesare (Fig 19).

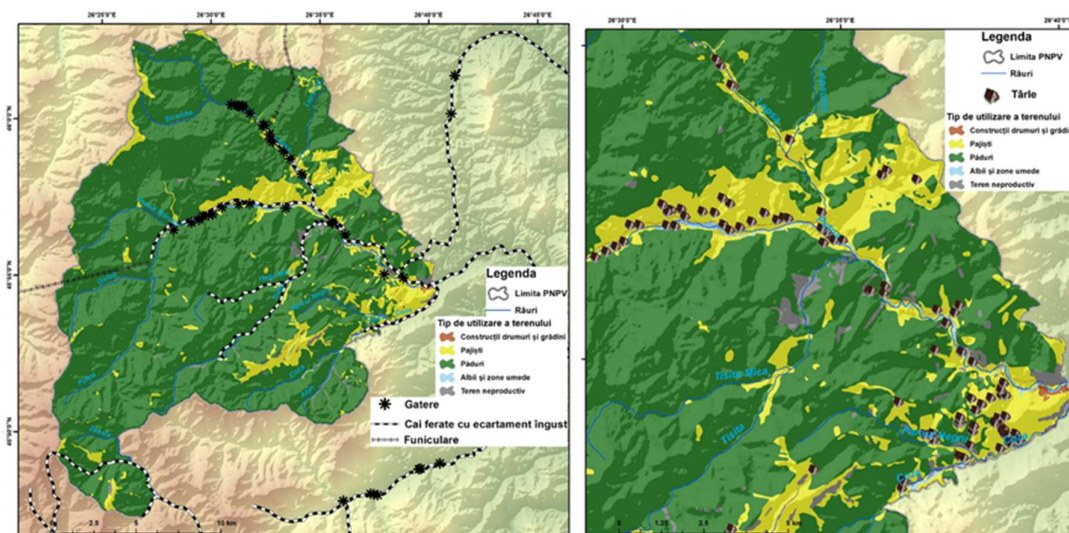


Figura 19. Infrastructura de căi ferate cu ecartament îngust și gaterile din limita actuală a PNPV și zona adiacentă (1903-1929) - în stânga; Zona cu locuințe temporare (târlă) de la 1895 - în dreapta

4.1.3 Suprafața împădurită în 1957

Harta sovietică indică o reducere a suprafeței împădurite la 84%, cu 12,2% pajiști și 2,8% areale despădurite. Corelarea acestora cu traseele feroviare evidențiază legătura directă dintre exploatare și degradare. Incendiile severe din anii 1946–1947, suprapuse defrișărilor, au accentuat pierderile forestiere, mai ales în bazinul Lepșa și masivul Goru. După naționalizarea din 1948, au început lucrări ample de reîmpădurire, inclusiv în terenuri cu condiții extreme, însumând circa 80.000 ha până în 1990 (Fig 20).

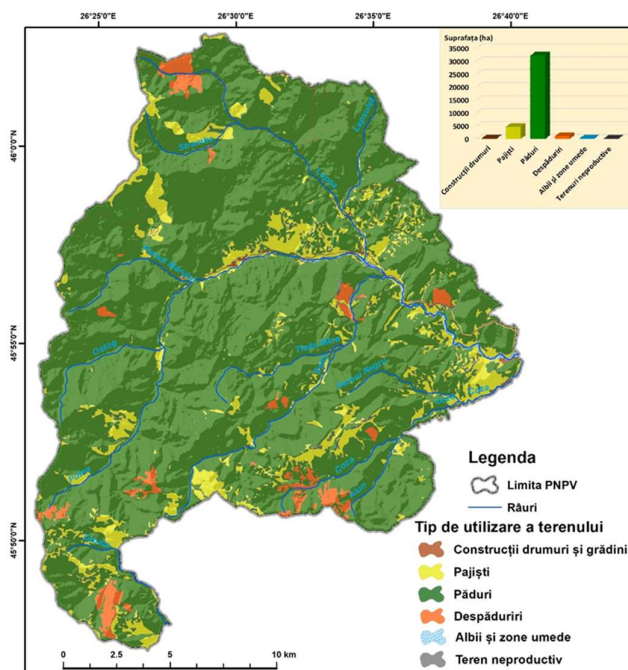


Figura 20. Categoriile de folosință a terenului în anul 1957

4.1.4 Suprafața împădurită în 1975

La 18 ani după cartografierea sovietică, pajiștile rezultate din despăduriri începuseră să fie recucerite de vegetația forestieră. Suprafața împădurită ajunsese la 88%, iar unele areale degradate au fost transformate în păduri tinere sau tufărișuri. Această etapă reflectă impactul reîmpăduririlor planificate din perioada comunistă.

4.1.5 Suprafața împădurită în perioada actuală (2017-2019)

Cele mai recente date indică o stabilizare a suprafeței forestiere (87,3% din PNPV), cu o reducere a pajiștilor (8,65%). Zonele de despădurire sunt restrânse, localizate mai ales în bazinul râului Putna și sunt în general legate de tăieri reglementate prin amenajamente silvice. În ansamblu, pădurea își păstrează rolul dominant, însă moștenirea istorică a exploatărilor și incendiilor continuă să influențeze structura actuală a ecosistemelor.

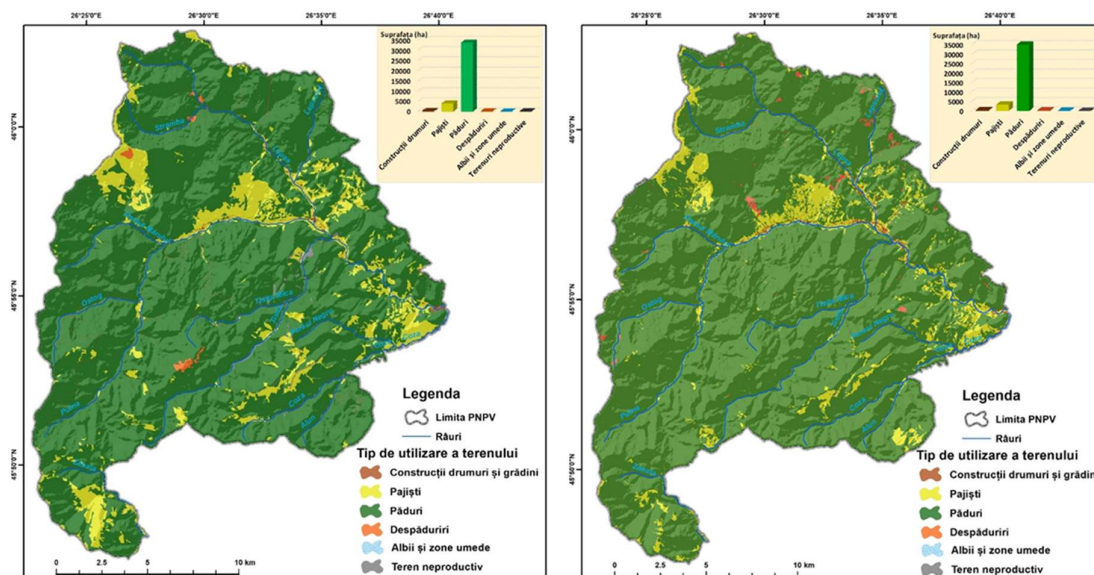


Figura 21. Categoriile de folosință a terenului în anul 1975 (stânga) și în intervalul 2017-2019 (dreapta)

5.2. Dinamica spațio-temporală a pădurilor

În toate cele cinci perioade analizate, suprafața împădurită a ocupat peste 84% din suprafața totală a PNPV, cu valoarea minimă în 1957 (84,1%) și maximă în 1789. Analiza diferențelor dintre suprafețele principale de utilizare a terenului pentru perioade consecutive a permis estimarea creșterilor și scăderilor în hectare (fig 22).

Între 1789 și 1895, suprafața pădurii a scăzut cu 650 ha, în special în favoarea terenurilor neproductive și a pajiștilor. În intervalul 1895–1957, scăderea pădurilor cu aproximativ 1100 ha a fost determinată în principal de creșterea zonelor despădurite, extinderea pajiștilor și a terenurilor puternic antropizate, ca efect al exploatării intense din perioada 1903–1929 și al creșterii populației. Reducerea terenurilor neproductive s-a datorat acțiunilor de împădurire ale versanților afectați de eroziune, în contextul managementului instituționalizat al fondului forestier după 1948 (Bogdan et al., 2015).

Între 1957 și 1975, se înregistrează cea mai substanțială creștere a suprafeței pădurilor, cu aproximativ 1500 ha, datorită reîmpăduririlor și regenerărilor naturale, care au redus concomitent suprafețele despădurite și ale pajiștilor. În perioada 1975–2018, suprafața împădurită a crescut cu 430 ha, iar cea despădurită cu 170 ha, majoritatea modificărilor fiind

determinate de extinderea naturală a vegetației arboricole și de acțiuni de împădurire pe foste pășuni și fânețe.

Din punct de vedere spațial, între 1789 și 1895, despăduririle au afectat versanții stângii văii Putnei și zona estică a bazinului inferior al Lepșei, în timp ce suprafețele împădurite s-au concentrat în bazinul pâraului Mărului și pe versanții sudici ai Masivului Coza. În intervalul 1895–1957, despăduririle au fost mai vizibile în partea sudică a PNPV (bazinele superioare ale Putnei, Zăbalei și Cozei) și în nord (bazinul superior al Lepșei), în timp ce împăduririle au fost documentate în apropierea satelor Tulnici și Coza, cu pin pe versanți afectați de eroziune (Costandache et al., 2016, 2019).

Perioada 1957–1975 a fost marcată de transformarea unor zone despădurite în pajiști în apropierea pasului Mușat, iar reîmpăduririle au fost vizibile în bazinul superior al Lepșei și în partea sudică a PNPV. Între 1975 și 2018, împăduririle s-au concentrat pe pășuni din Pasul Mușat și bazinul superior al Zăbalei, majoritatea prin extindere naturală a vegetației arboricole, în timp ce despăduririle au fost în bazinele superioare ale Tișței și Alunului.

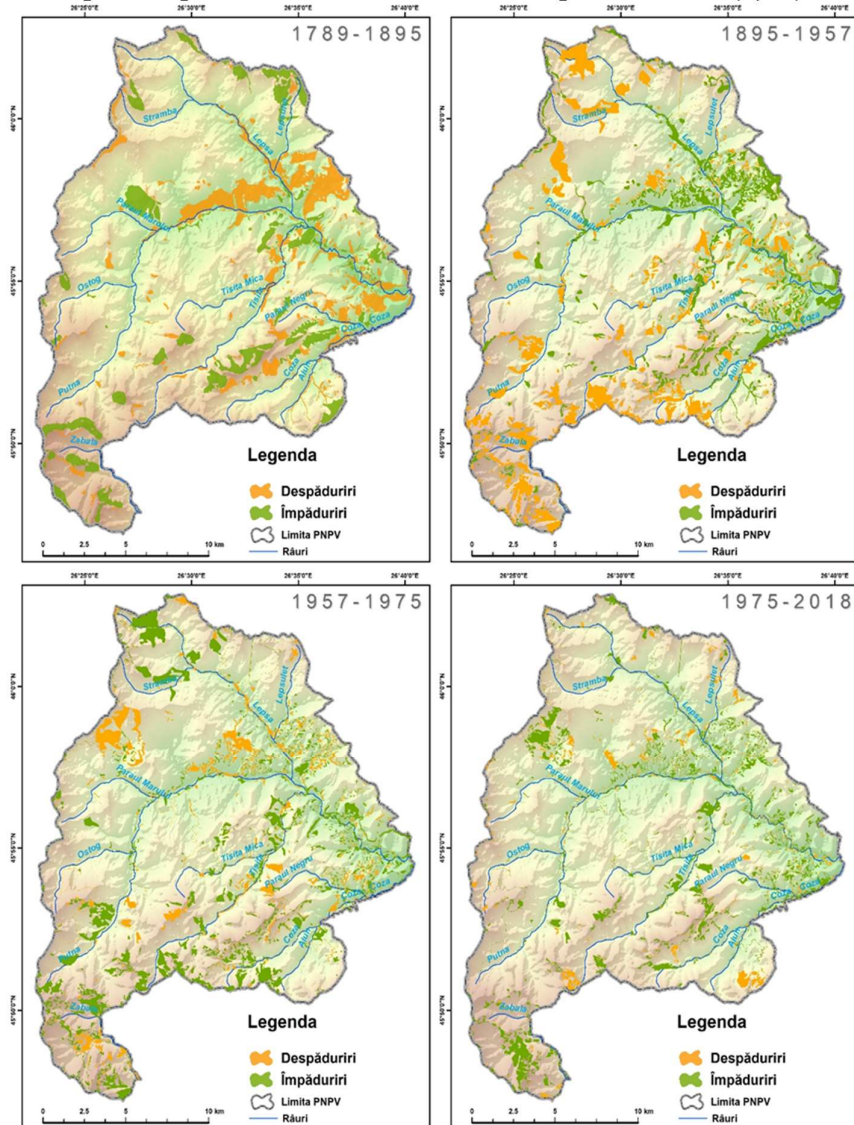


Figura 22. Evoluția spațială a zonelor împădurite și despădurite în intervalele de timp dintre două perioade consecutive analizate

5.3. Influența antropică asupra caracteristicilor actuale ale pădurii din PNPV

Analiza integrată a informațiilor istorice, silvice și de infrastructură relevă impactul factorilor antropici asupra pădurilor din PNPV. Compararea suprafeței împădurite în 1886 (Atlasul Moldovei, 1877–1886) cu distribuția actuală a pădurilor seculare (arbori cu vârsta >120 ani) arată că zonele inaccesibile sau mai puțin afectate de exploatare au păstrat continuitatea forestieră, sugerând o conservare fragmentară a ecosistemelor vechi.

Rețeaua de căi ferate forestiere, construită între 1907 și 1930 pentru exploatare concesiionată de companii externe (Turnock, 1990, 1991, 2001; Iliescu, 2002, 2011), a facilitat exploatarea intensă, iar arborii vârstnici sunt mai puțin prezenți în proximitatea acestor infrastructuri. În zone fără aceste căi ferate, precum masivele Zboina, Macrădeu și Lăcăuți, pădurile seculare s-au păstrat, ceea ce confirmă că inaccesibilitatea a acționat ca factor de protecție pasivă (Veen et al., 2010; Turnock, 1991).

Suprapunerea pădurilor actuale cu cele din 1886 arată continuitate ecologică în zonele centrale și nordice ale PNPV, unde fagul bătrân (>120 ani) predomină. Aceasta indică stabilitate ecologică și conservare a biodiversității și a proceselor ecosistemice de lungă durată (Peterken, 1996; Wulf, 2003). În același timp, parcelele de fag bătrân apărute în afara pădurilor istorice sugerează regenerări naturale ulterioare pe terenuri abandonate (Brunet et al., 2010).

Bradul bătrân prezintă o distribuție concentrată în zonele centrale și sudice, în masivele Tisaru Mare, Mociaru și Lăcăuți, unde condițiile ecologice sunt favorabile și intervențiile antropice au fost reduse (Feurdean et al., 2011; Ellenberg, 2009) (fig 23 a). Aceasta confirmă că bradul este un indicator al pădurilor seminaturale și poate fi folosit ca specie-umbrelă pentru conservare (Stancioiu și O'Hara, 2006; Barbu și Barbu, 2005).

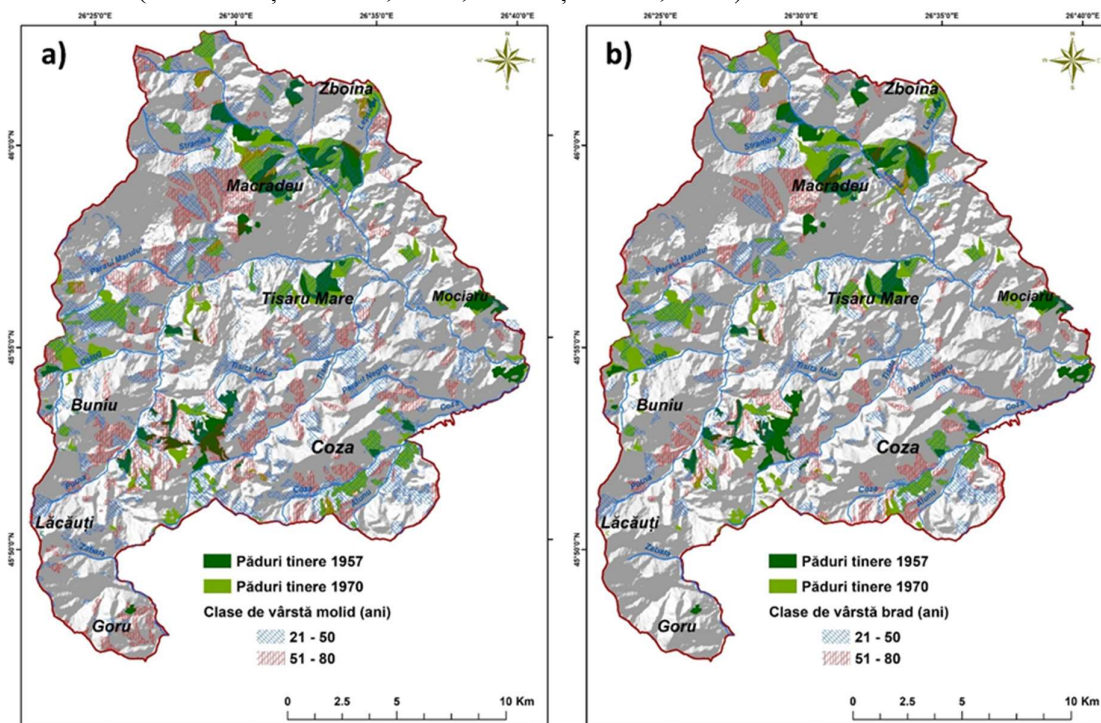


Figura 23. a) Suprapunerea pădurilor tinere identificate în hărțile topografice din 1957 și 1970 cu distribuția actuală a molidului și bradului (b) în clase de vârstă (2014) în Parcul Natural Putna-Vrancea

Molidul bătrân se regăsește în special în zonele sudice și sud-vestice ale parcului (Lăcăuți, Goru, Coza, bazinul superior al Lepșei), indicând preferință pentru altitudini mari,

climă umedă și versanți umbriți (Saniga et al., 2013; Ellenberg, 2009). În zonele estice, absența molidului bătrân sugerează impactul exploatărilor intensive și al conversiei forestiere. Suprapunerea pădurilor tinere din 1957–1970 cu molidul actual arată că multe păduri de molid au rezultat din reîmpăduriri postbelice, favorizate de politici silvice comuniste, în detrimentul bradului (fig 23 b) (Drăghiciu, 1998; Costandache et al., 2018; Barbu și Barbu, 1993; Nicolescu et al., 2003).

În concluzie, reîmpăduririle cu molid din perioada 1950–1970 au extins arealul acestei specii în detrimentul bradului, artificializând pădurile și modificând compoziția ecosistemelor. Aceasta are implicații ecologice importante, deoarece molidul, fiind mai puțin tolerant la secetă, poate deveni vulnerabil la schimbările climatice și la perturbări biologice în zonele montane inferioare (Nadezhdina et al., 2006; Popa et al., 2024; Falk și Hempelmann, 2013).

6. Estimarea favorabilității pentru principalele specii lemnoase din PNPV

6.1. Factorilor ecologici ce influențează dispunerea speciilor din fisa ecologică

Distribuția speciilor forestiere din Parcul Natural Putna-Vrancea este determinată de interacțiunea complexă dintre factorii ecologici abiotici, care influențează atât compoziția floristică, cât și structura ecosistemelor. Estimarea favorabilității ecologice a principalelor specii forestiere s-a realizat printr-o abordare integrată, folosind tehnologii GIS și rastere tematice pentru a modela distribuția potențială a speciilor în funcție de cerințele lor ecologice (Stănescu et al., 1997; Barbu și Barbu, 2005).

Factorii climatici incluși au fost temperatura medie multianuală, precipitațiile medii anuale și lungimea perioadei bioactive. Perioada bioactivă a fost determinată pe baza temperaturii medii lunare, folosind baza de date Rocada și metoda kriging-ului rezidual pentru a obține o rezoluție de 30 m. Rasterele lunare au fost reclasificate pentru a identifica lunile în care temperatura depășea pragul minim pentru activitatea fiziologică a fiecărei specii, generând o clasificare climatică în trei categorii: optimă, suboptimă și limitativă.

Lumina a fost evaluată prin produsul „Area Solar Radiation” derivat din Modelul Numeric al Terenului JAXA/METI ALOS PALSAR, transformând radiația solară în procente de lumină disponibilă. Valorile au fost normalizate și reclasificate conform fișelor ecologice în clase optime, suboptime și limitative.

Altitudinea și expoziția versanților au fost integrate în analiza favorabilității, folosind MNT și TPI (Topographic Position Index) pentru a identifica zonele favorabile, suboptime sau limitative. Rasterele pentru altitudine și orientarea versanților au fost combinate cu TPI pentru a obține rasterul final de favorabilitate ecologică pe baza regulilor algoritmice specifice.

Factorii pedologici au inclus gradul de saturație în baze, aciditatea solului, tipul și profunzimea humusului, compactitatea și textura solului. Datele au fost preluate din SIGSTAR-200, „Harta solurilor României” și literatură specializată (Florea et al., 1963–1994; Blaga et al., 2005; Secu și Rusu, 2008; Stănescu et al., 1997) și au fost reclasificate în trei clase ecologice (optim, suboptim, limitativ).

Pentru fiecare factor ecologic s-a calculat **Indicele de Importanță Ecologică (IVI)**, adaptat astfel:

$$IVI_i = \frac{(P_{optim} + P_{suboptim})}{2} - P_{limitativ},$$

Unde:

P_{optim} este procentul ocupat de brad în calasa optimă

$P_{suboptim}$ este procentul ocupat de brad în calasa suboptimă

$P_{limitativ}$ este procentul ocupat de brad în calasa limitativă

Un IVI ridicat indică faptul că factorul respectiv este predominant optim sau suboptim pentru specie, ceea ce înseamnă că specia are condiții favorabile de dezvoltare. În schimb, un IVI scăzut sugerează că factorul analizat are o influență limitativă asupra prezenței speciei, ceea ce poate indica zone mai puțin favorabile pentru regenerare și creștere.

Lucrări anterioare au demonstrat utilitatea IVI în analiza distribuției și favorabilității habitatelor pentru diferite specii forestiere (Curtis & McIntosh, 1951; Kent, 2011, Tolangara et al. 2019, Mishra et al., 2013). Astfel, această metodologie se aliniază cu abordările consacrate din domeniul ecologiei forestiere și poate constitui o bază solidă pentru luarea deciziilor privind conservarea și managementul durabil al ecosistemelor forestiere.

Ponderarea Factorilor Ecologici

Fiecare factor ecologic primește o pondere bazată pe valoarea sa IVI relativă. Ponderea unui factor este dată de:

$$p_i = \frac{IVI_i}{\sum IVI}$$

Calculul Hărții de Favorabilitate

Se utilizează **GIS Raster Calculator** pentru a combina ponderile factorilor ecologici astfel:

$$Favorabilitatea = \sum Raster_i \times p_i$$

Unde: $Raster_i$ este rasterul reclasificat al fiecărui factor, iar p_i este ponderea acestuia.

Clasificările ecologice și ponderarea factorilor permit estimarea distribuției favorabile pentru specii precum brad, molid, fag și alte esențe din PNPV, oferind un instrument esențial pentru planificarea managementului durabil al pădurilor și conservarea habitatelor naturale. Datele de altitudine și temperatură medie anuală au fost utilizate pentru definirea zonelor optime, suboptime și limitative pentru fiecare specie, conform tabelor ecologice de referință (Stănescu et al., 1997).

6.2. Estimarea Favorabilității pentru principalele specii lemnoase din PNPV

6.2.1. *Fagul (Fagus silvatica)*

Fagul este o specie caracteristică pădurilor montane și colinare din zona temperată răcoroasă, cu cerințe ecologice bine definite. Temperatura medie multianuală optimă pentru dezvoltarea sa se situează între 5 și 9°C, asigurând procese fiziologice esențiale, cum ar fi fotosinteza și activitatea radiculară. Valorile sub 5°C sau peste 10°C afectează regenerarea și vitalitatea, iar expunerea la stres termic crește riscul de uscări, mai ales în perioadele secetoase.

Regimul pluviometric optim este între 600 și 1200 mm anual. Precipitațiile sub 600 mm limitează creșterea, iar cele peste 1300 mm cresc riscul de asfixie radiculară și instabilitate mecanică pe pante abrupte. Sezonul de vegetație necesită cel puțin 4–7 luni active; perioadele mai scurte sau excesiv de lungi dezechilibrează ciclul biologic.

Fagul prezintă o preferință sciiofilă în stadiile juvenile și mezofotofilă la maturitate. Iluminarea directă între 25–80% este optimă, iar valorile extreme (<15% sau >80%) sunt limitative. Altitudinal, specia se dezvoltă în general între 500 și 1200 m, corespunzător zonelor montane inferioare și colinare.

Microrelieful și clima versanților influențează distribuția locală: expozițiile umbrite și semiumbrite (nordice și estice) sunt favorabile, în timp ce versanții sudici și depresiunile cu aer rece („găuri de ger”) sunt nefavorabile.

Din punct de vedere edafic, fagul preferă:

- Soluri bine bazificate (>35% saturație în baze), pH 5,2–7, tip Mull eutrofic, adânci (>50 cm), afânate și cu textura luto-nisipoasă până la luto-argiloasă.
- Solurile cu aciditate excesivă (<4,6) sau alcalinitate ridicată (>7,2), compacte sau cu humus limitativ sunt considerate nefavorabile.

Analiza arată că factorii climatici și altitudinali sunt preponderent optimi, iar factorii edafici prezintă mai multe zone suboptime (gradul de bazicitate, aciditatea, tipul de humus), ceea ce indică un potențial limitat în unele areale.

Harta favorabilității indică zonele cele mai potrivite în sectorul central-estic al parcului, de-a lungul văilor principale (Putna, Tișța, Lepșa), la altitudini de 600–1100 m. Zonele cu favorabilitate redusă apar la altitudini mai mari (>1400 m) sau pe versanți sudici și

abrupți. Suprapunerea cu parcelele silvice reale arată o bună concordanță între zonele de favorabilitate foarte bună și prezența efectivă a fagului (fig 24).

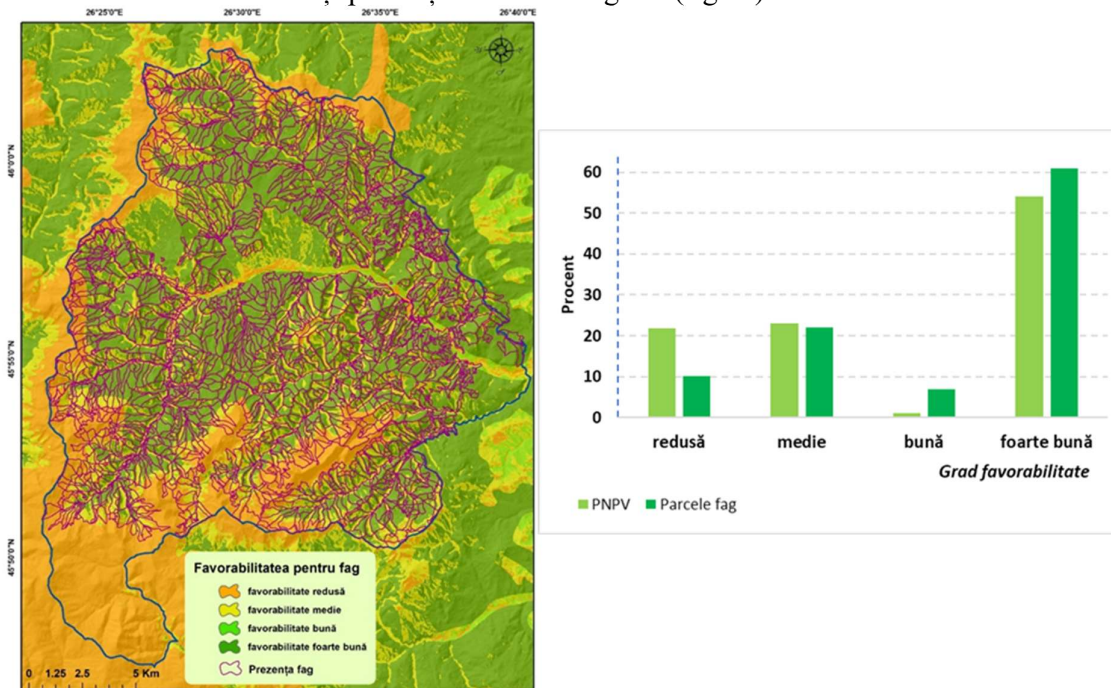


Figura 24. Favorabilitatea pentru brad în PNPV (clase realizate prin metoda Cuartilelor) și marcarea parcelelor silvice în care specia este prezentă (stânga) și distribuția claselor de favorabilitate ecologică din totalul PNPV și din suprafețele în care este prezentă specia (dreapta)

Incongruențele locale (prezență în zone modelate ca suboptimale) pot reflecta intervenții silvice istorice sau limitări ale modelului de favorabilitate. Zonele de favorabilitate ridicată neocupate pot reprezenta potențial pentru reconstrucție ecologică sau migrare asistată.

Graficul comparativ confirmă o corelație strânsă între optimul ecologic și distribuția reală a speciei, cu un procent semnificativ mai mare de fag în clasele „foarte bună” și „bună” față de întreaga suprafață a parcului. Aceasta evidențiază specializarea și adaptarea fagului la nișele ecologice cele mai favorabile, în timp ce zonele suboptimale sunt subreprezentate în distribuția efectivă (fig 24).

6.2.2. Bradul

Bradul (*Abies alba*) este o specie mezotermofilă, caracteristică pădurilor montane umede și răcoroase, cu cerințe ecologice relativ stricte. Din punct de vedere termic, dezvoltarea sa este optimă la temperaturi medii anuale cuprinse între 5 și 8°C. Temperaturile sub 3°C sau peste 10°C limitează metabolismul și capacitatea de regenerare, iar valorile ridicate în timpul sezonului vegetativ pot provoca stres termic și scăderea competitivității în fața speciilor termofile. Regimul de precipitații reprezintă un factor critic pentru brad, intervalul optim fiind între 700 și 1000 mm anual. Precipitațiile sub 500 mm generează stres hidric sever, în timp ce cantitățile excesive peste 1300 mm pot duce la acumularea apei în sol și favorizarea bolilor radiculare.

Durata perioadei bioactive optimă pentru brad este de 4–7 luni, reflectând adaptarea sa la condițiile montane, unde sezonul vegetativ este mai scurt. O perioadă mai scurtă limitează fotosinteza și acumularea de biomasă, iar una excesiv de lungă poate predispune specia la stres termic și apariția dăunătorilor. În ceea ce privește cerințele de lumină, bradul

este o specie de semiumbră, tolerând între 20 și 80% lumină directă. Această toleranță îl face competitiv sub coronamentul altor specii, însă zonele complet deschise, cu intensitate a luminii mai mare de 90%, sunt nefavorabile, putând genera arsuri și deshidratare.

Altitudinea optimă pentru brad se situează între 600 și 1000 m, corespunzând etajului montan inferior și mijlociu. La altitudini mai joase este înlocuit de gorun, iar peste 1300 m devine limitativ datorită temperaturilor scăzute și scurtării sezonului vegetativ. Expoziția versanților influențează microclimatul local, bradul preferând versanți semiumbriți sau umbriți, unde temperatura și umiditatea sunt moderate. Versanții însoriți sau zonele de depresionare în care se acumulează aer rece sunt nefavorabile, putând provoca stres termic sau înghețuri târzii.

Solurile ideale pentru brad sunt adânci, bine dezvoltate, afânate și cu textură lutoasă sau luto-argiloasă, asigurând stabilitate mecanică, reținere a apei și dezvoltare corespunzătoare a rădăcinilor. Gradul de saturație în baze optim este între 45 și 95%, iar pH-ul solului între 5,6 și 7, valori care permit absorbția eficientă a nutrienților. Bradul preferă humusul bine descompus, de tip mull eutrofic sau moder activ, care indică o activitate biologică intensă și mineralizare eficientă. Solurile compacte, superficiale, foarte acide sau hidromorfe limitează dezvoltarea speciei.

Analiza ecologică în Parcul Natural Putna-Vrancea arată că bradul se găsește preponderent în zonele montane centrale și nordice, cu altitudini cuprinse între 800 și 1300 m, versanți nordici sau umbriți și apropiere de cursuri de apă, condiții care mențin un microclimat umed și stabil. Zonele cu favorabilitate „bună” și „foarte bună” sunt ocupate de cele mai dense păduri de brad, iar clasele „medie” și „redușă” corespund limitelor ecologice inferioare sau zonelor de tranziție spre pădurile de fag sau amestecuri. Suprapunerea cu parcelele reale arată o corespondență bună între habitatele favorabile și prezența bradului, deși în anumite zone suboptime, specia poate supraviețui datorită microhabitatelor favorabile sau intervențiilor silvice (Fig 25).

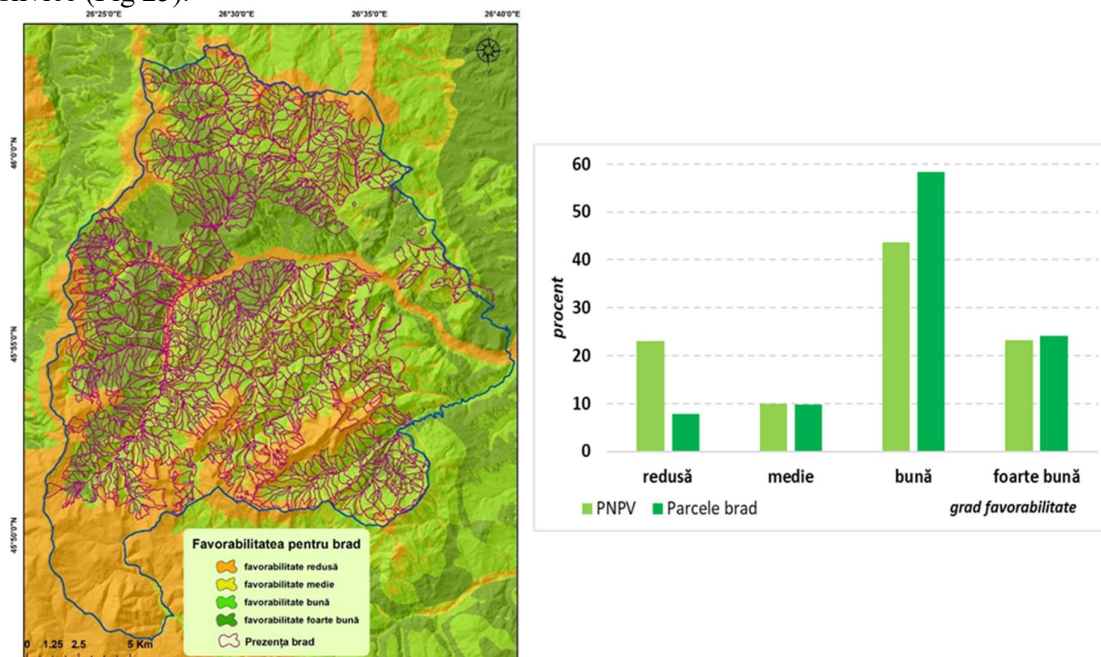


Figura 25. Favorabilitatea pentru brad în PNPV (clase realizate prin metoda Cuartilelor) și marcarea parcelelor silvice în care specia este prezentă (stânga) și distribuția claselor de favorabilitate ecologică din totalul PNPV și din suprafețele în care este prezentă specia (dreapta)

În concluzie, *Abies alba* este bine adaptat la condițiile montane ale PNPV, fiind o specie mezofilă și sciadă, cu cerințe stricte de temperatură, umiditate și tip de humus. Distribuția sa reflectă preferința pentru versanții umbriți și solurile adânci, bogate în humus, iar zonele cele mai favorabile corespund pădurilor naturale de conifere din partea centrală și nordică a parcului. Această specie este relativ sensibilă la schimbările climatice și la condițiile de sol mai puțin favorabile, ceea ce limitează colonizarea zonelor marginale sau mai expuse.

6.2.3. Molidul

Molidul (*Picea abies*) este o specie răcoros-montană, adaptată la climatul boreal și montan, cu temperatura medie multianuală optimă pentru dezvoltare între 3 și 7°C. Temperaturile sub 2°C sau peste 8°C devin limitative, ceea ce explică preferința sa pentru etajul montan superior. Specia necesită precipitații medii anuale între 700 și 1200 mm, interval în care se asigură o umiditate suficientă pentru creștere și regenerare. Deși poate tolera valori între 600 și 1400 mm în regim suboptim, scăderea sub 600 mm sau depășirea a 1400 mm afectează negativ stabilitatea și regenerarea arborilor, iar excesul de umiditate poate favoriza boli de rădăcină. Perioada bioactivă optimă este relativ scurtă, de 3–6 luni, reflectând adaptarea la sezonul scurt de vegetație din zonele montane. Molidul este o specie de semiumbră, preferând 40–75% din lumina directă; lumina excesivă (>95%) sau umbra profundă (<20%) devin limitative, mai ales pentru regenerarea tinerelor puieți.

Altitudinea optimă pentru molid se situează între 700 și 1300 m, cu limitări sub 500 m, din cauza temperaturilor ridicate, și peste 1600 m, din cauza condițiilor climatice extreme și scurtării sezonului vegetativ. Specia preferă versanți umbriți sau semiumbriți și depresiuni cu umiditate ridicată și protecție față de insolația directă; expunerile însoțite, abrupte sau cu soluri superficiale sunt nefavorabile. Solurile ideale sunt profunde (50–140 cm), afânate sau moderat compacte, cu textură lutoisipoasă, lutoasă sau luto-argiloasă, ușor acide, cu pH 4,8–6,6, și cu humus moderat activ, mull eutrofic sau humus brut activ. Compactitatea excesivă, solurile superficiale sau foarte acide ori neutre limitează dezvoltarea rădăcinilor și stabilitatea arborilor.

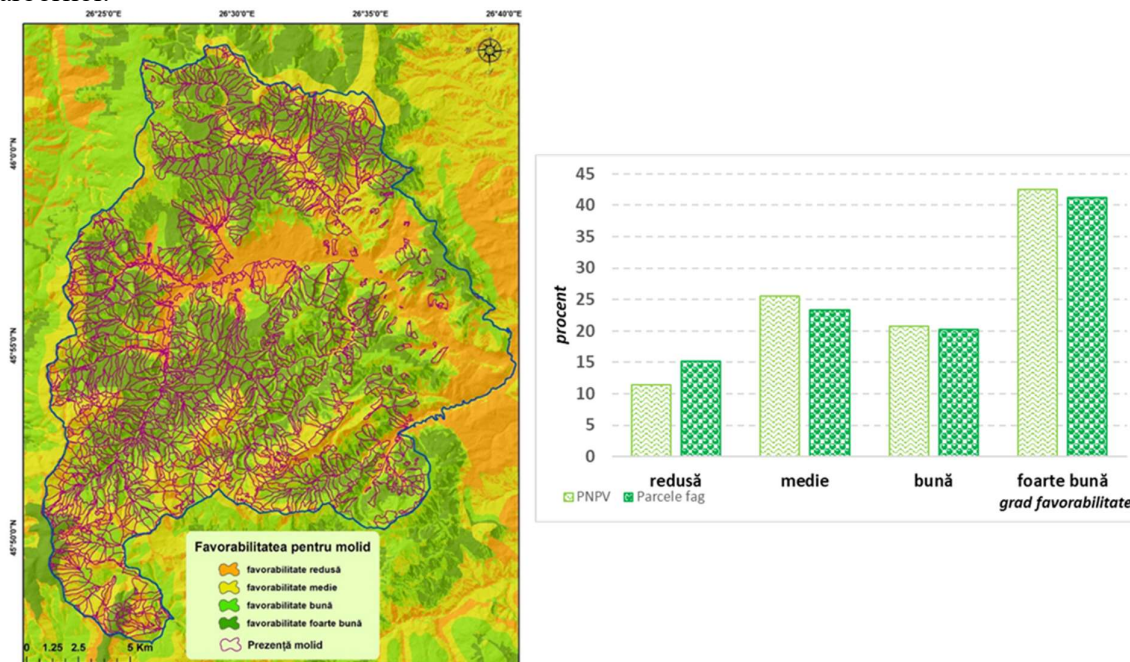


Figura 26. Favorabilitatea pentru molid în PNPV (clase realizate prin metoda Cuartilelor) și marcarea parcelor silvice în care specia este prezentă (stânga) și distribuția claselor de favorabilitate ecologică din totalul PNPV și din suprafețele în care este prezentă specia (dreapta)

Evaluarea ecologică în Parcul Natural Putna-Vrancea arată că temperatura medie multianuală și precipitațiile oferă condiții optime pe majoritatea suprafeței, susținând dezvoltarea molidului. Lungimea perioadei bioactive este favorabilă în mare parte, iar adaptabilitatea la umbră permite supraviețuirea în zone semiînsorite. Altitudinea și gradul de saturație în baze sunt moderat restrictive, iar aciditatea solului poate fi limitativă în anumite zone. Profunzimea, compactitatea și textura solului oferă condiții excelente pentru stabilitatea și creșterea molidului. Favorabilitatea ecologică foarte bună se concentrează în partea central-nordică și sud-estică a PNPV, corespunzând versanților umbriți și altitudinilor optime, în timp ce zonele marginale sau cu favorabilitate redusă includ depresiuni cu aluviosoluri, perioade bioactive mai lungi sau altitudini mai mari, unde regenerarea și productivitatea molidului sunt limitate.

Distribuția actuală a molidului corespunde în mare parte modelului de favorabilitate ecologică, cu prezență predominantă în zonele „bună” și „foarte bună”, dar și prezențe punctuale în zone suboptimale, explicabile prin plantări silvice sau capacitate adaptativă locală (Fig 26). Aceasta confirmă faptul că molidul este o specie adaptată la climatul răcoros, cu soluri ușor acide și umiditate moderată, dar sensibilă la secetă, temperaturi ridicate și schimbări ale duratei perioadei vegetative, aspecte ce pot influența viabilitatea pe termen lung în contextul schimbărilor climatice.

6.2.4. Gorunul

Gorunul (*Quercus petraea*) este o specie termofilă și mezofilă, caracteristică zonelor colinare și submontane, adaptată la climat temperat-moderat. Temperatura medie multianuală optimă pentru dezvoltarea sa se situează între 8 și 10°C, susținând creșterea în diametru și acumularea de biomasă, iar regimul pluviometric optim este între 500 și 800 mm anual, evidențiind toleranța speciei la condiții moderat uscate. Sistemul său radicular profund și extensiv permite gorunului să facă față secetelor și să concureze eficient în habitate cu resurse limitate de apă. Din punct de vedere edafic, specia preferă soluri ușor acide până la neutre (pH 5–6,8), cu grad de saturație în baze între 35–90%, bine aprovizionate cu nutrienți esențiali, profunde (>60 cm), afânate sau moderat compacte și cu textură lutoasă, nisipo-lutoasă sau luto-argiloasă. Lumina este un factor esențial, gorunul fiind heliofil, cu optimum între 60–95% din lumina directă, ceea ce îl face frecvent în pădurile tinere sau în deschiderile de coronament. Altitudinea optimă variază între 300 și 1000 m, cu expuneri însorite sau semiînsorite, în timp ce zonele umbrite, depresionare sau cu inversiuni termice îi sunt nefavorabile.

Analiza ecologică a Parcului Natural Putna-Vrancea arată că majoritatea factorilor ecologici (precipitații, perioada bioactivă, luminozitate, aciditate, textura și compactitatea solului) se încadrează în intervalul optim, susținând dezvoltarea gorunului, iar valorile IVI asociate pentru acești factori ating maximul, semnalând condiții foarte favorabile. Chiar dacă temperatura medie multianuală optimă acoperă doar o mică parte din teritoriu, aportul pozitiv al celorlalți factori echilibrează acest aspect, menținând un habitat favorabil. Majoritatea parcelelor cu prezență confirmată a gorunului se regăsesc în zonele cu favorabilitate „bună” și „foarte bună”, confirmând corelația între cerințele ecologice ale speciei și condițiile reale ale habitatului (fig 27). Clasele de favorabilitate „medie” sau „redusă” sunt puțin reprezentate în arealele ocupate de gorun, ceea ce arată evitarea stațiunilor limitative și preferința pentru habitatele optime în ceea ce privește lumină, temperatură, sol și drenaj. Această distribuție evidențiază adaptabilitatea gorunului la condiții variate, dar și selectivitatea sa față de factorii ecologici principali, validând modelul de favorabilitate ecologică aplicat în PNPV și corespunzând datelor din literatura de specialitate.

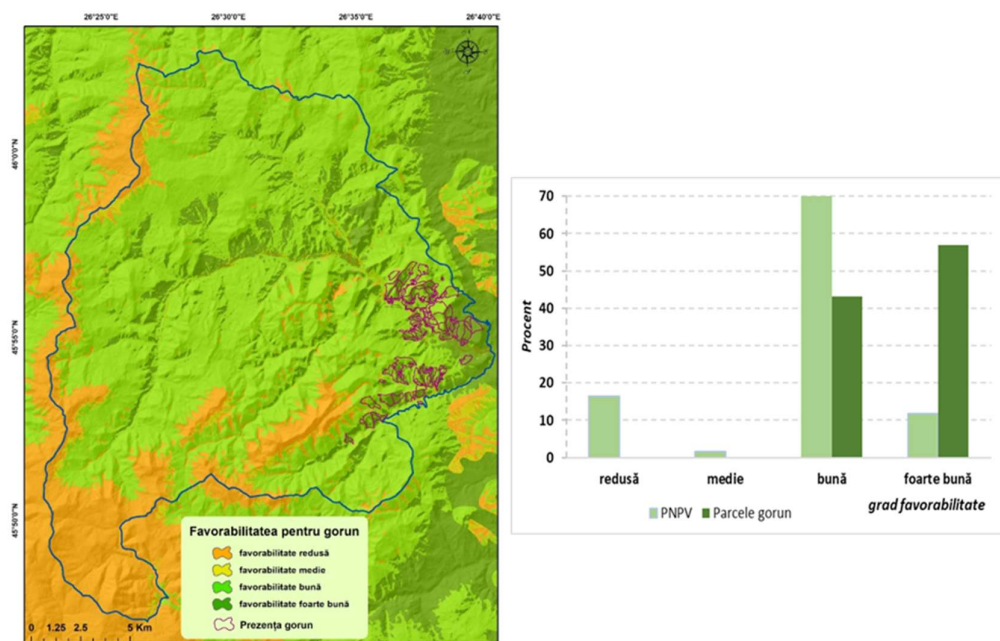


Figura 27. Favorabilitatea pentru gorun în PNPV (clase realizate prin metoda Cuartilelor) și marcarea parcelor silvice în care specia este prezentă (stânga) și distribuția claselor de favorabilitate ecologică din totalul PNPV și din suprafețele în care este prezentă specia (dreapta)

6.2.5. Aninul

Aninul (*Alnus glutinosa* și *Alnus incana*) este o specie strict higrofilă, adaptată la habitate cu umiditate ridicată, soluri hidromorfe și compactate, slab oxigenate, fiind frecvent întâlnit în depresiunile și zonele joase cu apă stagnantă sau accesibilitate freatică. Intervalul optim de temperatură pentru dezvoltarea sa este $>7^{\circ}\text{C}$, iar altitudinile favorabile sunt $<600\text{ m}$, indicând o preferință pentru regiuni cu climat blând și resurse hidrice constante. Solurile ideale sunt adânci, cu reacție slab acidă (pH 6,4–7), cu grad ridicat de saturație în baze (55–90%) și textură argiloasă sau luto-argiloasă, care reține bine apa, în timp ce solurile ușoare sau nisipoase limitează dezvoltarea speciei. Lumina joacă un rol crucial, aninul fiind heliofil (60–95% din lumina directă), ceea ce îl face frecvent ca specie pionieră sau de margine, rar competitiv în pădurile mature închise. Excesul de umbră sau stagnarea apei în cantitate mare constituie factori limitativi, la fel ca altitudinile ridicate și solurile acide sau necorespunzătoare ca tip de humus.

Harta favorabilității ecologice indică o preponderență a zonelor cu favorabilitate medie și redusă în regiunile sudice și sud-vestice ale parcului, în timp ce zonele cu favorabilitate bună și foarte bună, corespunzătoare habitatelor joase, depresionare și umede, sunt distribuite discontinuu, dar se suprapun în mare parte cu parcelele reale ocupate de anin (Fig 28). Distribuția efectivă confirmă că aninul colonizează selectiv habitatele optime, evitând zonele marginale, iar prezența sa ridicată în zonele de favorabilitate bună și foarte bună validează metodologia de evaluare ecologică utilizată. În concluzie, aninul este o specie indicatoare a ecosistemelor umede și fertile, cu plasticitate ecologică relativ limitată, dependentă de factorii hidro-edafici și luminoși favorabili, iar distribuția sa în PNPV reflectă fidel aceste cerințe ecologice.

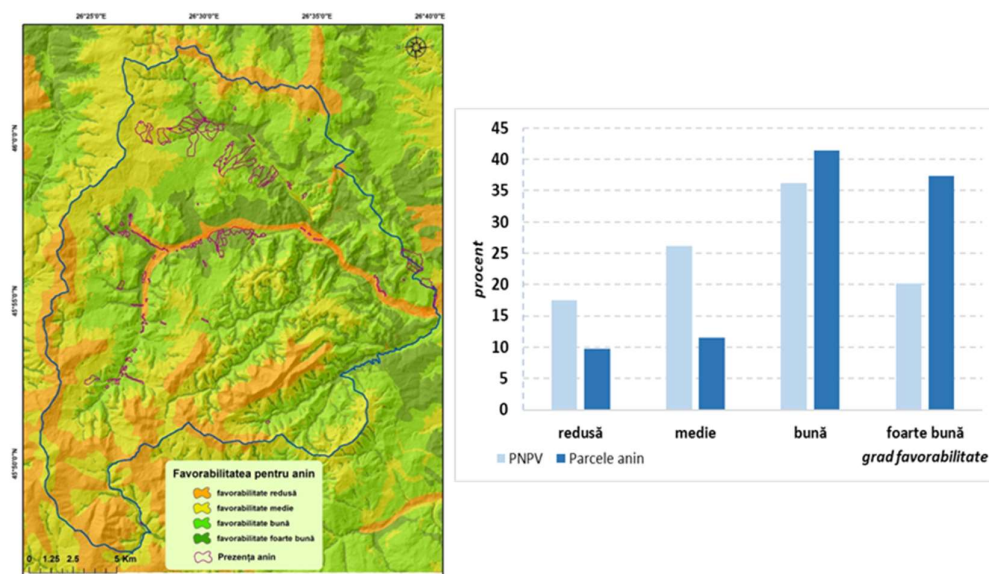


Figura 28. Favorabilitatea pentru anin în PNPV (clase realizate prin metoda Cuartilelor) și marcarea parcelor silvice în care specia este prezentă (stânga) și distribuția claselor de favorabilitate ecologică din totalul PNPV și din suprafețele în care este prezentă specia (dreapta)

6.3. Suprapuneri și diferențieri ale favorabilității spațiale

Hărțile de favorabilitate ecologică pentru molid (*Picea abies*), fag (*Fagus sylvatica*) și brad (*Abies alba*) evidențiază o segmentare altitudinală clară, reflectând zona verticală caracteristică Carpaților Orientali. Molidul înregistrează favorabilitate maximă în zona montană superioară (1200–1600 m), cu preferință pentru versanții nordici și estici, unde temperaturile medii anuale scad sub 6°C și solurile brun-acide sau podzolice predomină. Fagul are favorabilitate optimă în intervalul 700–1200 m, cu regim termic mai blând și soluri eutrofe, în timp ce bradul ocupă zona montană mijlocie (900–1400 m), acționând ca specie tampon între fag și molid. Suprapunerea favorabilității ecologice între brad și celelalte două specii subliniază potențialul ecosistemelor mixte fag–brad–molid, frecvente în Carpații Vrancei.

Analiza comparativă evidențiază și zone de conflict ecologic, în special în altitudinile medii (900–1100 m), unde atât fagul, cât și molidul pot găsi condiții favorabile. În aceste situații, regenerarea trebuie să țină cont de microclimat și succesiunea naturală. Molidul, deși competitiv în fazele juvenile datorită toleranței la umbră, poate fi afectat pe termen lung de creșterea temperaturilor, avantajând fagul. Cartografia comparativă a favorabilității devine astfel un instrument valoros pentru managementul adaptativ al pădurilor, permițând planificarea reconstrucției ecosistemelor și identificarea speciilor cu potențial de extindere.

Datele climatice confirmă că temperatura și regimul de precipitații sunt principalii determinanți ai distribuției speciilor, influențând favorabilitatea habitatului și răspunsul forestier în contextul schimbărilor globale. Modelele de distribuție a speciilor (SDM) sugerează migrații altitudinale și spre nord-est pentru fag și molid, cu un potențial de recul al molidului în zonele marginale sudice, unde temperatura și perioada bioactivă depășesc pragurile tolerabile. Fagul, mai plastic ecologic, poate extinde suprafețele ocupate în detrimentul molidului, în special în zonele montane și submontane. În acest context, rastele ponderate prin IVI permit evaluări spațiale precise și anticiparea modificărilor viitoare ale favorabilității ecologice, fundamentând decizii de management adaptativ.

6.4. Structura speciilor de arbori din zonele de protecție integrală (ZPI)

În zonele de protecție integrală, analiza procentuală a speciilor dominante oferă informații asupra structurii fitocenotice și a gradului de conservare a biodiversității. Fagul (*Fagus sylvatica*) deține ponderea principală, reflectând adaptarea sa la etajul montan al Carpaților Orientali și rolul său central în menținerea stabilității ecosistemice, ciclurilor biogeochimice și habitatelor asociate biodiversității ridicate (fig 29). Coniferele, în special molidul și bradul, completează compoziția arboretelor, formând păduri mixte care sporesc reziliența ecosistemului și diversitatea biologică, prin crearea unor microhabitate variate. Bradul este un indicator al stabilității și vechimii arboretelor, datorită longevității și cerinței de umbră la tinerețe.

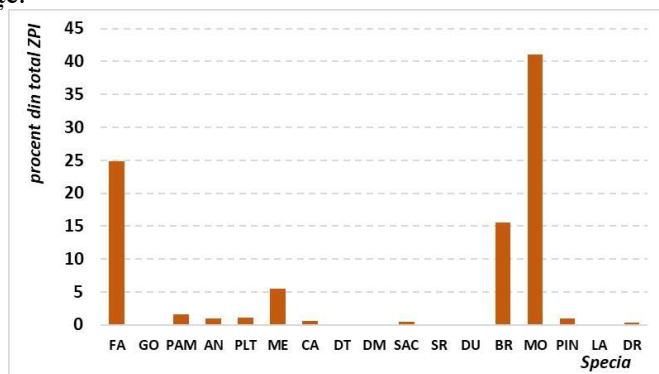


Figura 29. Ponderea principalelor specii lemnoase în cadrul ZPI

Prezența speciilor minoritare, precum frasinul, paltinul sau ulmul, contribuie la complexitatea structurală și funcțională a pădurii, sporind rezistența la boli și dăunători și susținând un spectru larg de organisme. Clasele de vârstă ale arboretelor indică predominanța arborilor maturi și vârstnici, semn al unui stadiu avansat de dezvoltare ecologică și al existenței microhabitatelor complexe (scorburi, trunchiuri putrezite, strat de litieră gros), esențiale pentru specii saproxilice și pentru pădurile cvasivirgine.

Prezența unor clase mai tinere (0–40 ani) semnalează regenerarea naturală, chiar și în pădurile mature, menținând dinamica ecosistemului și structurarea verticală și orizontală necesară pentru biodiversitate. Astfel, ZPI din Parcul Natural Putna-Vrancea reprezintă ecosisteme forestiere bine dezvoltate, apropiate de stadiul de climax ecologic, cu procese naturale de regenerare și cu un potențial ridicat de adaptare la schimbările de mediu, oferind atât valoare conservativă, cât și funcții ecologice esențiale (Fig 30).

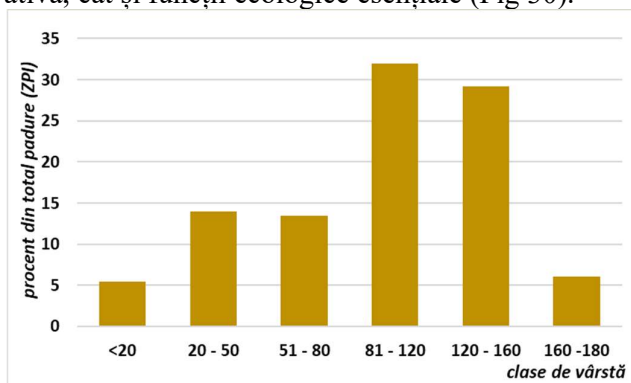


Figura 30. Ponderea principalelor clase de vârstă a speciilor lemnoase în cadrul ZPI

7. Monitorizarea vegetației cu ajutorul imaginilor satelitare

Pădurile din Parcul Natural Putna-Vrancea reprezintă ecosisteme esențiale, iar monitorizarea stării vegetației este critică pentru conservarea biodiversității și a funcțiilor ecosistemice. Folosind teledetecția și imaginile Sentinel-2, am evaluat starea vegetației pentru perioada 2018–2022, oferind informații detaliate asupra sănătății și dezvoltării arborilor fără a interveni direct în teren (ESA, 2012).

Pentru analiză au fost utilizate 10 imagini satelitare, câte una pentru fiecare anotimp, primăvară și toamnă pentru perioada 2018-2022. (tabelul1)

Tabelul 1. Datele Sentinel 2 utilizate pentru cercetare

An		2018	2019	2020	2021	2022
Imagini Sentinel	Sezon de primăvară	21 Aprilie	22 Martie	10 Aprilie	10 Mai	26 Martie
	Sezon de toamnă	28 Septembrie	13 Septembrie	17 Septembrie	12 Septembrie	17 Octombrie
Benzi spectrale	B2	B3	B4	B5	B6	B7
					8a	B9
Rezoluție [m]	10	10	10	10	10	10
Indici de vegetație	NDVI	PSRI	AI	FAPAR	FCOVER	CAB
					W	
Formula/referință	$\frac{(B8-B4)}{(B8+B4)}$ (Rouse et al., 1974)	$\frac{B4-B2}{B6}$ (Merzlyak et al., 1999)	Indici biofizici în SNAP (Weiss et al., 2016)			

Serii temporale NDVI și PSRI

Analiza NDVI a arătat valori variind între -0,681 și 0,999, indicând o vegetație forestieră sănătoasă și densă în zonele centrale și estice ale parcului, în special în primăvara anului 2018 și 2021. Anii 2019, 2020 și 2022 au prezentat valori NDVI mai scăzute, reflectând efectele secetei și ale precipitațiilor variabile (Costandache et al., 2019). PSRI a evidențiat modificări fenologice și niveluri de stres vegetativ ridicate în anumite zone, mai ales în anii cu temperaturi extreme, fiind util pentru detectarea senescentei și a variațiilor carotenoizilor.

Indici biofizici: LAI, FAPAR și FCOVER

Valorile LAI au variat între -0,44 și 6,25, reflectând stadiile incipiente de creștere în primăvară și dezvoltarea maximă a masei foliare în toamnă (ex. 4,827 în septembrie 2018). FAPAR a indicat activitate fotosintetică optimă în zonele joase și dens împădurite, cu valori maxime de peste 1 în toamna anului 2022. FCOVER a evidențiat o acoperire vegetală aproape completă în toamnă (maxim 1 în septembrie 2019) și valori mai reduse primăvara (ex. 0,707 în aprilie 2020), reflectând începutul sezonului vegetativ și variațiile altitudinale.

Indici de apă și clorofilă: CW și CAB

CW a relevat hidratarea coronamentului, cu valori primăvara peste 0,4 în zonele dens împădurite (ex. Lăcăuți), și scăderi semnificative în toamnă, sugerând stres hidric în sezoanele secetoase. CAB a arătat valori maxime ridicate în toamnă (până la 643,11 în septembrie 2019) și valori mai scăzute primăvara, corespunzând ciclului de dezvoltare al frunzișului și acumulării pigmentului clorofilic. Ca exemplu, figura 31 prezintă distribuția spațială a indicelui CAB (Chlorophyll a+b) în Parcul Natural Putna-Vrancea pentru patru ani consecutivi (2018–2021), valorile fiind exprimate pe o scară continuă de la zone cu valori reduse (nuanțe de roșu – sol descoperit, vegetație rară sau afectată) până la valori ridicate (nuanțe de verde – vegetație sănătoasă, cu activitate fotosintetică intensă). evidențiază **variabilitatea interanuală a stării fiziologice a vegetației forestiere din PNPV**, influențată direct de condițiile climatice sezoniere. Valorile maxime ridicate din 2019 sugerează un an cu regim hidric și termic favorabil, în timp ce scăderile din 2018 și 2020 reflectă impactul secetei asupra ecosistemelor forestiere. Datele confirmă potențialul indicelui CAB ca indicator robust pentru

monitorizarea sănătății pădurilor și pentru anticiparea răspunsului vegetației la schimbările climatice.

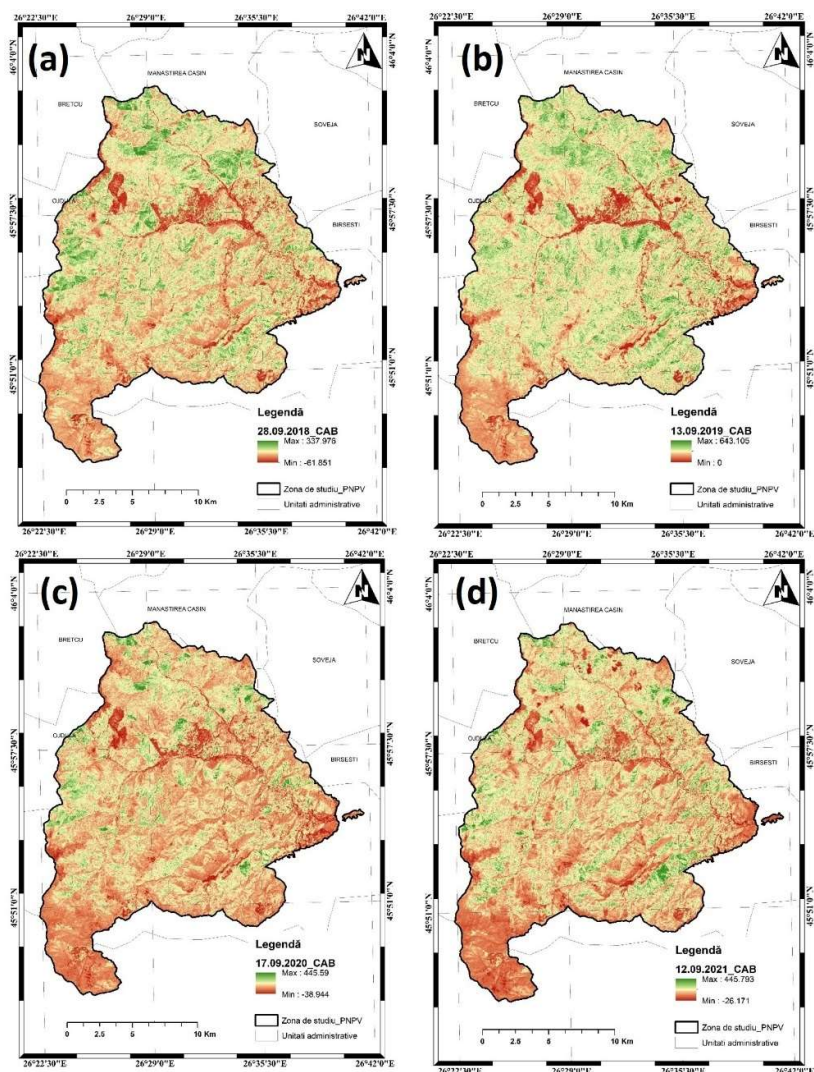


Figura 31. Distribuția spațială a indicelui CAB în sezonul de toamnă din anii 2018 până în 2021

Corelații cu factorii climatici și geografici

Variabilitatea interanuală a indicilor NDVI, PSRI, LAI, FAPAR, FCOVER, CW și CAB a fost corelată cu cantitățile de precipitații, temperaturile extreme și microclimatele locale. Zonele sudice și estice au prezentat valori mai scăzute de NDVI și FCOVER datorită uscării rapide a solului, în timp ce Munții Lăcăuți și Valea Lepșei au menținut valori ridicate ale CW, reflectând o hidratare optimă a vegetației.

Rezultatele proprii demonstrează că monitorizarea multi-anuală prin Sentinel-2 oferă o imagine detaliată și integrată a stării vegetației forestiere, evidențiind variații sezoniere și interanuale, impactul secetei și al temperaturilor extreme, precum și diferențele datorate condițiilor geografice. Acești indicatori sunt esențiali pentru managementul durabil al pădurilor și pot fi integrați în viitor cu metode de inteligență artificială pentru predicția schimbărilor ecosistemice (Koscior et al., 2022).

8. Parcul Natural Putna-Vrancea în contextul schimbărilor climatice globale

Tendențe generale

Analiza evoluției temperaturii medii anuale pentru Parcul Natural Putna-Vrancea arată o creștere constantă din anii 1960 până în prezent, confirmând tendințele regionale și globale de încălzire climatică (IPCC, 2022). Rezultatele obținute pe baza datelor CORDEX-EUR-11 evidențiază că, în funcție de scenariul RCP, temperaturile medii pot ajunge până la 12 °C în anul 2100, ceea ce reprezintă o încălzire accentuată față de perioada de referință 1986–2005.

Sezonalitatea încălzirii

Rezultatele proprii arată că toate anotimpurile vor înregistra creșteri de temperatură, dar cu intensități diferite.

- **Iarna**, de la valori istorice de –3 °C, se estimează o trecere la temperaturi pozitive în scenariul RCP8.5, ceea ce ar reduce drastic durata stratului de zăpadă și ar afecta regimul hidrologic.
- **Primăvara**, de la 6–7 °C istoric, valorile pot depăși 11 °C în scenariul pesimist, favorizând topirea accelerată a zăpezii și dereglarea ritmurilor biologice.
- **Vara** este anotimpul cu cea mai puternică încălzire: de la 16–18 °C, temperaturile pot depăși 23 °C, ceea ce sugerează apariția stresului termic și hidric asupra pădurilor, dar și creșterea riscului de incendii.
- **Toamna**, istoric 7–8 °C, va deveni mai blândă, cu valori de peste 12 °C în RCP8.5, afectând fenologia și intrarea vegetației în repaus.

Implicații ecologice

Aceste schimbări sezoniere au implicații directe asupra ecosistemelor forestiere ale PNPV. În special, încălzirea verilor și a toamnelor poate reduce reziliența pădurilor de molid, specie sensibilă la secetă și temperaturi ridicate, confirmând rezultatele obținute prin analiza indicilor de favorabilitate ecologică. Fagul și bradul, cu o plasticitate mai mare, ar putea câștiga teren în detrimentul molidului, dar modificările fenologice pot destabiliza procesele naturale de regenerare.

Rezultatele arată că PNPV se confruntă cu o tranziție climatică semnificativă, în care scenariul RCP8.5 proiectează schimbări de peste 5 °C până la finalul secolului. Aceasta va conduce la diminuarea caracterului nival al iernii, la devansarea ciclurilor vegetative și la apariția stresului termic în sezonul de vară. Integrarea acestor proiecții climatice în modelele de favorabilitate ecologică confirmă faptul că speciile forestiere își vor modifica distribuția altitudinală, ceea ce impune adaptarea managementului forestier și adoptarea unor măsuri proactive de conservare.

Concluzii

Vegetatia forestieră din Parcul Natural Putna-Vrancea (PNPV) este rezultatul interacțiunii complexe dintre factori abiotici (relief, sol, climă) și biotici (comunități vegetale, faună, agenți patogeni). Rezultatele proprii confirmă că etajarea altitudinală, variabilitatea edafică și regimul climatic determină o dispunere diferențiată a speciilor: fagul domină etajele montane mijlocii, molidul și bradul se concentrează la altitudini superioare, iar gorunul și carpenul ocupă zonele colinare și depresionare. Această stratificare ecologică este direct influențată de panta și expoziția versanților, care controlează microclimatul și regimul hidric local.

Analiza substratului litologic a arătat că flișul, șisturile și gresia favorizează formarea unor soluri variate, de la districambosoluri acide – preferate de conifere – până la eutricambosoluri și soluri aluviale fertile, adecvate foioaselor și ecosistemelor ripariene. Datele climatice pentru perioada 1961–2013 indică o tendință de încălzire accentuată, mai ales după 1980, asociată cu alternanțe între ani ploioși și secetoși. Această instabilitate ecologică afectează creșterea și regenerarea arboretelor, dar și vulnerabilitatea lor la doborâturi, secetă sau atacuri biotice.

Influența antropică a avut un rol esențial în configurarea actuală a pădurilor din PNPV. Cercetarea a evidențiat că exploatarea forestieră intensă din secolele XIX–XX, facilitată de căile ferate forestiere, au fragmentat pădurile bătrâne, menținând intacte doar suprafețele inaccesibile, astăzi incluse în zone cu protecție integrală. Reîmpăduririle postbelice, deseori realizate cu molid, au alterat compoziția inițială a unor ecosisteme. În schimb, abandonarea pășunatului montan în ultimele decenii a permis regenerarea naturală a pădurilor în areale precum Pasul Mușat sau bazinul superior al Tișitei, proces confirmat de observațiile de teren și de analiza datelor satelitare.

Rezultatele analizei parcelare asupra celor 31.600 ha împădurite din PNPV arată o co-dominanță între fag (36%) și molid (34%), completată de brad (18%) și alte specii minoritare, precum gorun, carpen, paltin, mesteacăn și anin. Această structură mozaică asigură o reziliență ridicată a pădurilor și confirmă tranziția ecologică dintre etajul montan de fag și cel de conifere. Hărțile de favorabilitate ecologică, realizate prin integrarea valorilor IVI și a rasterelor climatice, au validat cu precizie distribuția reală a speciilor, demonstrând aplicabilitatea metodei pentru evaluarea actuală și pentru proiecții viitoare.

Monitorizarea prin teledetecție (Sentinel-2) a arătat variații semnificative ale indicilor NDVI, LAI, FAPAR, FCOVER, CAB și CW, corelate cu anomalii climatice și episoade de secetă. Rezultatele proprii confirmă că stresul hidric sau termic afectează nu doar sezonul curent, ci și dezvoltarea vegetației în anii următori. Această metodologie oferă un instrument esențial de diagnostic pentru sănătatea pădurilor, cu potențial sporit prin integrarea inteligenței artificiale.

Proiecțiile climatice bazate pe scenariile RCP indică o creștere de până la 12 °C a temperaturii medii anuale până în 2100 (scenariul RCP8.5), cu efecte asupra stratului de zăpadă, fenologiei și distribuției speciilor forestiere. Rezultatele proprii arată că molidul și bradul vor deveni tot mai vulnerabili la altitudini joase, în timp ce fagul și speciile termofile, precum gorunul și carpenul, ar putea câștiga teren. În aceste condiții, riscurile de incendii forestiere, doborâturi și reducerea regenerării naturale se intensifică.

În concluzie, cercetarea demonstrează că pădurile din PNPV se află într-un echilibru fragil între factorii naturali și presiunile antropice și climatice. Integrarea analizelor silvice, a modelării spațiale și a teledetecției oferă o bază solidă pentru managementul adaptativ al pădurilor. Rezultatele proprii confirmă necesitatea unei strategii de conservare orientate spre diversitate, reziliență și adaptare la schimbările climatice.

Bibliografie selectivă

1. *** <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD11A2.006>
2. ***Codul Silvic, 1996, Art. 20, 21;
3. ***FAO - Food and Agriculture Organization . Global Forest Resources Assessment 2020—Key Findings; FAO: Rome, Italy, 2020; Available online: <http://www.fao.org/3/CA8753EN/CA8753EN.pdf> (accessed on 13 December 2020).
4. ***<https://maps.arcnum.com/en/> accesat între 12.05 -20.06. 2021
5. ***<https://www.euforgen.org/> the European Forest Genetic Resources Programme
6. ***IPCC AR6, report, (2021) <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (accesat: 30.10.2024)
7. ***Legea nr. 49/2011
8. ***Modelul numeric al terenului: ©JAXA/METI ALOS PALSAR L1.0 2007. Accesat prin ASF DAAC <https://search.asf.alaska.edu/#/> în data de 11 June 2024.
9. ***Ordonanța de Urgență nr. 195 din 2005 privind protecția mediului.
10. ***Ordonanța de Urgență nr. 57/2007 privind regimul ariilor naturale protejate, conservarea habitatelor naturale, a florei și faunei sălbatice.
11. ***Planul de management al Parcului Natural Putna Vrancea, 2021
12. ***UNECE/FAO (2020). Forest Sector Outlook Study for Europe 2040. United Nations Economic Commission for Europe
13. Arcanum Adatbázis Kft, (2015), Historical Maps of the Habsburg Empire [WWW Document]. Mapire.eu. URL <http://mapire.eu/en/>
14. Armaș I., Osaci-Costache G., Brașoveanu L., (2014), Forest Landscape History Using Diachronic Cartography and GIS. Case Study: Subcarpathian Prahova Valley, Romania. In: Crăciun, C., Bostenaru Dan, M. (eds) Planning and Designing Sustainable and Resilient Landscapes. Springer Geography. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8536-5_6
15. Atkinson M. D., (1992), *Betula pendula* Roth (*B. verrucosa* Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. Journal of Ecology, 80(4), 837-870. <https://doi.org/10.2307/2260870>
16. Barbu I., Barbu V., (1993), Molidul (*Picea abies* L. Karst) în literatura științifică românească (1890-1990). *Bucovina Forestieră*, 2(1-2), 46-52.
17. Barbu Ion, Barbu Cătălina, (2005), Silver fir (*Abies alba* Mill.) in Romania, Editura Tehnică Silvică, Stațiunea Experimentală de Cultura Molidului, 2005 220 p., ISBN 973-96001-3-1
18. Bender O., Boehmerb H.J., Jens D., Schumacher P.K., (2005) Using GIS to analyse long-term cultural landscape change in Southern Germany. *Landscape and Urban Planning* 2005, 70(1), 111–125, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.10.008>
19. Bogdan N., Constandache C., Nistor S., (2015), Consecințele despăduririlor. Reconstrucția ecologică a Vrancei, Ed. Silvică, 288 pag.
20. Bojariu R, Zenaida Chițu, Sorin Ionut Dascălu, et al., (2021), Schimbările climatice : de la bazele fizice la riscuri și adaptare -Ed. rev. și adăugită, Edit. Printech, București, 2021, <https://www.meteoromania.ro/anm/images/clima/schimbări-climatice2021.pdf>
21. Calinescu R., Biogeografia Romaniei. Bucuresti: Editura Stiintifica, 1969; p.78
22. Caudullo G., De Rigo D., Mauri A., Houston Durrant T. and San-Miguel-Ayanz, J., (2016), European atlas of forest tree species, Caudullo, G.(editor), De Rigo, D.(editor), Mauri, A.(editor), Houston Durrant, T.(editor) and San-Miguel-Ayanz, J.(editor), Publications Office of the European Union, 2016, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/776635>
23. Caudullo G., Welk E., & San-Miguel-Ayanz J., (2016), *Picea abies* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: J. San-Miguel-Ayanz et al. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. European Commission, Publications Office of the European Union. <https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/atlas-download-page/>
24. Caudullo G., Welk E., & San-Miguel-Ayanz 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>
25. Căpățină Viorel Toma, (2008), Depresiunea Vrancea : studiu geomorfologic, -teza de doctorat-, Iași
26. Ceccato Pietro, Flasse Stéphane, Tarantola Stefano, Jacquemoud Stéphane, Grégoire Jean-Marie, (2001), Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*. 77. 22-33. [10.1016/S0034-4257\(01\)00191-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2).
27. Černý J., Špulák O., Kománek M., Žižková E., & Sýkora P., (2024), Sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) and its adaptation strategies in the context of global climate change: a review. *Central European Forestry Journal*, 70(2), 77-94. <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0012>
28. Chelaru D.A., Apostol L., Ursu A., (2013), Spatial analysis of forested area dynamics in Bistrita Valley - subcarpathian sector, Present Environment and Sustainable Development, Romania, 7(1).

29. Chiriac S., (2009), Potentialul ecologic si exploatarea biologica a ariilor protejate din judetul Vrancea, Bucuresti
30. Ciutea A., (2022), Utilizarea tehnicilor de teledetectie și GIS pentru evaluarea structurii arboretelor și analiza influenței climatului și a schimbărilor climatice asupra stării ecologice a acestora pe flancul extern, estic și sud-estic al Carpaților Oriental, Iași
31. Conea I., (1992), Vrancea Geografie istorica toponimie si terminologie geografica, Edit. Academiei Romane, 202 p
32. Costandache C., Bogdan N., Nistor S., (2018), Pădurile Vrancei, de la defrișare la refacere, Revista de Silvicultură și Cinegetică, 43, 107-113. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20193360908>
33. Costandache C., Dincă L., Nistor S., Crișan V., (2016), Cauzele degradării terenurilor în vrancea. măsuri silvice de ameliorare a terenurilor degradate, Soil Forming Factors and Processes from the Temperate Zone 15 (2016) 57-68, <http://10.15551/fppzt.v15i1.529>
34. Costandache C., Dincă L., Popovici L., Tudor C., (2019), The role of forest vegetation in the mitigation of the ecological imbalances resulting from climate change in the Putna-Vrancea river basin, International Symposium "The Environment And The Industry", Simi 2019, Proceedings Book, <http://doi.org/10.21698/simi.2019.fp13>
35. Doniță N., Popescu A., Paucă-Comănescu M., Mihăilescu S., Biriș I. A., (2005 a), Habitatele din România, Editura Tehnică-Silvică, București, 496 p.
36. Doniță N., C. Chiriță, and V. Stănescu, (1900), Tipuri de ecosisteme forestiere din România, Editura Tehnică Silvică (1990).
37. Dumitrescu A., Birsan M.V., (2015), ROCADA: a gridded daily climatic dataset over Romania (1961–2013) for nine meteorological variables. Nat Hazards 78, 1045–1063. doi: 10.1007/s11069-015-1757-z
38. Dumitrescu I., Săndulescu, M., Bandrabur T., Jana I. (1965), Harta geologică a României 1:200 000, Foiaia Covasna Inst. Geol. Geofiz., Bucharest, 1965.
39. Ellenberg H., și Leuschner C., (2010), Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht (Vol. 8104). Utb.
40. Ellenberg Heinz., (2009), Vegetation ecology of central Europe. Cambridge University Press, Editia a IV-a , Cambridge, 2009.
41. Florea N., Balaceanu V., Munteanu I., Conea A., Oancea C., Cernescu N., Popovat, M., (coordonatori), (1963-1994), Harta Solurilor Romaniei la scara 1:200.000 (50 foi de harta) & Legenda Generala, ed. Institutul Geologic si IGFCOT Bucuresti;
42. Florea N., Munteanu I., Rusu C., Dumitru M., Ianoș Gh., Răducu Daniela, Rogobete Gh., Țărău D., (2012), Sistemul Român de taxonomie al Solurilor, Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Pedologie, Agrochimie și Protecția Mediului – ICPA București
43. Furtună (Duma) Paula-Roxana, (2020), Utilizarea aplicațiilor de teledetectie în detectarea și analiza doborâturilor de vânt din arealul munților Apuseni, Cluj-Napoca
44. Giurgiu V., Decei I., Armășescu S., (1972). Biometria arborilor și arboretelor din România. Ceres.
45. Griffiths Patrick, Kuemmerle Tobias, Baumann Matthias, Volker C. Radeloff, Ioan V. Abrudan, Juraj Lieskovsky, Catalina Munteanu, Katarzyna Ostapowicz, Patrick Hostert, (2014), Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites, Remote Sensing of Environment, Volume 151, 2014, Pages 72-88, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.022>.
46. Iliescu I, 2002, Aspecte ale activității Societăților forestiere străine în Vechea Vrance (1), în Cronica Vrancei, vol. III, coordonator: Horia Dumitrescu, Editura Pallas, Focșani, 2002, p. 269, <https://biblioteca-digitala.ro>
47. Iliescu I, 2012, Căi ferate forestiere în străvechea țară a Vrancei (prima jumătate a secolului xx). Mărturii documentare, Cronica Vrancei, vol. XIII, coordonator: Horia Dumitrescu, Editura Pallas, Focșani pp. 287-309, <https://biblioteca-digitala.ro>
48. Istrate AG, Breaban IG, Ichim P, Ursu A, (2021), Implications of land use - land cover change in the northern part of Putna Vrancea natural park, In Proceedings of 21st International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, 21 (3.1), 465-474, <http://dx.doi.org/10.5593/sgem2021/3.1/s14.75>
49. Istrate, George-Adrian, Istrate Vasilică, Ursu Adrian, Ichim Pavel, Breabă Iuliana-Gabriela, (2023), "Using Diachronic Cartography and GIS to Map Forest Landscape Changes in the Putna-Vrancea Natural Park, Romania" Land 12, no. 9: 1774. <https://doi.org/10.3390/land12091774>
50. Kramer, K., Degen, B., Buschbom, J., Hickler, T., Thuiller, W., Sykes, M. T., & de Winter, W. (2010). Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change—range, abundance, genetic diversity and adaptive response. Forest Ecology and Management, 259(11), 2213-2222. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.023>
51. Leuschner C., Ellenberg H., (2017a), Vegetation ecology of central Europe. Vol. 1. Cham: Springer.
52. Leuschner C., Ellenberg H., (2017b), Beech and Mixed Beech Forests. In: Ecology of Central European Forests. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43042-3_5

53. Leuschner C., Tückmantel T., Meier I.C., (2022), Temperature effects on root exudation in mature beech (*Fagus sylvatica* L.) forests along an elevational gradient. *Plant Soil* 481, 147–163 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05629-5>
54. Mauri A., De Rigo D., Caudullo G., (2016), *Abies alba* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of forest tree species (2016): 48-49. Publications Office of the European Union. <https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/atlas-download-page/>
55. Munteanu C., Nita M.D., Abrudan I.V., Radeloff V.C., (2016), Historical forest management in Romania is imposing strong legacies on contemporary forests and their management. *Forest Ecology and Management*, 361, 179-193.
56. Niinemets Ü., și Valladares F., (2006), Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate Northern Hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*, 76(4), 521–547. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2)
57. Obidzinski, A., 2004. Black alder (*Alnus glutinosa* Gaertn.) as pioneer species in regeneration of fresh oak-linden-hornbeam forest (*Tilio-Carpientum typicum* Traczky 1962) in Białowieża Forest (east Poland). *Pol. J. Ecol.* 52, 533e551.
58. Osaci-Costache G., (2004), *Muscelele dintre Dâmbovița și Olt în documente cartografice. Reconstituirea și dinamica peisajului geografic în secolele XVIII–XX*. Editura Universitară, București
59. Otzellowitz H., (1788), *Militaerischer Aufnahms-Brouillon von der Chotymyer Raja, bestehend in 29 Sectionen*
60. Pătru-Stupariu I., Stupariu M.S., Cuculici R., Huzui A., (2011), Understanding landscape change using historical maps. Case study Sinaia, Romania, *Journal of Maps*, 7:1, 206-220, <https://doi.org/10.4113/jom.2011.1151>
61. Popa I., (2007), *Managementul riscului la doborâturi produse de vânt*, Editura Tehnică Silvică, 233
62. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., (1974), Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, NASA SP-351, Washington DC, 309-317.
63. Rujoiu-Mare M.R., Olariu B., Mihai B.A., Nistor C., Săvulescu I., (2017), Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 496–508. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1365570>
64. Secu Cristian V., Rusu Constantin, (2008), *Geografia solurilor cu elemente de pedologie*, Edit. Univ. Alexandru Ioan Cuza Iasi, 2008, p 323, SBN: 978-973-703-279-9,
65. Skaloš J., Weber M., Lipský Z. et al., (2011), Using old military survey maps and orthophotograph maps to analyse long-term land cover changes: Case study (Czech Republic). *Applied Geography*, 31(2): 426–438.
66. Stănescu V., 1979. *Dendrologie*. Editura didactică și pedagogică, București.
67. Stănescu V., Șofletea N., Popescu O., (1997), *Flora forestieră lemnoasă a României*. Ed. Ceres.
68. Stângă I.C., Niacsu L., (2016), Using old maps and soil properties to reconstruct the forest spatial pattern in the late 18th century. *Environ. Eng. Manag. J.* 2016, 15, 1369–1378
69. Șofletea N., Curtu L., (2007), *Dendrologie*, Edit Universității Transilvania, Brașov, p. 418
70. Tătaru A., (2008), *Organizarea spațiului rural în bazinul Putnei*, Edit. Transversal, ISBN: 978-606-8042-01-5
71. Timár G., Biszak S., Székely B., Molnár G., (2010), Digitized maps of the Habsburg military surveys e overview of the project of ARCANUM Ltd. (Hungary). *Preservation in Digital Cartography*, 273e283. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12733-5>.
72. Turnock D., (1990), Transport for Romania's Carpathian Forests: Improved Accessibility through Technological Change. *GeoJournal*, 22(4), 409–428. <http://www.jstor.org/stable/41145150>
73. Ursu A., Ungureanu O.A., Istrate V., Acuculitei A., Bucumanu O., (2015), The forest area changes in the Prut river watershed (Romania), Conference Proceedings 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015, 2(2), 1131 – 1138, ISBN 978-619-7105-35-3, ISSN 1314-2704, <http://dx.doi.org/10.5593/SGEM2015/B22/S11.141>
74. Ursu A., (2009), *Tranziții fizico-geografice în zona de curbură a Vrancei și influența lor asupra utilizării terenului*, Teză de doctorat, Biblioteca Facultății de Geografie și Geologie Iași
75. Ursu A., Sfica L., Niacsu L., Minea I., Vasilniuc I., Stanga I.C., (2007), The changes occurred in the land use from the Eastern part of Romania after 1989 – remote sensing and GIS application, *Present Environment and Sustainable Development*, vol. 1, Issue 1, pp 321-326, 2007.
76. Vasile D., Pleșca B.I., Bragă C., Dumitru-Dobre C.S.V., Petrișan A.M., (2023), *Pădurile virgine și cvasivirgine din România. Arie Protejate*. Anul XXVIII, (52), 55-61.
77. Vlad R., (2007), *Fundamente silviculturale pentru gestionarea arboretelor de molid vătămate ce cervide*, Editura Silvică
78. Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L. (2004) Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, 25:1, 261-274, doi.org/10.1080/0143116031000116417