

CZU: 574

DOI: 10.46727/c.v1.16-17-05-2024.p160-169

UTILIZAREA ANALIZEI FRACTALE ÎN CONSERVAREA BIODIVERSITĂȚII ȘI ÎN RECONSTRUCȚIA ECOLOGICĂ

USING FRACTAL ANALYSIS IN BIODIVERSITY CONSERVATION AND ECOLOGICAL RESTORATION

Andronache Ion^{1,2}, cercet. șt., dr. în geografie,

¹Centrul de Analiză Integrată și Management Teritorial (CAIMT),
Universitatea din București, România

²Școala Gimnazială „Vasile Alecsandri”, Brăila, România

Andronache Ion^{1,2}, research scientist, PhD in geography

²Research Center for Integrated Analysis and Territorial Management (CAIMT),
University of Bucharest, Romania

²Vasile Alecsandri Secondary School, Braila, Romania

ORCID: 0000-0001-7693-9098

E-mail: ion.andronache@geo.unibuc.ro

Rezumat. Articolul explorează utilizarea analizei fractale ca instrument de sprijin în procesul decizional pentru conservarea biodiversității și reconstrucția ecologică, având în vedere presiunile antropice și schimbările climatice contemporane. Folosind analiza fractală, o abordare matematică complexă, se investighează modelele spațiale ale ecosistemelor, furnizând o perspectivă detaliată asupra diversității și complexității acestora. Principalele măsuri fractale utilizate – dimensiunea fractală, lacunaritatea și succolaritatea – se completează reciproc, permițând o analiză comprehensivă a structurii și schimbărilor din ecosisteme. Studiul se concentrează pe efectele defrișărilor asupra ecosistemelor forestiere din două regiuni montane din România: Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu. Analiza fractală a dezvăluit modele distincte de defrișare între aceste regiuni, evidențiind schimbările în gradul de umplere a spațiului de către păduri, heterogenitatea spațială și conectivitatea fragmentelor de pădure. Rezultatele sugerează că defrișările au generat pierderi de habitat și fragmentare a ecosistemelor, având impact asupra biodiversității și funcțiilor ecosistemelor. Analiza fractală s-a dovedit a fi importantă în evidențierea acestor schimbări și în furnizarea de date pentru planificarea măsurilor de conservare și reconstrucție ecologică. În concluzie, acest studiu subliniază importanța analizei fractale în înțelegerea dinamicilor ecosistemelor și în elaborarea de strategii de gestionare a resurselor naturale.

Cuvinte-cheie: dimensiune fractală, lacunaritate, succolaritate, păduri, habitat, biodiversitate, reconstrucție ecologică.

Abstract. This article explores the use of fractal analysis as a tool to support decision making for biodiversity conservation and ecological restoration in the context of contemporary anthropogenic pressures and climate change. Fractal analysis, a complex mathematical approach, is used to examine the spatial patterns of ecosystems, providing a detailed perspective on their diversity and complexity. The main fractal measures used - fractal dimension, lacunarity and succolarity - complement each other to provide a comprehensive analysis of ecosystem structure and change. The study focuses on the effects of deforestation on forest ecosystems in two mountainous regions of Romania: the Northern Group of the Eastern Carpathians and the Retezat-Godeanu Group. Fractal analysis revealed distinct patterns of deforestation between these regions, highlighting changes in forest space-filling, spatial heterogeneity and connectivity of forest fragments. The results suggest that deforestation has led to habitat loss and ecosystem fragmentation, affecting biodiversity and ecosystem functioning. Fractal analysis was instrumental in highlighting these changes and providing data for planning conservation and ecological restoration efforts. In conclusion, this study highlights the importance of fractal analysis in understanding ecosystem dynamics and developing strategies for natural resource management.

Keywords: fractal dimension, lacunarity, succolarity, forests, habitats, biodiversity, ecological restoration.

Introducere

Conservarea biodiversității și reconstrucția ecologică reprezintă două provocări majore ale epocii noastre, impunând necesitatea adoptării unor abordări inovatoare și eficiente [1-3]. Biodiversitatea, esențială pentru funcționarea optimă a ecosistemelor, este amenințată în mod semnificativ de modificările antropice și de schimbările climatice [4-6].

În acest context, analiza fractală, o disciplină matematică neliniară care explorează modelele complexe și structurile la nivelul detaliilor [7], devine din ce în ce mai relevantă pentru înțelegerea și gestionarea ecosistemelor [8-14]. Studiile ecologice clasice pot atinge limitele lor în înțelegerea detaliată a modelelor spațiale și temporale ale ecosistemelor și implicit ale biodiversității reconstrucției ecologice [15-17]. Astfel, analiza fractală oferă o perspectivă unică, permițând cuantificarea detaliilor la multiple scări și aducând contribuții semnificative în caracterizarea complexității structurale a ecosistemelor [18-21].

Există trei categorii de metrice utilizate pentru evaluarea proprietăților fractale: dimensiunea fractală, lacunaritatea și succolaritatea. Dimensiunea fractală indică cât de mult spațiu ocupă un obiect [22, 23], în timp ce lacunaritatea măsoară distribuția lacunelor. Astfel, o imagine este considerată mai lacunară dacă lacunele sale tind să fie extinse [24-26]. Succolaritatea cuantifică gradul de percolație într-o imagine, reprezentând volumul de „apă” virtuală care poate trece prin ea. Aceasta măsoară cât de multă „apă” virtuală poate pătrunde într-o imagine prin pixelii negri, considerând pixelii albi ca fiind obstacole [27].

Aceste trei metrice fractale se completează reciproc. De exemplu, două imagini pot prezenta aceeași dimensiune fractală, dar se pot diferenția în ceea ce privește lacunaritatea. În același timp, succolaritatea permite distingerea între diferite imagini care au aceeași dimensiune fractală sau lacunaritate [27].

Obiectivul principal al acestui articol este să evidențieze rolul-cheie al analizei fractale, ca metodă de cercetare, în cadrul conservării biodiversității și al reconstrucției ecologice. Astfel, articolul prezintă fundamentul teoretic al analizei fractale, oferind o perspectivă cuprinzătoare asupra potențialului analizei fractale în domeniul ecologiei aplicate și ilustrând modul în care aceasta poate fi aplicată pentru evaluarea ecosistemelor. Prin prezentarea studiului de caz și a rezultatelor obținute, s-a demonstrat impactul pozitiv al analizei fractale în furnizarea de informații esențiale pentru planificarea și implementarea acțiunilor de conservare și reconstrucție ecologică, contribuind astfel la dezvoltarea unui cadru științific solid pentru gestionarea durabilă a biodiversității și a ecosistemelor fragile.

Materiale și metode

1. Zona de studiu

În cadrul acestei cercetări, s-a utilizat o bază de date referitoare la gradul de acoperire cu arbori, pentru intervalul 2001-2021, provenită dintr-un studiu anterior disponibil ca material suplimentar [17] (https://static-content.springer.com/esm/art%3A10.1007%2Fs10980-023-01640-y/MediaObjects/10980_2023_1640_MOESM4_ESM.zip; accesat la 5 ianuarie 2024). Imaginile au fost procesate folosind baza de date Global Land Analysis and Discovery [28] (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change>; accesat la 19 aprilie 2022). Detaliile privind achiziționarea și preprocesarea acestor imagini sunt descrise în detaliu în [17]. Zona de studiu cuprinde două grupe montane din România, respectiv Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu din Carpații Meridionali (Figura 1).

Alegerea acestor două grupe montane, în cadrul studiului a fost motivată de diferențele semnificative între pattern-urile lor în ceea ce privește suprafețele ocupate de pădure și defrișările. Aceste două regiuni montane au fost considerate reprezentative pentru analiza comparativă, oferind

astfel o perspectivă relevantă asupra diversității peisajelor forestiere și a impactului defrișărilor asupra habitatelor, și implicit asupra biodiversității în contextul Carpaților din România.

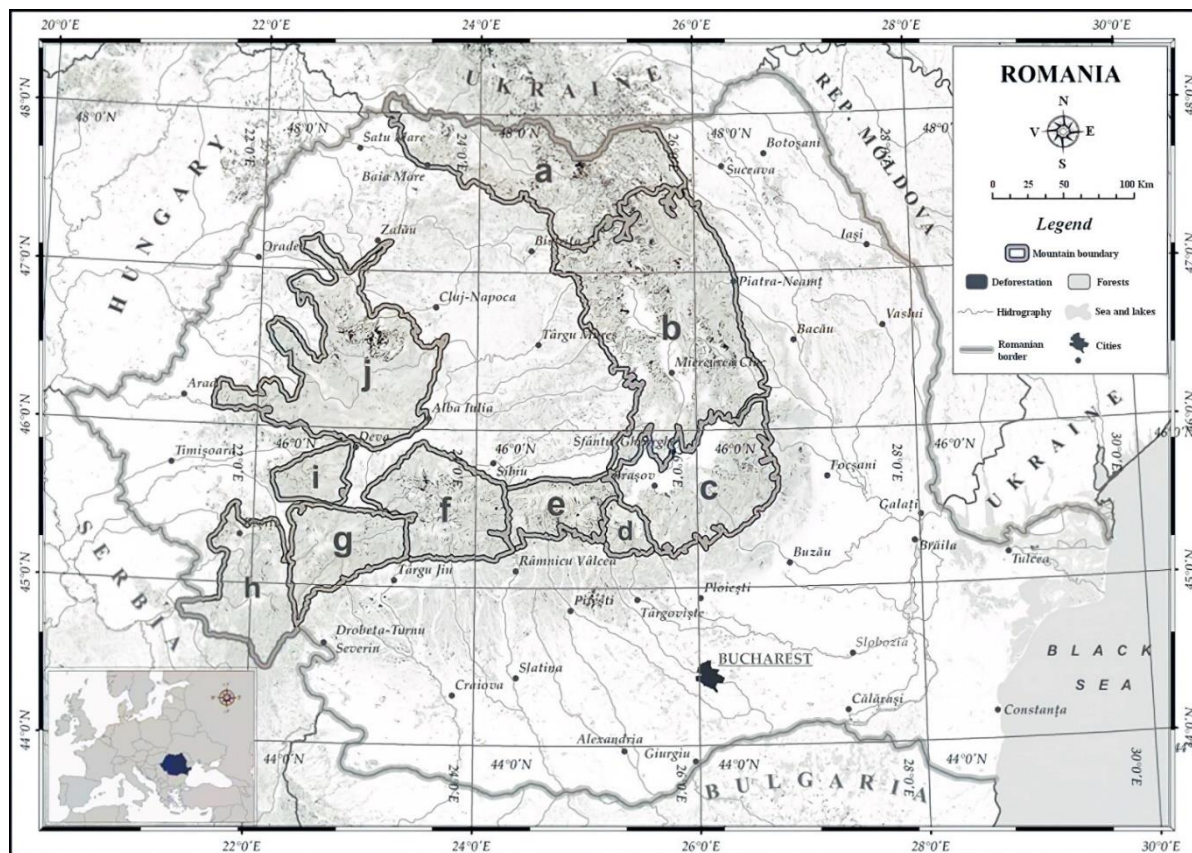


Fig. 1. Localizarea geografică a munților Carpați din România: (a) grupa nordică a Carpaților Orientali; (b) grupa centrală a Carpaților Orientali; (c) grupa sudică a Carpaților Orientali; (d) grupa Bucegi; (e) grupa Făgăraș; (f) grupa Parâng; (g) grupa Retezat–Godeanu; (h) Munții Banatului; (i) Munții Poiana Ruscă; (j) Munții Apuseni [17]

Au fost analizate două stack-uri asociate celor două grupe montane investigate, fiecare având douăzeci și două de imagini, corespunzătoare fiecărui an din intervalul 2000-2021 (Figurile 2 și 3). Dimensiunea tuturor imaginilor a fost de 1000×1000 pixeli. Pixelii negri reprezintă zonele cu pădure, în timp ce pixelii albi indică zonele lipsite de pădure sau despădurite în analizele privind succolaritatea, și invers în analizele dimensiunii fractale și ale lacunarității.

2. Metode

Acest studiu propune explorarea impactului defrișărilor asupra ecosistemelor forestiere cu o atenție deosebită acordată reducerii habitatelor și posibilelor influențe asupra biodiversității. Investigația a fost efectuată prin utilizarea unui set de metrice specifice analizei fractale: dimensiunea fractală (box-counting) [29, 30], lacunaritatea [31] și succolaritatea [16, 27].

2.1. Dimensiunea fractală box-counting (D_{B-C})

Dimensiunea fractală box-counting reprezintă metoda cea mai des utilizată pentru estimarea dimensiunii fractale a imaginilor, deoarece se poate aplica modelelor, cu sau fără auto-similaritate. Acest algoritm estimează ponderea din spațiul disponibil care este ocupat de structura fractală.

Dimensiunea box-counting constă în determinarea numărului de celule $N(\varepsilon)$ necesare pentru acoperirea structurii care trebuie măsurată, depinzând de mărimea ε a acestor celule. Pentru valori diferite ε ale dimensiunii celulei, celulele care acoperă figura sunt numărate, iar apoi acestea sunt reprezentate în coordonate logaritmice $\log N = f(\log \varepsilon)$. În cele din urmă, panta regresiei liniare constituie estimarea dimensiunii fractale. Expresia matematică este dată de ecuația 1:

$$D_{B-C} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}} \right) \quad (1)$$

unde D_{B-C} este dimensiunea fractală box-counting, ε este lungimea laturii cutiei și $N(\varepsilon)$ reprezintă numărul de cutii învecinate și care nu se suprapun de latura ε necesare pentru a acoperi aria obiectului fractal [32, 33].

Cum limita spre zero nu poate fi aplicată imaginilor digitale, D_{B-C} se estimează prin ecuația (2):

$$D_{B-C} = d \quad (2)$$

unde d este panta $\log[N(\varepsilon)]$ față de $\log \frac{1}{\varepsilon}$ [33].

Dimensiunea fractală box-counting poate lua valori între 0 (când obiectul analizat este un punct) și 2 (când obiectul fractal este un obiect geometric euclidian).

2.2. Lacunaritatea (λ)

Lacunaritatea este o măsură a golurilor sau a spațiului gol într-o imagine sau într-o structură. Conceptul de lacunaritate depinde în mare măsură de scară, deoarece texturile heterogene la scări mici pot deveni destul de omogene la scări mai mari. Astfel, lacunaritatea este în mod obișnuit considerată o măsură a heterogenității texturii la mai multe scări.

Dintre algoritmi utilizați pentru calcularea lacunarității, algoritmul denumit Gliding-Box este cel mai frecvent întâlnit. Acest algoritm a fost propus de Allain și Cloitre [34]. Algoritmul Gliding-Box calculează lacunaritatea prin deplasarea unor cutii de dimensiuni diferite peste imaginea analizată. Pe măsură ce aceste cutii se deplasează prin imagine, numărul de locuri ocupate în fiecare cutie (denumită masă a cutiei) este utilizat pentru a calcula funcția caracteristică a distribuției masei. Numărul de cutii cu rază r și masă M este definit ca $n(M, r)$. Distribuția de probabilitate $Q(M, r)$ se obține prin împărțirea lui $n(M, r)$ la numărul total de cutii. Lacunaritatea la scară r este definită ca pătratul coeficientului de variație al distribuției de masă $Q(M, r)$ împărțit la pătratul mediei sale (Ecuația 3).

$$\Lambda_{(r)} = \frac{\sum_M M^2 Q(M, r)}{\sum_M M Q(M, r)^2} \quad (3),$$

unde $\Lambda_{(r)}$ ilacunaritatea la scara r ('dimensiunea cutiei r '), M reprezintă masa sau pixelii de interes, iar $Q(M, r)$ este probabilitatea de a găsi masa M în interiorul cutiei de dimensiune r .

Atunci când algoritmul Gliding-Box este aplicat la imagini binare (imagini cu doar 1 bit), acesta numără doar pixelii din prim-plan. Aceasta se datorează faptului că fiecare pixel dintr-o imagine binară poate avea doar una dintre cele două valori posibile (fond sau prim-plan).

Valori mai mari ale lacunarității indică o mai mare heterogenitate spațială, în timp ce valori mai mici indică o omogenitate spațială mai mare. Când imaginea este perfect omogenă, lacunaritatea are valoarea zero.

2.3. Succolaritatea (σ)

Succolaritatea este definită ca o evaluare a gradului în care filamentele facilitează percolarea sau curgerea într-o imagine [7]. Pentru a evalua succolaritatea, fiecare poziție la nivel de pixel a fost considerată ca fiind goală (pixeli negri) sau umplută cu o masă impenetrabilă (pixeli albi). Principiul

de calcul al succolarității este descris în detaliu de Melo și Conci (2013) [27], care au adoptat o abordare de numărare de tip box-counting pentru imagini 2D. Pentru fiecare direcție, valorile presiunii „apei” virtuale aplicate asupra imaginilor depind de numărul de pixeli ai imaginii, precum și de dimensiunea la scară a cutiei de măsurare (box-counting). Percolația „apei” virtuale este simulată prin toți pixelii de pori conectați (pixelii negri), în fiecare direcție, în timp ce „apei” virtuale nu i se permite să curgă prin pixelii obstacol (pixelii albi). Zona de curgere a fluidului-țintă este apoi împărțită în cutii de dimensiuni egale în imagini și este notată ca $BS(k)$, unde k reprezintă numărul de partiții posibile în cutii ale unei imagini. Apoi, procentul de ocupare pentru fiecare dimensiune a casetei imaginii se măsoară direct pe imagini și se notează ca $OP(BS(k))$. Pentru fiecare dimensiune de cutie k , valoarea presiunii se calculează prin ecuația 4:

$$\sum_{k=1}^n OP(BS(k)) \times PR(BS(k), pc) \quad (4),$$

unde n este numărul de diviziuni posibile, iar $PR(BS(k), pc)$ reprezintă presiunea asupra centroidului casetei k pe scara de considerație.

Pentru a face ca valoarea succolarității să fie adimensională, valoarea de succolaritate este valoarea de ocupare a presiunii împărțită la valoarea maximă posibilă de ocupare a presiunii (ecuația 5):

$$\sigma(BS(k), dir) = \frac{\sum_{k=1}^n OP(BS(k)) \times PR(BS(k), pc)}{\sum_{k=1}^n OP(BS(k)) \times \max PR(BS(k), pc)} \quad (5),$$

unde dir reprezintă direcția, de exemplu, de la stânga la dreapta sau de la dreapta la stânga, de sus în jos sau de jos în sus, iar max valoarea maximă posibilă de ocupare a presiunii.

Succolaritatea variază între 0 și 1, reflectând permeabilitatea imaginii. Dacă o imagine conține atât pixeli albi de obstacol, cât și pixeli negri de percolare, valorile de succolaritate se vor situa între 0 și 1. 0 apare atunci când întreaga imagine este albă (imagine impermeabilă) sau când marginea din direcția de curgere este complet albă, împiedicând pătrunderea apei. 1 indică o curgere nerestricționată a fluidului când imaginea interioară este neagră.

Atât dimensiunea fractala box-counting, cât și lacunaritatea și succolaritatea s-au determinat folosind plugin-urile box-counting, lacunarity (Roy and Perfect) și succolarity din colecția de plugin-uri ComsysanJ (Complex Systems Analysis for ImageJ), versiunea 1.1.2 [35] pentru Fiji/ImageJ2 2.14.0/1.54h java 1.8.0_322 pe 64 de biți [36]. Numărul de casete pentru parametrii de regresie a fost setat la 10. Tipul de scanare selectat a fost raster.

Rezultate și discuții

Analiza fractală a suprafețelor ocupate de pădure din Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu a fost realizată pentru perioada 2000-2021. Au fost folosite imagini satelitare pentru determinarea valorilor și tendinței de evoluție a dimensiunii fractale, lacunarității și a succolarității, cu scopul de a evidenția efectele defrișărilor asupra resurselor forestiere (Figura 2, Figura 3).

Figura 4 prezintă o analiză comparativă a dimensiunii fractale (a), lacunarității (b) și succolarității (c) între Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu. Se observă două tipare distincte de defrișare, care afectează gradul de umplere a spațiului de către păduri (Figura 4a), heterogenitatea spațială (Figura 4b) sau compactarea și conectivitatea fragmentelor de pădure (Figura 4c).

Astfel, defrișările din Grupa Nordică [37], mult mai intense și extinse spațial, au determinat scăderea gradului de umplere a spațiului cu pădure, de la 1,94 la 1,89. În același timp, gradul de heterogenitate a distribuției spațiale a pădurilor a crescut de la 0,029 la 0,055, iar compactarea și

conectivitatea au scăzut pronunțat de la 0,76 la 0,59. Prin urmare, Grupa Nordică se caracterizează prin scăderea gradului de umplere a spațiului de către păduri, a gradului de compactare și conectivitate, generând o ușoară creștere a dezordinii spațiale.

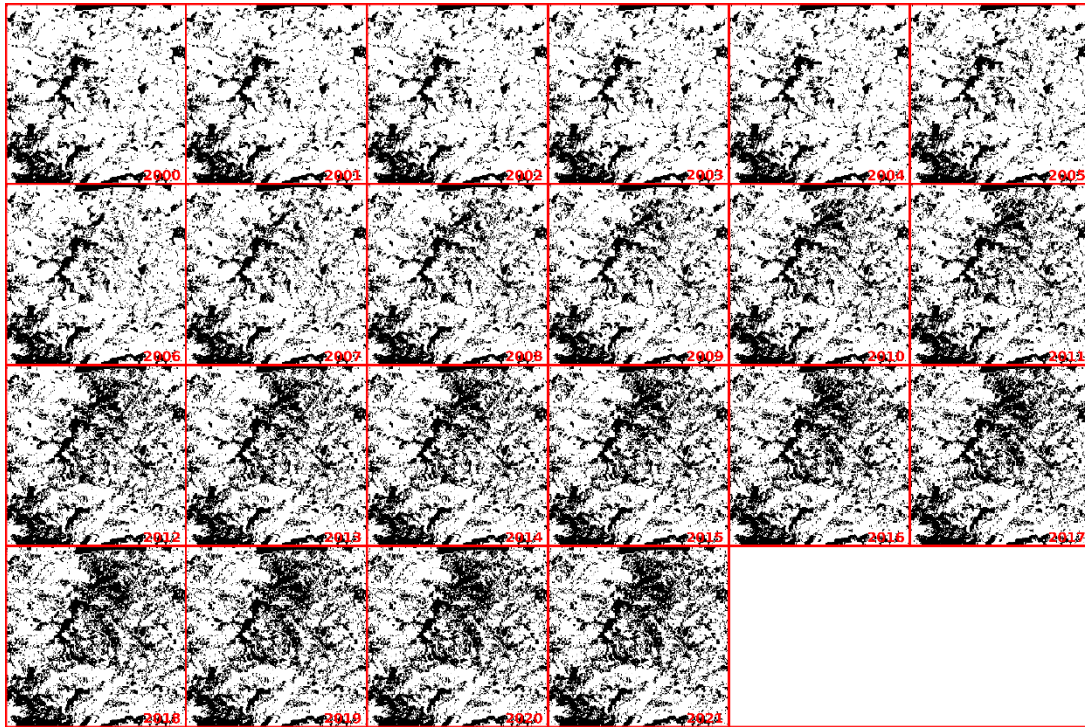


Fig. 2. Dinamica suprafețelor acoperite de pădure în Grupa Nordică a Carpaților Orientali în perioada 2000-2021

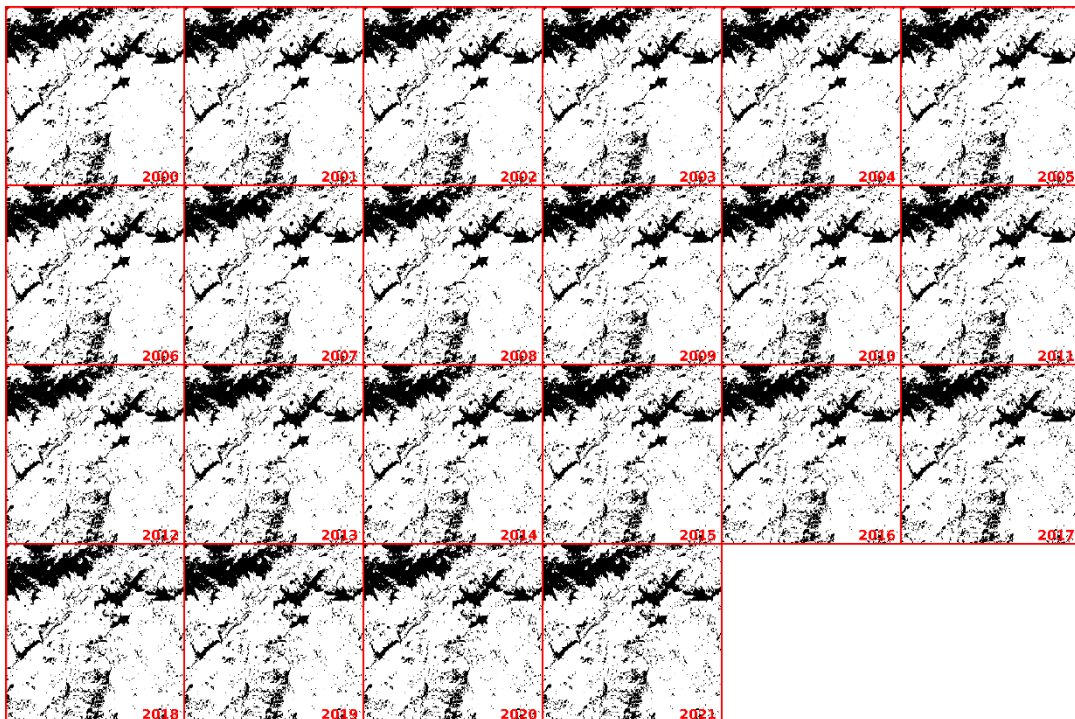


Fig. 3. Dinamica suprafețelor acoperite de pădure în Grupa Retezat-Godeanu în perioada 2000-2021

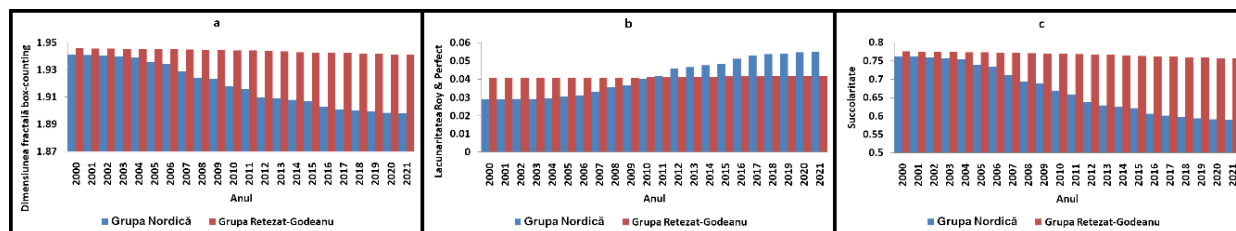


Fig. 4. Dimensiunea fractală, lacunaritatea și succolaritatea suprafețelor ocupate de pădure din Grupa Nordică a Carpaților Orientali (coloane albastre) și Grupa Retezat-Godeanu (coloane roșii) în perioada 2000-2021

Defrișările din Grupa Retezat, mult mai reduse cantitativ [17], au determinat o scădere a gradului de umplere a spațiului de la 1,96 la 1,94. Compactarea și conectivitatea s-au redus de la 0,78 la 0,76, în timp ce gradul de heterogenitate a crescut de la 0,041 la 0,042. S-a identificat astfel o relativă stabilitate.

Analiza succolarității poate ajuta în eforturile de reconstrucție ecologică prin identificarea zonelor care necesită conexiuni suplimentare între ele. Identificarea și crearea acestor coridoare ecologice sprijină continuitatea habitatelor și facilitează deplasarea speciilor, contribuind la conservarea biodiversității [16].

Combinarea celor trei măsuri fractale – dimensiunea fractală, lacunaritatea și succolaritatea – a fost utilizată în diverse contexte: pentru analiza biomaterialelor cu diferite tipuri de porozitate [38], pentru discriminarea între depozitul de fosfat cu un risc ridicat de perturbări și depozitul cu un risc scăzut [39], pentru a caracteriza structura microscopică a mediilor poroase [40, 41], pentru a analiza schimbările în modelele spațiale în funcție de dimensiunea scală [42] sau pentru a identifica cele trei tipuri de structuri de rețea ICC gastrică dintr-un stomac de șoarece transgenic, contribuind la înțelegerea funcționării și organizării sistemului digestiv [43]. Această abordare integrativă oferă o metodă robustă de analiză, permițând cercetătorilor să exploreze și să înțeleagă mai bine diversitatea fenomenelor și proceselor din diverse domenii [44].

Combinăția dintre dimensiunea fractală, lacunaritate și succolaritate, folosită în acest studiu, a avut scopul de a identifica impactul defrișărilor asupra pădurilor. Rezultatele obținute prin cele trei metrici fractale pot oferi un suport semnificativ în analiza biodiversității și în procesul de reconstrucție ecologică. Astfel, analiza fractală a suprafețelor ocupate de pădure din Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu poate evidenția schimbările în structura spațială a pădurilor ca urmare a defrișărilor. Aceste date pot fi folosite pentru a evalua impactul defrișărilor asupra biodiversității și a funcțiilor ecosistemelor. Prin analiza comparativă a dimensiunii fractale, lacunarității și succolarității între Grupa Nordică și Grupa Retezat se pot identifica diferențele în rata și tipul de defrișare între aceste două zone. Aceasta poate oferi informații esențiale pentru a înțelege modul în care practicile de gestionare a pădurilor influențează biodiversitatea și funcțiile ecosistemelor. Scăderea gradului de umplere a spațiului de către păduri și a conectivității fragmentelor de pădure în urma defrișărilor poate indica pierderea habitatelor și fragmentarea ecosistemelor. Aceste informații pot fi utile în planificarea și implementarea măsurilor de conservare a biodiversității și de refacere a habitatelor. Prin utilizarea imaginilor satelitare și a analizei fractale pe o perioadă de la 2000 la 2021, se pot observa tendințele în schimbările spațiale ale pădurilor în timp. Această monitorizare poate oferi date critice pentru înțelegerea dinamicii pe termen lung a ecosistemelor forestiere și pentru luarea deciziilor în managementul resurselor naturale.

În concluzie, aceste rezultate furnizează o bază solidă pentru evaluarea impactului defrișărilor asupra biodiversității și pentru elaborarea strategiilor de conservare și refacere a ecosistemelor forestiere în regiunile studiate.

Concluzii

Analiza fractală a suprafețelor ocupate de pădure a evidențiat schimbările semnificative în structura spațială a pădurilor din Grupa Nordică a Carpaților Orientali și Grupa Retezat-Godeanu în perioada 2000-2021. Defrișările, în special în Grupa Nordică, au avut un impact negativ asupra gradului de umplere a spațiului de către păduri, dar și asupra gradului de compactare și conectivitate, generând o creștere a dezordinii spațiale.

Integrarea dimensiunii fractale, lacunarității și succolarității în analiza suprafețelor ocupate de pădure oferă oportunitatea de a evalua complexitatea și diversitatea acestor sisteme într-un mod mai cuprinzător. Prin monitorizarea și evaluarea schimbărilor spațiale și structurale, se pot dezvolta și implementa strategii eficiente pentru conservarea biodiversității și regenerarea habitatelor afectate de intervenția umană. Prin gestionarea durabilă a resurselor forestiere și promovarea unei abordări integrate se poate contribui la protejarea și restabilirea echilibrului ecologic a ecosistemelor forestiere, chiar dacă presiunile antropice sunt în creștere.

Bibliografie:

1. NAVEH, Z. From Biodiversity to Ecodiversity: A Landscape-Ecology Approach to Conservation and Restoration. *Restoration Ecology* [online]. Septembrie 1994 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 2, nr. 3, pp. 180-189. DOI 10.1111/j.1526-100X.1994.tb00065.x (IF: 3.2).
2. HOBBS, Richard J., CRAMER, Viki A. Restoration Ecology: Interventionist Approaches for Restoring and Maintaining Ecosystem Function in the Face of Rapid Environmental Change. *Annual Review of Environment and Resources* [online]. Annual Reviews, Noiembrie 2008 [accesat la 3 februarie 2024], Vol. 33, nr. 1, pp. 39-61. DOI 10.1146/annurev.enviro.33.020107.113631 (IF: 16.4).
3. SUDING, Katharine N. Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* [online]. Annual Reviews, Decembrie 2011 [accesat la 3 februarie 2024], Vol. 42, nr. 1, pp. 465-487. DOI 10.1146/annurev-ecolsys-102710-145115 (IF: 11.8).
4. OLIVER, Tom H. et al. Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution* [online]. Noiembrie 2015 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 30, nr. 11, pp. 673-684. DOI 10.1016/j.tree.2015.08.009 (IF: 16.8).
5. PECL, Gretta T. et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* [online]. Martie 2017 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 355, nr. 6332, p. 9214. DOI 10.1126/science.aai9214 (IF: 56.9).
6. ZHANG, Ruiyang et al. Critical role of multidimensional biodiversity in contributing to ecosystem sustainability under global change. *Geography and Sustainability* [online]. Septembrie 2023, Vol. 4, nr. 3, pp. 232-243. DOI 10.1016/j.geosus.2023.05.002 (IF: 9.7).
7. MANDELBROT, Benoit B. The fractal geometry of nature. 3-lea ed. New York : W. H. Freeman and Comp., 1983.
8. FRONTIER, Serge. Applications of Fractal Theory to Ecology. In: LEGENDRE, Pierre, LEGENDRE, Louis (ed.), *Developments in Numerical Ecology* [online]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1987 [accesat la 4 februarie 2024], pp. 335-378. DOI 10.1007/978-3-642-70880-0_9.
9. MILNE, Bruce T. Measuring the fractal geometry of landscapes. *Applied Mathematics and Computation* [online]. Iulie 1988, Vol. 27, nr. 1, pp. 67-79. DOI 10.1016/0096-3003(88)90099-9 (IF: 4).
10. LI, Bai-Lian. Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. *Ecological Modelling* [online]. Iulie 2000, Vol. 132, nr. 1, pp. 33-50. DOI 10.1016/S0304-3800(00)00303-3 (IF: 3.1).
11. ALADOS, C.L. et al. Quantitative characterization of the regressive ecological succession by fractal analysis of plant spatial patterns. *Ecological Modelling* [online]. Mai 2003, Vol. 163, nr. 1, pp. 1-17. DOI 10.1016/S0304-3800(02)00294-6 (IF: 3.1).
12. HALLEY, J.M. et al. Uses and abuses of fractal methodology in ecology. *Ecology Letters* [online]. Martie 2004 [accesat 04.02.2024], Vol. 7, nr. 3, pp. 254-271. DOI 10.1111/j.1461-0248.2004.00568.x (IF: 8.8).

13. IMRE, A.R. și BOGAERT, J. The Fractal Dimension as a Measure of the Quality of Habitats. *Acta Biotheoretica* [online]. 2004 [accesat 04.02.2024], Vol. 52, nr. 1, pp. 41-56. DOI 10.1023/B:ACBI.0000015911.56850.0f (IF: 1.3).
14. USMANOV, Iskander Yu. et al. A Fractal Character of the Multidimensional Ecological Niche: Formation in Real Habitats in South Trans Urals. In: MAXIMOVA, Svetlana G. et al. (ed.), *Advances in Natural, Human-Made, and Coupled Human-Natural Systems Research*. vol. 252 [online]. Cham : Springer International Publishing, 2023 [accesat la 4 februarie 2024], pp. 107-119. (Lecture Notes in Networks and Systems). DOI 10.1007/978-3-030-78105-7_11.
15. ANDRONACHE, Ion C. et al. Fractal analysis for studying the evolution of forests. *Chaos, Solitons & Fractals* [online]. Octombrie 2016 [accesat 11.01.2024], Vol. 91, pp. 310-318. DOI 10.1016/j.chaos.2016.06.013 (IF: 7.8).
16. ANDRONACHE, Ion. Analysis of Forest Fragmentation and Connectivity Using Fractal Dimension and Succolarity. *Land* [online]. 2024, Vol. 13, nr. 2, p. 138. DOI 10.3390/land13020138. Dynamics of Land Use/Land Cover Change and Ecosystem Service Provision in a Rapidly Changing World II (IF: 3.9).
17. PEPTENATU, Daniel et al. A new fractal index to classify forest fragmentation and disorder. *Landscape Ecology* [online]. Iunie 2023 [accesat la 13 iunie 2023], Vol. 38, nr. 6, pp. 1373-1393. DOI 10.1007/s10980-023-01640-y (IF: 5.2).
18. KOVALENKO, Katya E., THOMAZ, Sidinei M. și WARFE, Danielle M. Habitat complexity: approaches and future directions. *Hydrobiologia* [online]. Aprilie 2012 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 685, nr. 1, p. 1-17. DOI 10.1007/s10750-011-0974-z (IF: 2.6).
19. GAO, Peichao et al. FraCL: A Tool for Characterizing the Fractality of Landscape Gradients from a New Perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. Octombrie 2019 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 8, nr. 10, p. 466. DOI 10.3390/ijgi8100466 (IF: 3.4).
20. NEWMAN, Erica A. et al. Scaling and Complexity in Landscape Ecology. *Frontiers in Ecology and Evolution* [online]. August 2019 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 7, p. 293. DOI 10.3389/fevo.2019.00293 (IF: 3).
21. LARUE, Elizabeth A et al. A theoretical framework for the ecological role of three-dimensional structural diversity. *Frontiers in Ecology and the Environment* [online]. Februarie 2023 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 21, nr. 1, pp. 4-13. DOI 10.1002/fee.2587 (IF: 10.3).
22. THEILER, James. Estimating fractal dimension. *Journal of the Optical Society of America A* [online]. Optica Publishing Group, Iunie 1990, Vol. 7, nr. 6, p. 1055-1073. DOI 10.1364/JOSAA.7.001055 (IF: 1.9).
23. XU, Tingbao, MOORE, Ian D. și GALLANT, John C. Fractals, fractal dimensions and landscapes – a review. *Geomorphology* [online]. Decembrie 1993, Vol. 8, nr. 4, pp. 245-262. DOI 10.1016/0169-555X(93)90022-T (IF: 3.9).
24. PLOTNICK, Roy E., GARDNER, Robert H., O'NEILL, Robert V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. *Landscape Ecology* [online]. Septembrie 1993 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 8, nr. 3, pp. 201-211. DOI 10.1007/BF00125351 (IF: 5.2).
25. PLOTNICK, Roy E. et al. Lacunarity analysis: A general technique for the analysis of spatial patterns. *Physical Review E* [online]. Mai 1996 [accesat la 4 februarie 2024], Vol. 53, nr. 5, pp. 5461-5468. DOI 10.1103/PhysRevE.53.5461 (IF: 2.4).
26. SMITH, T.G., LANGE, G.D., MARKS, W.B. Fractal methods and results in cellular morphology – dimensions, lacunarity and multifractals. *Journal of Neuroscience Methods* [online]. Noiembrie 1996, Vol. 69, nr. 2, pp. 123-136. DOI 10.1016/S0165-0270(96)00080-5 (IF: 3).
27. DE MELO, Rafael Heitor Correia, CONCI, Aura. How Succolarity could be used as another fractal measure in image analysis. *Telecommunication Systems* [online]. Martie 2013, Vol. 52, nr. 3, pp. 1643-1655. DOI 10.1007/s11235-011-9657-3 (IF: 2.5).
28. HANSEN, M. C. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science* [online]. American Association for the Advancement of Science, Noiembrie 2013 [accesat la 29 iunie 2022], Vol. 342, nr. 6160, pp. 850-853. DOI 10.1126/science.1244693 (IF: 56.9).
29. SARKAR, Nirupam, CHAUDHURI, B.B. An efficient approach to estimate fractal dimension of textural images. *Pattern Recognition* [online]. Septembrie 1992 [accesat la 11 ianuarie 2024], Vol. 25, nr. 9, pp. 1035-1041. DOI 10.1016/0031-3203(92)90066-R (IF: 8).
30. JIN, X.C., ONG, S.H., JAYASOORIAH. A practical method for estimating fractal dimension. *Pattern Recognition Letters* [online]. Mai 1995 [accesat la 11 ianuarie 2024], Vol. 16, nr. 5, pp. 457-464. DOI 10.1016/0167-8655(94)00119-N (IF: 5.1).

31. ROY, Ankur, PERFECT, Edmund. Lacunarity analyses of multifractal and natural grayscale patterns. *Fractals* [online]. World Scientific Publishing Co., Septembrie 2014 [accesat la 29 iunie 2022], Vol. 22, nr. 3, p. 1440003. DOI 10.1142/S0218348X14400039 (IF: 4.7).
32. RUSSELL, David A., HANSON, James D., OTT, Edward. Dimension of Strange Attractors. *Physical Review Letters* [online]. American Physical Society, Octombrie 1980, Vol. 45, nr. 14, p. 1175-1178. DOI 10.1103/PhysRevLett.45.1175 (IF: 8.6).
33. DI IEVA, Antonio et al. Fractal dimension as a quantitor of the microvasculature of normal and adenomatous pituitary tissue. *Journal of Anatomy* [online]. Noiembrie 2007 [accesat la 5 februarie 2024], Vol. 211, nr. 5, pp. 673-680. DOI 10.1111/j.1469-7580.2007.00804.x (IF: 2.4).
34. ALLAIN, C., CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical Review A* [online]. American Physical Society, Septembrie 1991, Vol. 44, nr. 6, pp. 3552-3558. DOI 10.1103/PhysRevA.44.3552 (IF: 2.9).
35. AHAMMER, Helmut et al. ComsysstanJ: A collection of Fiji/ImageJ2 plugins for nonlinear and complexity analysis in 1D, 2D and 3D. HAMMAD, Mohamed (ed.), *PLOS ONE* [online]. Octombrie 2023 [accesat la 11 ianuarie 2024], Vol. 18, nr. 10, p. 292217. DOI 10.1371/journal.pone.0292217 (IF: 3.7).
36. SCHINDELIN, Johannes et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* [online]. Iulie 2012, Vol. 9, nr. 7, p. 676-682. DOI 10.1038/nmeth.2019 (IF: 48).
37. DRĂGHICI, C.C. et al. Spatial evolution of forest areas in the northern Carpathian mountains of Romania. *Acta Montanistica Slovaca*. 2017, Vol. 22, nr. 2 (IF: 1.6).
38. N'DIAYE, Mambaye et al. Biomaterial porosity determined by fractal dimensions, succolarity and lacunarity on microcomputed tomographic images. *Materials Science and Engineering: C* [online]. Mai 2013, Vol. 33, nr. 4, pp. 2025-2030. DOI 10.1016/j.msec.2013.01.020 (IF: 7.9).
39. AYAD, Abderrahim, BAKKALI, Saad. Fractal Assessment of the Disturbances of Phosphate Series Using Lacunarity and Succolarity Analysis on Geoelectrical Images (Sidi Chennane, Morocco). *Complexity* [online]. Iulie 2019 [accesat la 9 februarie 2024], Vol. 2019, p. 1-12. DOI 10.1155/2019/9404567 (IF: 2.3).
40. XIA, Yuxuan et al. Fractal dimension, lacunarity and succolarity analyses on CT images of reservoir rocks for permeability prediction. *Journal of Hydrology* [online]. Decembrie 2019, Vol. 579, p. 124198. DOI 10.1016/j.jhydrol.2019.124198 (IF: 6.4).
41. XIA, Yuxuan, CAI, Jianchao, WEI, Wei. Fractal structural parameters from images: Fractal dimension, lacunarity, and succolarity. În: CAI, Jianchao, ZHANG, Liehui și WEI, Wei (ed.), *Modelling of Flow and Transport in Fractal Porous Media* [online]. [S. l.]: Elsevier, 1 ianuarie 2021, pp. 11-24. DOI 10.1016/B978-0-12-817797-6.00003-8.
42. MATOS, Robert S. et al. Correlating Structure and Morphology of Andiroba Leaf (*Carapa guianensis* Aubl.) by Microscopy and Fractal Theory Analyses. *Applied Sciences* [online]. Iunie 2021 [accesat la 9 februarie 2024], Vol. 11, nr. 13, p. 5848. DOI 10.3390/app11135848 (IF: 2.7).
43. MAH, Sue Ann et al. Three-Dimensional Fractal Analysis of the Interstitial Cells of Cajal Networks of Gastrointestinal Tissue Specimens. *Cellular and Molecular Bioengineering* [online]. Noiembrie 2023 [accesat la 9 februarie 2024]. DOI 10.1007/s12195-023-00789-5 (IF: 2.8).
44. DE MELO, Rafael Heitor Correia. Using fractal characteristics such as fractal dimension, lacunarity and succolarity to characterize texture patterns on images [online]. Master's Thesis. Fluminense : Federal Fluminense University. Rio de Janeiro, Brazil, 2007.
Disponibil: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/17146/Dissert-Rafael%20Melo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.