

Departamentul de Fizică Teoretică și Computațională
Universitatea Babeș-Bolyai



Rezumatul tezei de doctorat

**MODELE DIN FIZICA STATISTICĂ PENTRU
FENOMENE BIOLOGICE ȘI SOCIOLOGICE**

Derzsi Aranka

Conducător științific: Prof. Dr. Néda Zoltán

Cluj-Napoca

2012

Cuvinte cheie: sisteme ecologice, fizică statistică, caracteristici macroecologice, teoria neutrală, modele neutrale, modele spațial explicite, rețele, rețele sociale, rețele aleatoare.

Cuprins

Introducere.....	1
Sinteza părții I – Studiul și modelarea sistemelor ecologice.....	3
Caracteristici macroecologice.....	3
Modelarea sistemelor ecologice.....	4
Teorii pentru descrierea abundenței speciilor și modelarea neutrală în ecologie	5
Un model neutral simplu spațial explicit	6
Modele neutrale bazate pe difuzia semințelor	8
Sinteza părții II – Studiul și modelarea rețelelor sociale.....	15
Teoria rețelelor aleatoare	15
Studiul rețelei de mobilitate Erasmus	16
Concluzii	20
Referințe bibliografice selectate.....	22
Lista de publicații	24

Introducere

Fizica statistică, folosind instrumente matematice ale teoriei probabilităților și a statisticii matematice pentru a descrie ansambluri mari de elemente interactive, în mod tradițional se ocupă cu probleme legate de domeniul fizicii. Prima aplicație a metodelor statistice în fizică a fost destinată explicării proprietăților macroscopice ale materialelor pornind de la caracteristici microscopice ale atomilor și moleculelor. În prezent, fizica statistică apare frecvent în domenii care – la prima vedere – nu au nimic de-a face cu fizica. Economia și finanțele, biologia și ecologia, psihologia și medicina, sociologia și muzica sunt doar unele domenii, printre altele, în cazul cărora se poate utiliza metodele fizicii statistice. În cadrul domeniilor menționate mai sus, se pot găsi exemple pentru sisteme formate dintr-un număr mare de elemente interactive care ne amintesc de "auto-organizare", "comportament critic" sau "tranziții de fază", termeni cunoscuți din fizica statistică. Din acest punct de vedere, utilizarea interdisciplinară a modelelor fizicii statistice în probleme din diverse domenii este mai ușor de argumentată. Prezenta teză urmărește această idee prin studiul unor sisteme complexe din domeniul biologiei și a sociologiei. Un model simplu spațial explicit având doar doi parametri și un model bazat pe difuzia aleatoare a semințelor, a fost introdus în cadrul studiilor noastre pentru a descrie diversitatea speciilor observate în pădurile tropicale. Pădurile tropicale sunt ecosisteme care cuprind un număr mare de specii similare din punct de vedere ecologic, denumite în literatură, comunități ecologice neutrale. Aceste modele sunt studiate prin simulări de tip Monte Carlo. Ca și sistem sociologic, a fost studiat rețeaua de colaborare generată de mobilități Erasmus ale studenților din Europa. Diferite variante ale rețelei au fost analizate și modelate.

Structura tezei

Teza are două părți principale: (I) Studiul și modelarea sistemelor ecologice și (II) Studiul și modelare rețelelor sociale.

În prima parte a tezei, primul capitol este dedicat clarificării conceptelor ecologice de bază și introducerii principalelor abordări teoretice pentru descrierea ecosistemelor. Al doilea capitol parcurge istoria descrierii teoretice a ecosistemelor, pornind de la modele simple statistice până la abordări complexe care includ procese biologice. Tot în

acest capitol este prezentat și dezvoltarea modelelor neutrale în ecologie. Al treilea capitol prezintă o comunitate ecologică de tip neutral și un set de date experimentale legate de aceasta, care constituie un punct de referință în analiza performanței modelelor elaborate. În capitolul al patrulea și al cincilea sunt introduse și studiate modele originale neutrale pentru simularea diversității arborilor tropicali: un model neutral simplu spațial explicit și modele bazate pe dinamica de difuzie a semințelor.

Partea a doua a tezei, având două capitole, descrie studiul rețelelor aleatoare. O introducere generală în teoria rețelelor (în capitolul șase) este urmată de prezentarea și studiul unei rețele sociale bazată pe mobilități Erasmus (în capitolul șapte). Tot în capitolul șapte este prezentată modelarea acestei rețele.

Teza se încheie cu o parte de concluzii, bibliografie și o listă de publicații.

Sinteza părții I – Studiul și modelarea sistemelor ecologice

Ecologia este un domeniu al biologiei care se ocupă cu cercetarea sistemelor ecologice. Sistemele ecologice sunt unități spațiale ale pământului, părți interactive ale mediului înconjurător, care conțin toate organismele vii (component biotic) și componentele mediului înconjurător (component abiotic, cum ar fi umiditatea din sol, intensitatea luminii soarelui, temperatura aerului, viteza vântului, etc.). Sistemele ecologice prezintă diferite caracteristici ecologice cum ar fi abundența organismelor și speciilor, distribuția spațială a speciilor, diversitatea speciilor. Caracteristicile ecologice observate depind de scara temporală și spațială în care sistemul ecologic dat este studiat. Macroecologia [1] studiază relațiile dintre organisme și mediul lor pe scări spațiale mari, cu scopul de a caracteriza și de a explica abundența, distribuția și diversitatea acestora [2]. Comunitățile ecologice alcătuite din organisme dintr-un nivel trofic, care conțin un număr mare de specii similare din punct de vedere ecologic și care concurează numai pentru resursele disponibile, sunt denumite sisteme neutrale. Modele statistice, bazate pe ipoteze simple, sunt deosebit de adecvate pentru a studia astfel de comunități. În prima parte a tezei sunt prezentate modele neutrale spațial explicite – un model simplu neutral cu doi parametri liberi [3] și modele bazate pe difuzia semințelor [4] – menite să descrie caracteristicile macroecologice observate într-o comunitate ecologică neutrală, cum ar fi parcela de arbori tropicali cartografiată pe insula Barro Colorado (BCI) [5].

Caracteristici macroecologice

Cele mai importante mărimi macroecologice sunt diversitatea biologică, relația dintre numărul de specii și mărimea teritoriului (species-area relationship, SAR), distribuția spațială a speciilor și abundența relativă a speciilor (relative species abundance, RSA).

Diversitatea biologică sau biodiversitatea reprezintă varietatea de forme de viață într-o anumită zonă. Pentru măsurarea biodiversității trei indici de diversitate sunt utilizate [6]: diversitatea α (de obicei este definită ca numărul de specii diferite într-un

ecosistem dat), diversitate β (compară biodiversitatea diferitelor ecosisteme), și diversitatea γ (descrie diversitatea speciilor pe scări geografice).

O anumită regiune este caracterizată prin relația SAR, fiind o relație dintre teritoriul habitatului și numărul de specii diferite găsite pe acest teritoriu, este unul dintre cele mai documentate mărimi în macroecologie [7].

Distribuția spațială a speciilor este definită de pozițiile spațiale ale indivizilor unei specii date. Această mărime ecologică poate fi caracterizată prin funcția de autocorelație spațială (spatial autocorrelation function, SAF) [3]. În general, caracteristicile distribuției spațiale a speciilor nu sunt statice, pozițiile lor spațiale pot schimba în funcție de schimbările condițiilor mediului înconjurător (schimbări sezoniere, schimbarea resurselor disponibile, etc.).

Printre caracteristicile macroecologice importante, abundența relativă a speciilor este cea mai studiată. Această caracteristică arată cât de abundent este o specie în comparație cu alte specii din ecosistemul studiat [8]. RSA ne indică frecvența speciilor cu o anumită abundență. În general, majoritatea speciilor este reprezentată de un număr foarte mic de indivizi și există doar câteva specii cu un număr mare de indivizi. Există diferite metode de a reprezenta RSA: (i) histograma de frecvențe sau graficul de tip Preston [9], (ii) curba rang-abundență sau grafic de tip Whittaker [10], (iii) densitate de probabilitate pentru a găsi o specie cu o abundență dată.

Modelarea sistemelor ecologice

Există două abordări principale referitoare la natura comunităților ecologice: abordarea ansamblu de nișe [1] și abordarea ansamblu de dispersie [8].

Termenul nișe în ecologie descrie rolul unei specii în mediul în care există, fiind perceput ca o totalitate a factorilor abiotici și biotici care definesc viața organismelor unei specii. Teoria clasică de nișe în ecologie se bazează pe principiul de excludere competitivă. Acest principiu, adesea numit legea excluderii competitive Gause [11], afirmă că două specii care trăiesc în același habitat (cu condiții constante) și concurează pentru aceleași resurse, nu pot coexista pentru o lungă perioadă de timp. Astfel va avea loc o partiționare nișe a sistemului, prin urmare fiecare specie devine cel mai bun competitor în propria sa nișe ecologică. În abordarea de ansamblu nișe, sistemele ecologice sunt sisteme închise, stabile, fiind într-o stare de echilibru interactiv a speciilor, fiecare nișe fiind ocupat de o singură specie. În aceste condiții este greu perturbarea echilibrului prin apariția unei noi specii.

Teoria neutrală în ecologie, introdusă de Stephen Hubbell [8], a primit multă atenție datorită ipotezelor ei de bază. Această abordare presupune echivalența funcțională a speciilor și consideră că indivizii unui ecosistem, compus din organisme ale unui singur nivel trofic, respectă aceleași reguli dinamice, indiferent de specia din care fac parte. Spre deosebire de teoria niche, care are în centru aptitudinea genetică a speciilor, teoria neutrală atribuie rolul cheie întâmplărilor aleatorii în dezvoltarea caracteristicilor macroecologice observate. Această teorie permite pentru mai multe specii să ocupe același niche ecologic pentru o perioadă de timp mai lungă. Astfel, noi specii pot să apară în sistem. Din acest punct de vedere comunitățile ecologice nu mai sunt în echilibru, ele sunt sisteme complexe deschise și în schimbare continuă, influențate de speciație aleatoare, dispariție, difuzie și drift ecologic [8]. Trebuie subliniat faptul că principiul neutralității se poate aplica în cazul unor ecosisteme cu specii dintr-un singur nivel trofic (de exemplu comunitățile de plancton, păduri tropicale, recifuri de corali), care sunt alcătuite din specii concurente foarte similare, folosind aceleași resurse disponibile. Modelele care descriu astfel de comunități neutrale, bazate pe ipoteza echivalenței funcționale a speciilor, sunt numite modele neutrale.

Teorii pentru descrierea abundenței speciilor și modelarea neutrală în ecologie

Majoritatea abordărilor teoretice pentru descrierea ecosistemelor concentrează asupra reproducerii și explicării distribuției de abundență a speciilor în diferite ecosisteme. Primele încercări de a descrie abundența speciilor a constat în abordări inductive: modele matematice au fost elaborate pe baza distribuțiilor după abundență a speciilor observate sau au fost propuse reguli pentru împărțirea resurselor disponibile între specii. Aceste modele nu explică originea caracteristicilor studiate și nu dezvăluie procesele biologice care stau la baza acestora. Spre deosebire de modelele statistice ale abundenței speciilor, modelele dinamice ale comunităților ecologice includ și procese demografice și dinamica sistemului. Ele conțin procesele fundamentale ale nașterii, morții și dispersiei. Modelele neutrale, de asemenea, fac parte din grupul modelelor dinamice. În ciuda simplității lor uimitoare, modelele neutrale au produs rezultate rezonabile pentru unii taxoni [8, 12]. Cu toate aceste succese, ipoteza echivalenței funcționale a organismelor individuali indiferent de specie, a provocat dezbateri serioase asupra teoriei în rândul ecologiștilor. În ultima vreme, abordarea neutrală este acceptată mult

mai mult ca un model nul pentru dinamica unei comunități și sunt încercări de a o aduce mai aproape de teoria ansamblu niche [13].

În ultimul deceniu, o serie de modele bazate pe modelul neutral al lui Hubbell [8] au fost elaborate [14]. În aceste modele, numite modele neutrale spațial implicite sau modele de tip "mean-field", spațialitatea indivizilor nu este relevantă. Recent, modele neutrale spațiale explicite au fost introduse [3, 4, 15, 16]. Aceste modele pot lua în considerare procesele dependente de distanța între indivizi și să includă ipoteze mai realiste pentru dinamica sistemului.

Un model neutral simplu spațial explicit

În cadrul tezei, un model neutral simplu spațial explicit cu doi parametri a fost elaborat [3]. Scopul era descrierea caracteristicilor ecologice măsurate în cazul ecosistemului tropical BCI [5]. Acest model este inspirat de modelul clasic de alegător (voter model) [17] și modelul neutral spațial explicit a lui Zillio având un singur parametru [16].

În model o comunitate locală este considerată în interacțiune cu o sursă externă de specii, numită metacomunitate. Spațiul comunității locale este modelat cu ajutorul unei rețele pătratice predefinită, indivizii sunt așezați pe punctele grilei. Se presupune că fiecare punct a grilei este tot timpul ocupat de un individ, deci numărul indivizilor N este constant în comunitatea locală.

Diferitele specii ale ecosistemului sunt considerate ca și stări Potts. Inițial, o stare Potts este alocat aleator pentru fiecare punct pe grilă. Numărul de stări posibile este W care corespunde numărului de specii în metacomunitate. La fiecare pas discret de timp un punct al grilei este ales aleator și starea lui este schimbată, acest proces reprezentând moartea unui individ. Locul vacant creat de moartea individului este ocupat imediat de un urmaș al unui individ din interiorul sau din afara comunității locale. Specia noului individ este determinată aleator folosind parametrii p și q :

- cu probabilitate p , specia noului individ va fi aceeași ca specia unui individ ales aleator în comunitate;
- cu probabilitate q , o specie din metacomunitate va ocupa punctul vacant al grilei;
- cu probabilitate $1-p-q$, noua specie aleasă va fi cel al unui vecin dintre cei 8 vecini Moore.

Pașii de mai sus se repeta până când se obține un echilibru dinamic în sistem.

Datele experimentale sunt prelucrate din recensământul BCI de 50 ha [5]. Un teritoriu de 25 ha din partea de est a teritoriului integral este studiat. Acest teritoriu de $500 \times 500 \text{ m}^2$ a conținut în anul 1995 în total 112543 de arbori și arbuști cu un diametru

de cel puțin 1 cm. Numărul total de specii în această comunitate ecologică este aproximativ 270. O altă caracteristică a acestei comunități este comportamentul scale-free a curbei SAR în limita teritoriilor mari (pentru recensământuri din ani diferiți s-au obținut exponenți între 0,14 și 0,16). Distribuția spațială a indivizilor aparținând de o anumită specie este caracterizată de o funcție de autocorelație spațială de tip lege de putere.

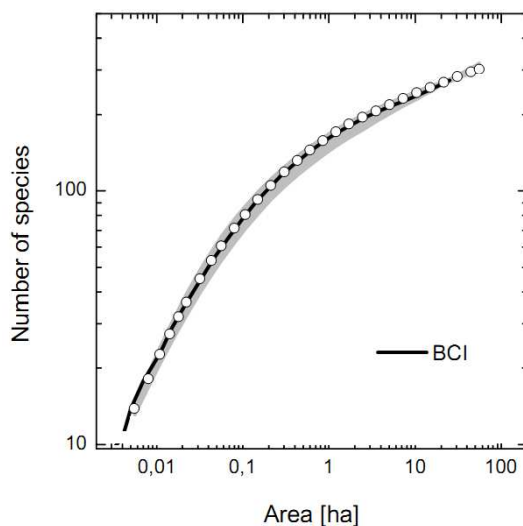


Figura 1. Curbe SAR: compararea datelor simulate (zona gri hașurată) cu cele experimentale (linia neagră). Zona hașurată corespunde unui set de 50 de simulări, și reprezintă valoarea medie \pm două abateri standard. Cercurile albe reprezintă rezultatele simulării care coincid cu cele experimentale. Parametrii simulării: $p=0,3$ și $q=1,3 \times 10^{-4}$. Datele experimentale sunt din recensământul BCI (anul recensământului: 1995).

Modelul s-a studiat prin simulări de tip Monte Carlo. Au fost determinate valorile parametrilor p și q pentru care numărul de specii, abundența relativă a speciilor (RSA), curba SAR și distribuția spațială a indivizilor aparținând de o anumită specie sunt în conformitate cu datele din BCI.

Pentru valori realiste ale parametrilor p și q (valorile optime fiind 0,3 și $1,3 \times 10^{-4}$ respectiv), modelul reproduce curba SAR (Fig. 1) și curba RSA (Fig. 1) a comunității BCI. Modelul nu redă însă variația de tip lege de putere a funcției de autocorelație spațială pentru indivizii unei specii. Acest rezultat sugerează că în realitate interacțiunile la distanțe mari pot fi mai importante decât cele considerate în această abordare simplă.

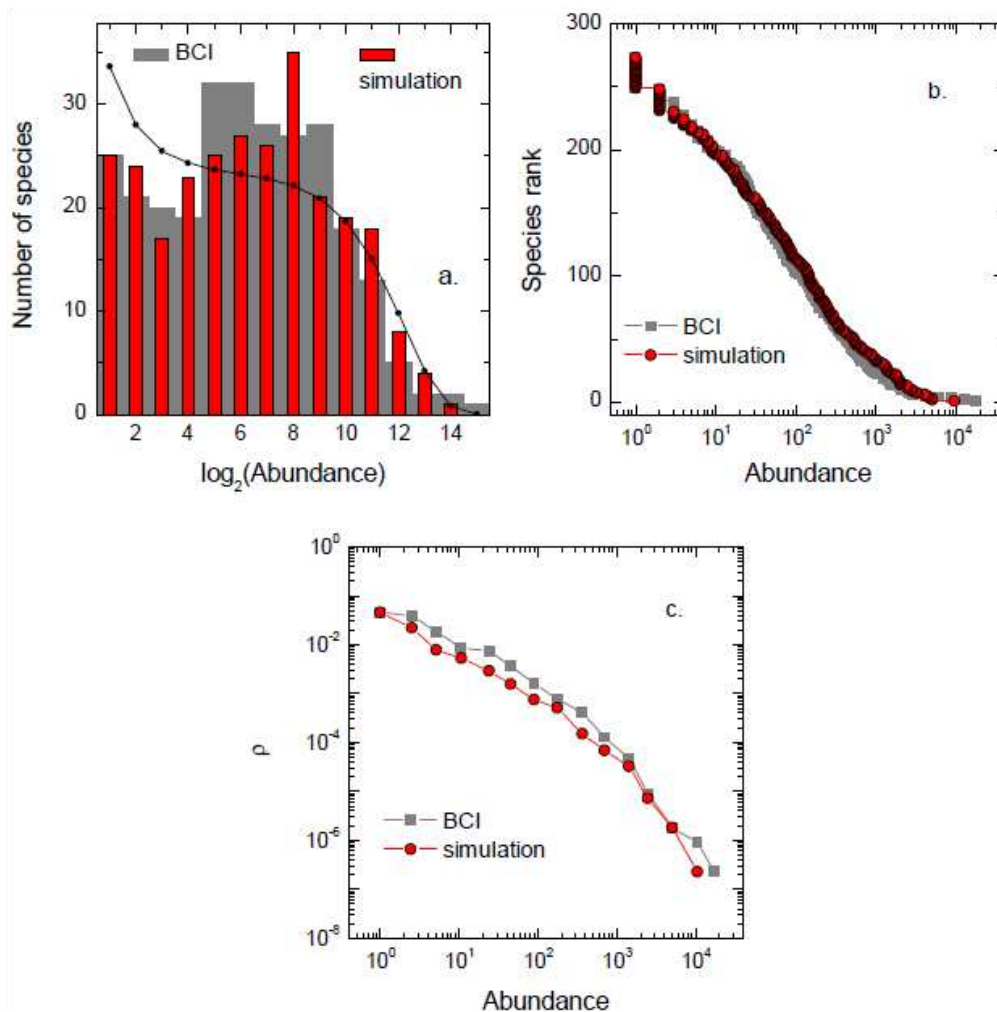


Figura 2. Rezultatele simulării pentru curba RSA în comparație cu datele măsurate (gri) și prognozele seriei logaritmice Fisher pentru $\alpha=33,64$ (linie neagră). (a) graficul de tip Preston, (b) curba rang-abundență și (c) densitatea de probabilitate. Parametrii de simulare: $p=0,3$ și $q=1,3 \times 10^{-4}$. Date experimentale: recensământ BCI (anul recensământului: 1995).

În ciuda simplității sale, modelul reproduce cu succes majoritatea caracteristicilor macroecologice al BCI. Sunt însă necesare modele mai complexe pentru a înțelege pe deplin toate aspectele legate de o astfel de comunitate complexă.

Modele neutrale bazate pe difuzia semințelor

Difuzia semințelor (seed dispersal) este împrăștierea semințelor față de organismul părinte. În cazul comunităților de plante, difuzia semințelor asigură migrația speciilor și

face posibil că ele să ajunge la locurile favorabile pentru supraviețuirea și reproducerea lor. Prin urmare, acest proces are un rol important în menținerea diversității speciilor. În comunitățile ecologice reale – în care transportul de semințe este efectuat de vânt sau de gravitație, prin apă sau de animale – semințele pot călători distanțe lungi.

În teza s-a propus un model pentru a descrie difuzia semințelor într-o comunitate ecologică. Considerând o comunitate ecologică care ocupă o suprafață de $L \times L$ și conține indivizi din specii diferite, se presupune că din când în când indivizii din comunitate emit un anumit număr de semințe care se împrăștie în spațiu. În plus, se presupune că (i) fiecare individ emite același număr de semințe la fiecare pas de timp, (ii) semințele trăiesc W pași de timp (perioadă de supraviețuire), (iii) toate semințele au aceeași constantă de difuzie și aceeași perioadă de supraviețuire W .

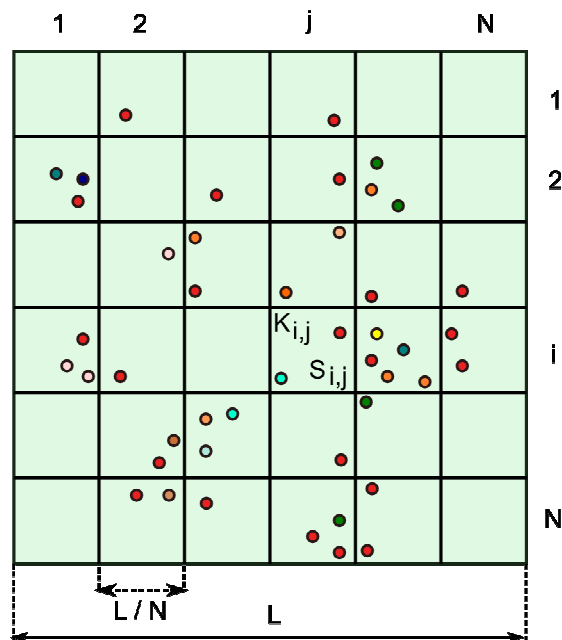


Figura 3. Imaginea schematică a comunității locale (având o suprafață de $L \times L$ cu o grilă uniformă de dimensiune $N \times N$). Cercurile pline corespund pozițiilor indivizilor. Fiecare celulă a rețelei, etichetată de indicii (i, j) , conține un anumit număr de indivizi ($K_{i,j}$) care aparțin de $S_{i,j}$ specii diferite.

Regiunea spațială $L \times L$ este împărțită în regiuni mici prin definirea unui grilaj uniform pătrat de dimensiune $N \times N$. Imaginea schematică a comunității locale și grila alocată este prezentată în Fig. 3. Fiecare celulă conține un anumit număr de indivizi, $K_{i,j}$, aparținând la $S_{i,j}$ specii diferite. În fiecare celulă se pot găsi și semințe cu origine din alte celule. $Q_{ij}(k, l)$ reprezintă numărul de semințe în celula (i, j) provenind din celula (k, l) .

Este considerată o descriere statistică a distribuției spațiale a semințelor. Se presupune mișcare aleatoare a semințelor. În unitatea de timp o sămânță poate face un pas de lungime L/N , trecând aleatoriu la o celula vecină. Valorile $Q_{ij}(k,l)$ sunt calculate pentru fiecare pereche de celule, aplicând legile mișcării aleatoare simple.

Primul model neutral bazat pe difuzia semințelor

Un model neutral spațial explicit bazat pe procesul de difuzie a semințelor a fost elaborat cu scopul de a reproduce caracteristicile macroecologice observate în BCI. În acest model o comunitate locală este considerată încorporată într-o metacomunitate cu un număr de U specii. Două procese sunt incluse în dinamica modelului, dispersia semințelor capabile de creștere și speciația, parametrii care reglementează aceste procese sunt W și q respectiv.

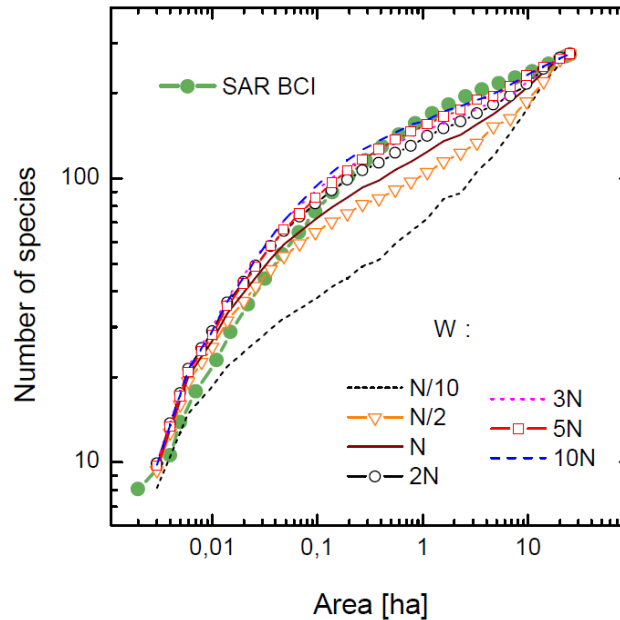


Figura 4. Curbe SAR. Rezultatele simulărilor (linii diferite și linii cu simboluri goale) sunt prezentate pentru diferite valori ale perioadei de supraviețuire W a semințelor. Dimensiunea grilei și rata de speciație sunt fixate: $N=100$ și $q=3,1 \times 10^{-4}$. Numărul total de specii este de 273. Linia continuă cu cercuri pline arată curba SAR pentru date BCI (anul recensământului: 1995).

Indivizii comunității locale sunt aranjate spațial în conformitate cu poziția indivizilor în terenul experimental. O grilă uniformă $N \times N$ este construită pe comunitatea locală și cantitățile $Q_{i,j}(k,l)$ sunt definite pentru fiecare pereche de celule $(i,j), (k,l) \in N \times N$. Se presupune ca din când în când un individ dispare din comunitatea locală și

locul lui este luat de către un individ nou. Ipoteza de bază este că originea acestui individ nou este o sămânță din vecinătatea locului vacant. În vecinătatea locului vacant se pot găsi multe semințe, eliberate de către indivizi aflați în diferite poziții în comunitatea locală. Se presupune că individul nou are ca origine o sămânță selectată aleatoriu din grupul de semințe acumulate în jurul locului vacant. Locul vacant poate fi umplut – cu șanse mai mici – de către un individ cu origine din afara comunității locale (procesul denumit imigrație).

Dinamica sistemului este definită de următoarele reguli:

- la fiecare pas de timp un individ este ales aleator; acest individ este considerat individ mort și un loc vacant este creat la poziția lui (în celula (i,j));
- cu probabilitate q , locul vacant la (i,j) este ocupat de o specie selectată aleatoriu din sursa de specii U ;
- cu probabilitate $1-q$, locul vacant la (i,j) este ocupat de un urmaș al unui individ prezent în comunitate.

Pașii modelului se repetă până când un echilibru dinamic al sistemului este atins. Pentru o rată de speciație de $q=3,1 \times 10^{-4}$, simularea modelului converge către un număr de specii în concordanță cu cel observat în BCI. Presupunând o distanță maximă de supraviețuire a semințelor în jur de 2500 m, modelul produce rezultate în acord cu caracteristicile ecologice experimentale: scalarea SAR și distribuția după abundență a speciilor sunt reproduse (Fig. 4 și Fig. 5), funcția de autocorelație în cazul speciilor abundente prezintă comportamentul de tip lege de putere în limita distanțelor mici.

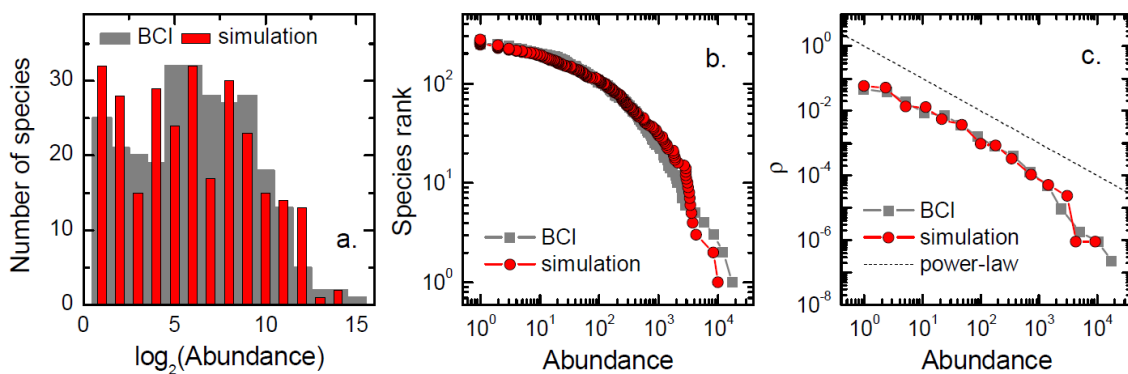


Figura 5. Abundența relativă a speciilor. Distribuția RSA este prezentată în moduri diferite: (a) graficul de tip Preston, (b) densitate de probabilitate și (c) curba rang-abundență. Rezultatele simulărilor sunt obținute pentru $N=100$ (dimensiunea grilei), $W=500$ (perioadă de supraviețuire a semințelor) și $q=3,1 \times 10^{-4}$ (rata de speciației). Datele experimentale BCI sunt cele din anul 1995.

Evident, modelul neglijează multe procese ecologice existente. Cu toate acestea, rezultatele obținute sugerează faptul că forțele primare responsabile pentru caracteristicile ecologice observate sunt capturate cu succes.

Al doilea model neutral bazat pe difuzia semințelor

A fost elaborat un alt model neutral spațial explicit bazat pe procesul de împrăștiere a semințelor [4]. Acest model are trei parametri: distanța maximă de împrăștiere a semințelor (W), probabilitatea de speciație în sistem (q) și dimensiunea metacomunității (M). Folosind acest model pentru a descrie caracteristicile macroecologice ale comunității de arbori tropicale, doi parametri a modelului (rata speciației și dimensiunea metacomunității) sunt fixate la valorile caracteristice ale comunității reale obținându-se astfel un model cu un singur parametru ajustabil.

Prin urmare, toate mărimile macroecologice relevante sunt fitate cu un singur parametru, perioada de supraviețuire a semințelor. Diferența față de primul model este ca în acest model indivizii comunității locale sunt aranjate pe o grilă pătratică de dimensiuni $N \times N$, fiecare punct al rețelei reprezentând un singur individ. Metacomunitatea, de asemenea, este definită în mod spațial explicit, datorită tehnicii de simulare înapoi în timp (backward simulation method) [18].

Dinamica modelului este definită de următoarele reguli:

- La fiecare pas un individ este selectat aleator din toate liniile de descendență active la momentul respectiv. Este selectat individul cel mai recent născut a cărui origine trebuie determinat.
- Cu probabilitatea q , se realizează speciația într-o linie de descendență. În cazul în care are loc o speciație, linia de descendență este oprită și individul selectat este considerat a fi rădăcina unei noi specii;
- Cu probabilitatea $1-q$, un individ părinte este definit pentru individul selectat. Poziția părintelui este aleasă urmând dispersia spațială a semințelor.

În procesul de selectare a părintelui, sunt luate în considerare valorile $Q_{i,j}(k,l)$, care determină funcția de împrăștiere.

Rezultatele obținute pentru $W=1700$ și $q=1,0 \times 10^{-5}$ sunt acceptabile pentru caracteristicile ecologice studiate (Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8).

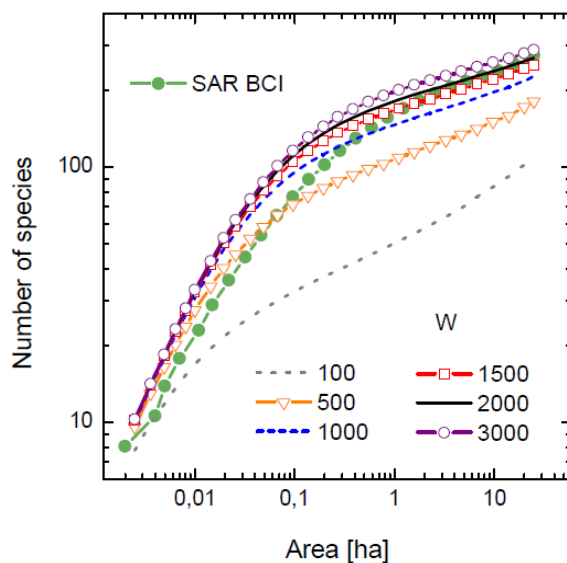


Figura 6. Curbe SAR. Sunt prezentate rezultatele simulărilor pentru diferite valori ale perioadei de supraviețuire a semințelor W . Rata speciației este fixată la $q=1,0 \times 10^{-5}$. Linia continuă cu cercurile umplute prezintă curba SAR pentru recensământul BCI din anul 1995.

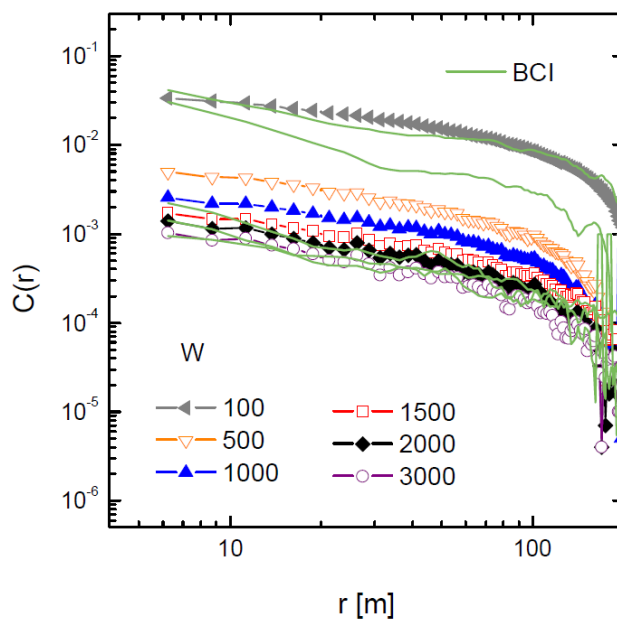


Figura 7. Funcțiile de autocorelație spațiale ale speciilor abundente. Rezultatele simulărilor (linii cu simboluri) sunt prezentate pentru diferite valori ale perioadei de supraviețuire a semințelor W . Rata speciației este fixată la $q=1,0 \times 10^{-5}$. Rezultatele obținute pentru cele mai abundente cinci specii din datele recensământului BCI sunt trasate cu linii.

Desigur, nici una dintre mărimile macroecologice relevante este reprodusă perfect. Nu ne putem aștepta acest lucru de la un model neutral cu un singur parametru. Punctul forte al modelului este că un model simplu cu un parametru liber descrie acceptabil un fenomen complex. În zilele noastre, abordările neutrale sunt tot mai mult acceptate ca și modele nule pentru dinamica comunităților ecologice. Elemente de tip ansamblu niche sunt însă necesare pentru a obține o descriere mai realistă a sistemelor ecologice. Rezultatele abordărilor noastre confirmă acest punct de vedere.

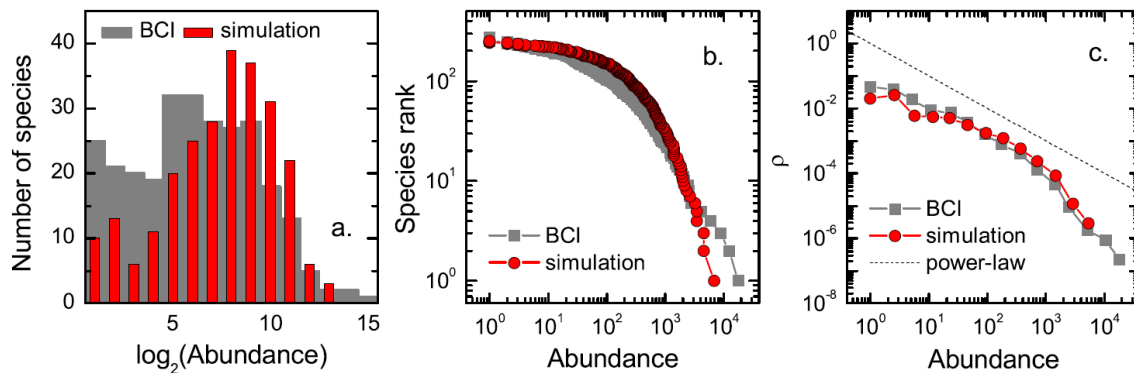


Figura 8. Abundența relativă a speciilor. RSA este prezentat în diferite moduri: (a) grafic de tip Preston, (b) funcție rang-abundență și (c) densitate de probabilitate. Rezultatele simulărilor sunt prezentate pentru o perioadă de supraviețuire a semințelor $W=1700$ de pași și rata speciației $q=1,0 \times 10^{-5}$. Sunt prezentate și rezultatele experimentale obținute pentru comunitatea BCI.

Sinteza părții II – Studiul și modelarea rețelelor sociale

Rețelele sunt sisteme formate din elemente conectate. Dezvoltarea infrastructurii computaționale și accesul la baze de date mari digitalizate referitoare la diferite sisteme sociale, naturale și artificiale în ultimii decenii, au dus la o nouă viziune asupra rețelelor. S-a realizat că rețelele apar în toate sisteme complexe de la nivelul microscopic până la dimensiuni globale.

În rețelele sociale nodurile (agenții) corespund de indivizi și legăturile (linkurile) sunt diferite interacțiuni între ele. Studiul rețelelor sociale pune accent pe investigarea interconectării indivizilor (connectivity patterns) și poziția indivizilor în aceste rețele (centrality patterns). Primele studii în acest domeniu au fost realizate în cadrul științelor sociale. Investigarea structurii și dinamicii interacțiunilor umane este o temă de cercetare interdisciplinară actuală. Sistemele investigate au evaluat de la grupuri mici de oameni la sisteme sociale la scară largă.

Ca un studiu original în această tematică, în a doua parte a tezei o rețea socială completă este investigată. Rețeaua aceasta este definită de mobilitățile studențești internaționale în cadrul programului Erasmus. Rețeaua bipartită rezultantă din aceste mobilități este investigată pentru anul 2003. Modele simple au fost propuse pentru a reproduce caracteristicile observate [19].

Teoria rețelelor aleatoare

Studierea rețelelor are ca scop analiza și modelarea structurii, evoluția și dinamica acestora pentru a dezvălui proprietățile statistice relevante și a propune modele care prezic comportamentul lor în viitor. Cele mai importante măsuri topologice sunt: lungimea drumului mediu, coeficientul de clusterizare și distribuția linkurilor. Pentru a descrie structurile observate în lumea reală s-au elaborat diferite modele. Ele pot fi organizate în trei grupuri: (i) rețele aleatoare simple (modelul de tip Erdős-Rényi) [20], (ii) rețele small-world (modelul de tip Watts-Strogatz) [21] și rețele scale-free (modelul de tip Barabási-Albert) [22, 23]. Modelele care se încadrează în grupul rețelelor aleatoare simple și rețelelor small-world se concentrează doar asupra reproducerii

topologiei rețelei considerând un număr constant de noduri și conectare aleatoare ale acestora. Modelele de rețea scale-free s-au născut considerând evoluția rețelei, presupunând creșterea sistemului și conectare preferențială a nodurilor.

Studiul rețelei de mobilitate Erasmus

S-a studiat o rețea socială, definită de mobilități Erasmus (rețea ESM). Rețea se bazează pe schimburi de studenți între universitățile europene: nodurile rețelei sunt universitățile implicate în schimbul Erasmus, link-uri sunt mobilitățile studenților între ele. Această rețea reflectă rețea de conexiuni profesionale între profesori și cercetători care lucrează la universități europene. Baza de date studiată de noi conține informații referitoare la 134330 mobilități în cadrul programului Erasmus, implicând 2333 de universități europene din anul 2003.

Versiunea nedirecționată și neponderată a rețelei ESM (rețea NNESM) a fost prima dată analizată. Nodurile acestei rețele sunt universitățile și două universități sunt conectate dacă există schimb de studenți între ele. Rețeaua NNESM are $N=2333$ noduri și $L=37492$ link-uri. O parte a structurii acestei rețele este prezentată în Fig. 9.

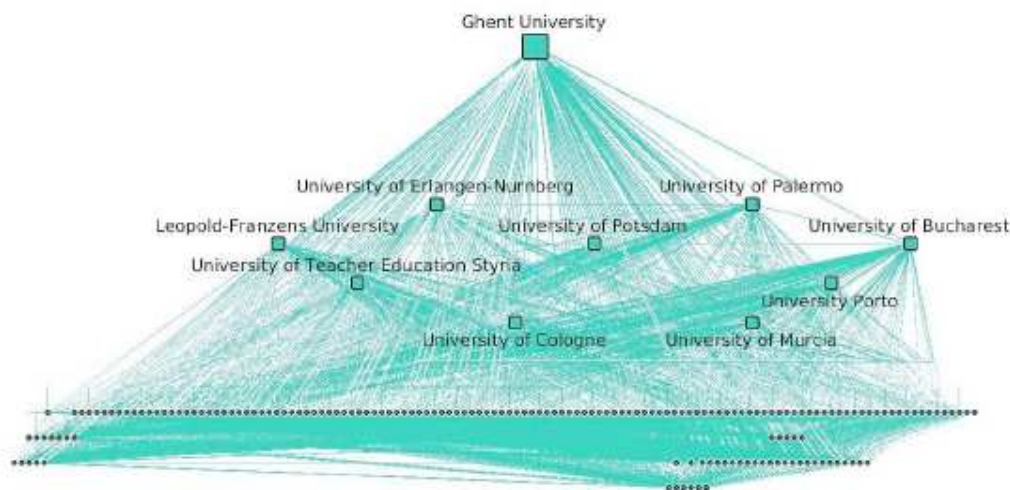


Figura 9. Componenta de gradul k a rețelei NNESM cu conectivitate minima $k=55$ a elementelor. Cele 180 de noduri ale acestei componente sunt prezentate în mod ierarhic. Cele mai puternic conectate 10 hub-uri sunt indicate cu numele lor.

Contrar așteptărilor, se constată ca rețeaua NNESM nu este o rețea de tip scale-free. Funcția de distribuție a conectivității fiind exponențială, s-a obținut un rezultat care

nu este tipic rețelelor sociale. De obicei, rețelele sociale sunt caracterizate de funcția de distribuție a conectivității de tip power-law [22]. Rețeaua NNESM este așadar un exemplu interesant pentru o rețea socială completă în care nu se observă aceasta proprietate.

Distribuția exponențială poate fi explicată presupunând că universitățile sunt caracterizate de distribuție exponențială după mărimi, iar mărimea lor și gradul lor de conectivitate sunt liniar proporționale. Date empirice pentru unele universități selectate aleatoriu din Europa, la fel și universitățile top din SUA și Marea Britanie, au confirmat caracterul exponențial al distribuției mărimii. Presupunerea unei distribuții care maximizează entropia conduce de asemenea la această concluzie.

Coeficientul de clusterizare global al rețelei NNESM este 0,183, coeficientul de clusterizare local este 0,292. Rețeaua NNESM este alcătuită din mai multe componente interconectate, unul dintre ele fiind o componentă gigantă (care conține 99% din elementele rețelei). Rețeaua este caracterizată de o lungime a drumului mediu de 2,91 între nodurile sale. Coeficienții de clusterizare cu valori ridicate și distribuția non-Poissoniană obținută pentru distribuția conectivității sugerează ca rețeaua NNESM nu este o rețea simplă de tip Erdős-Rényi.

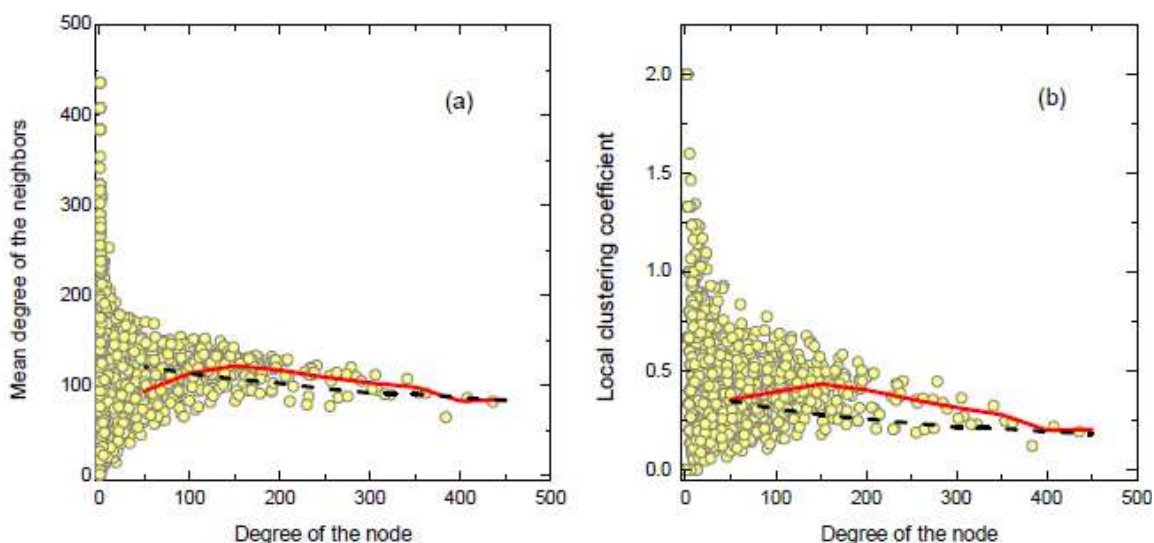


Figura 10. Conectivitatea elementelor învecinate ale unui element (a) și coeficientul de clusterizare al acestui element (b) prezentat în funcția conectivității elementului (cercuri pline). Linia continuă pe ambele panouri indică media punctelor pe intervale egale de lungime 50 pe axa orizontală. Mediile calculate pentru rețeaua obținută din modelul configurațional sunt prezentate cu linii întrerupte negre.

Prezența conectării asortative (assortative mixing) - care este caracteristică rețelelor sociale - în rețeaua NNESM a fost și ea investigată. În Fig. 10 conectivitatea elementelor învecinate ale unui element și coeficientul de clusterizare al acestui element sunt prezentate ca funcție a conectivității elementului. Graficele sugerează conectivitate aleatoare în ciuda faptului că distribuția conectivității nu este caracteristic pentru o rețea simplă de tip Erdős-Rényi. Aceste rezultate indică lipsa conectării asortative. Rețea a fost modelată utilizând un model configurațional [24] care redă bine elementele topologice observate. Modelul configurațional, și el este bazat pe lipsa conectivității asortative.

Versiunea direcționată și ponderată a rețelei ESM a fost și ea investigată. Proprietățile acestei rețele pot fi determinate în funcție de conectivitate IN și conectivitate OUT a elementelor.

Structura rețelei ESM direcționată și neponderată poate fi descrisă direcționând aleatoriu link-urile în rețeaua din modelul de configurație, și construind cu probabilitate 1/3 legături bidirecționale.

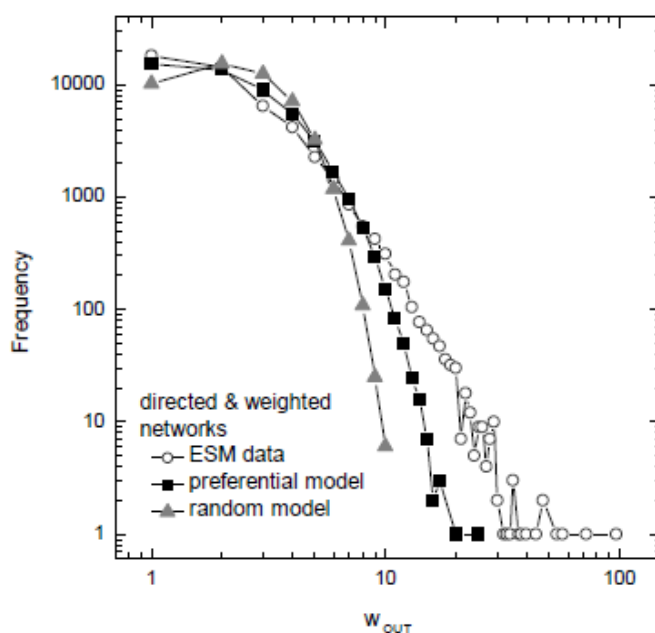


Figura 11. Compararea distribuției ponderii în cazul rețelelor direcționate și ponderate: rețeaua ESM (cercuri goale), versiunea direcționată a rețelei obținută prin modelul de configurație cu repartizarea studenților în mod random (triunghiuri pline) și în mod preferențial (pătrate pline) pe legăturile existente.

Distribuția de ponderi în rețea ESM direcționat și ponderat a fost studiată prin intermediul unui model aleatoriu și unul cu conectare preferențială. Rezultatele acestor modele și datele experimentale sunt prezentate în Fig. 11. Rețeaua obținută prin conectare preferențială descrie mai bine rețeaua ESM decât modelul cu conectare aleatorie.

Concluzii

Prezenta teză are scopul de a ilustra aplicabilitatea metodelor și modelelor fizicii statistice pentru studiul unor sisteme biologice și sociologice.

Ca sistem biologic, s-a considerat studiul unei comunități ecologice neutrale compus dintr-un număr mare de indivizi aparținând unor specii similare din punct de vedere ecologic. Caracteristicile macroecologice, ale unei păduri tropicale experimental studiate au fost analizate și abordate cu ajutorul modelelor neutrale. Un model neutral simplu spațial explicit cu doi parametri a fost introdus pentru a explica aceste caracteristici [3]. În ciuda simplității sale, modelul reproduce cu succes mai multe caracteristici macroecologice: distribuția abundenței relative a speciilor și curba SAR pentru comunitatea de arbori tropicali BCI.

Pentru a reproduce o altă caracteristică macroecologică, distribuția spațială a speciilor, a fost propusă, o descriere teoretică a procesului de împrăștiere a semințelor și au fost dezvoltate modele bazate pe această abordare [4]. Modelul neutral spațial explicit, care ia în considerare poziția spațială a arborilor din comunitatea ecologică reală, are doi parametri: timpul de supraviețuire maximă a semințelor și rata de imigrare a speciilor dintr-o metacomunitate externă în comunitatea locală. Pentru anumite valori raționale ale parametrilor, modelul reproduce rezultatele caracteristicilor ecologice obținute experimental. Un alt model neutral spațial explicit bazat pe procesul de împrăștiere a semințelor a fost introdus. Acest model are trei parametri: timpul mediu de supraviețuire a semințelor, rata de speciație, și dimensiunea metacomunității. Fixarea ultimelor doi parametri la valorile caracteristice din comunitatea ecologică reală, adus la elaborarea unui model cu un singur parametru liber pentru descrierea tuturor caracteristicilor macroecologice relevante.

Ca sistem sociologic, a fost considerat rețeaua de colaborare generată de mobilități Erasmus. Diferite variante ale acestei rețele au fost analizate și modelate [18]. Contrar așteptărilor, varianta nedirecționată și neponderată a rețelei s-a dovedit a fi de tip exponențial. S-a obținut un coeficient de clusterizare relativ mare și o rază mică. Rețeaua a fost modelată prin utilizarea unui model configurațional și originea distribuției exponențiale a gradului nodurilor a fost dezvăluită, de asemenea. Versiunea

ponderată și direcționată a rețelei a fost modelată printr-un model simplu de rețea aleatoare.

Studiile efectuate în cadrul tezei dovedesc încă odată posibilitățile de aplicație interdisciplinară a fizicii statistice.

Referințe bibliografice selectate

- [1] Brown JH (2005) *Macroecology*. Univ. of Chicago Press.
- [2] May RM (1975) Patterns of species abundance and diversity. in: ML Cody, JM Diamond (Eds), *Ecology and Evolution of Communities* .
- [3] Horvát S, Derzsi A, Nédá Z, Balog A (2010) A spatially explicit model for tropical tree diversity patterns. *Journal of Theoretical Biology* 265: 517-523.
- [4] Derzsi A, Nédá Z (2012) A seed-diffusion model for tropical tree diversity patterns. arXiv:12030844v1 [q-bioPE] .
- [5] Hubbell SP, Condit R, Foster RB (2005). Barro Colorado island forest census plot data. <http://www.ctfs.si.edu/datasets/bci>.
- [6] Whittaker RH (1972) Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21: 213-251.
- [7] Rosenzweig M(1995) *Species Diversity in Space and Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [8] Hubbell SP (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography*. Princeton University Press.
- [9] Preston FW (1948) The commonness and rarity of species. *Ecology* 29: 254-283.
- [10] Whittaker RH (1965) Dominance and diversity in land plant communities. *Science* 147: 250-260.
- [11] Gause G (1934) *The struggle for existence*. Baltimore, MD: Williams and Wilkins.
- [12] Nédá Z, Ravasz M, Balog A, Derzsi A (2005) The species abundances distribution in a neutral community model. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Physica*, L 2.
- [13] Gravel D, Canham CD, Beaudet M, Messier C (2006) Reconciling niche and neutrality: the continuum hypothesis. *Ecology Letters* 9: 399-409.
- [14] Chave J, Muller-Landau HC, Levin SA (2002) Comparing classical community models: Theoretical consequences for patterns of diversity. *Am Nat* 159: 1-23.

- [15] Derzsi A (2007) Complex spatial model for macroecological patterns. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Physica*, LII 2.
- [16] Zillio T, Volkov I, Banavar JR, Hubbell SP, Maritan A (2005) Spatial scaling in model plant communities. *Phys Rev Lett* 95: 098101-4.
- [17] Holley RA, Liggett TM (1975) Ergodic theorems for weakly interacting infinite systems and the voter model. *Ann Probab* 3: 643-663.
- [18] Rosindell JL, Wong Y, Etienne RS (2008) A coalescence approach to spatial neutral ecology. *Ecological Informatics* 3: 259-271.
- [19] Derzsi A, Derzsy N, Káptalan E, Nédá Z (2011) Topology of the erasmus student mobility network. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 390: 2601-2610.
- [20] Erdős P, Rényi A (1959) On random graphs. *Publicationes Mathematicae Debrecen* 6: 290-297.
- [21] Watts D, Strogatz S (1998) Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* 393: 440-442.
- [22] Barabási AL, Albert R (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science* 286: 509-512.
- [23] Barabási AL, Albert R, Jeong H (1999) Mean-field theory for scale-free random networks. *Physica A* 272: 173-187.
- [24] Newman M, Park J (2003) Why social networks are different from other types of networks. *Physical Review E* 68: 036122.

Lista de publicații

Publicații legate de teză

1. Sz. Horvát, **A. Derzsi**, Z. Néda, A. Balog, A spatially explicit model for tropical tree diversity patterns, *Journal of Theoretical Biology*, **265**, 517-523 (2010).
2. **A. Derzsi**, N. Derzsy, E. Káptalan, Z. Néda, Topology of the Erasmus student mobility network, *Physica A Statistical Mechanics and its Applications* **390** 2601-2610 (2011).
3. **A. Derzsi**, Z. Néda, A seed-diffusion model for tropical tree diversity patterns, accepted for publication in *Physica A Statistical Mechanics and its Applications* doi:10.1016/j.physa.2012.05.008 (2012).
4. Z. Néda, M. Ravasz, A. Balog, **A. Derzsi**, The species abundances distribution in a neutral community model, *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Physica*, **L 2** (2005).
5. **A. Derzsi**, Complex spatial model for macroecological patterns, *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Physica*, **LII 2** (2007).

Alte publicații în perioada doctoratului

1. S. Biri, **A. Derzsi**, É. Fekete, I. Iván, Upgraded TrapCAD code, *High Energy Physics and Nuclear Physics - Chinese Edition Supplement* **31** 156-158 (2007).
2. L. Kenéz, J. Karácsony, **A. Derzsi**, S. Biri, Theoretical model for study of the voltage-current curve of a Langmuir-probe used in the hot region of the ECR plasma, *Physics Letters A* **372** 4927-4931 (2008).
3. **A. Derzsi**, P. Hartmann, I. Korolov, J. Karácsony, G. Bánó, Z. Donkó, On the accuracy and limitations of fluid models of the cathode region of dc glow discharges, *Journal of Physics D: Applied Physics* **42** 225204 (2009).
4. V. Efimova, **A. Derzsi**, A. Zlotorowicz, V. Hoffmann, Z. Donkó, J. Eckert, Influence of the anode material on the characteristics of an analytical glow discharge cell, *Spectrochimica Acta Part B* **65** 311-315 (2010).

5. **A. Derzsi**, Z. Donkó, Effect of the external electrical circuit on the ignition of the glow discharge in a Grimm-type cell, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **26** 792-797 (2011).
6. I. Korolov, G. Bánó, Z. Donkó, **A. Derzsi**, P. Hartmann, Experimental study of the asymmetric charge transfer reaction between Ar⁺ ions and Fe atoms, *Journal of Chemical Physics* **134** 064308 (2011).
7. J. Schulze, **A. Derzsi**, Z. Donkó, Electron heating and the electrical asymmetry effect in dual-frequency capacitive CF₄ discharges, *Plasma Sources Science and Technology* **20** 045008 (2011).
8. J. Schulze, **A. Derzsi**, K. Dittmann, T. Hemke, J. Meichsner, Z. Donkó, Ionization by drift and ambipolar electric fields in electronegative capacitive radio frequency plasmas, *Physical Review Letters* **107** 275001 (2011).
9. S. Biri, R. Rácz, J. Imrek, **A. Derzsi**, Zs. Lécz, Imaging of ECR plasma by computer simulation, *IEEE Transactions on Plasma Science* **39** 2474 (2011).
10. Á. Budai, **A. Derzsi**, P. Hartmann, Z. Donkó, Shear Viscosity of Liquid-Phase Yukawa Plasmas from Molecular Dynamics Simulations on Graphics Processing Units, *Contributions to Plasma Physics* **52** 194-198 (2012).