

ASPECTE PRIVIND PROBLEMATICA MODELĂRII SPAȚIALE A UNOR INDICATORI ECOPEDOLOGICI FOLOSIND METODE STATISTICE ÎN CADRUL SIG

Patriche Cristian-Valeriu¹, Roșca Bogdan², Ursu Adrian²

Key words: soil properties, spatialisation, kriging, multiple regression

ABSTRACT

Our study addresses the problem of soil cover continuity / discontinuity. It focuses on revealing the usefulness of different interpolation methods for the purpose of soil properties spatial modeling at local scale, as an alternative to the traditional soil mapping using rigid soil limits. We used input data from 50 soil profiles situated within Odobești County and 25 soil profiles from Vrancea County (Department of Vrancea, Romania) regarding the clay content in A horizon, soil reaction in A horizon and humus reserve in the upper 50cm. Several interpolation methods were tested: ordinary kriging, anisotropic ordinary kriging, universal kriging, kriging differentiated according to the altitude-slope-aspect classes, kriging applied at the limits of the soil units, stepwise multiple regression combined with ordinary kriging (residual kriging). The elaborated models were validated by using an independent sample of 9 soil profiles for Odobești region and by means of statistical error parameters. The best spatial models were obtained for soil reaction, using ordinary and universal kriging in Odobești region and residual kriging, with altitude and North-South aspect component as covariables, in Vrancea region. Weaker spatial models were obtained for clay content, in which case anisotropic types of kriging performed slightly better than the other models. The use of residual kriging is justified in complex terrain where covariables play a much more important role in explaining the spatial distribution of soil parameters.

1. Problema adresată Studiul de față adresează problema continuității / discontinuității învelișului de sol. În mod tradițional, cartografierea învelișului de sol se realizează prin separarea unor unități spațiale presupuse a fi relativ omogene în interior sub aspectul anumitor însușiri. În felul acesta, învelișul de sol capătă caracter *discontinuu*. În realitate însă, tranzițiile dintre unitățile spațiale de sol și valorile însușirilor acestora sunt, cel mai adesea, graduale. Există desigur și situații particulare de tranziții bruște, marcate de limite tranșante, spre exemplu la contactul dintre roci parentale cu însușiri fizico-chimice diferite, sau la schimbarea bruscă a pantei terenului. În cele mai multe cazuri însă, datorită transferurilor laterale, superficiale și sub-superficiale, de materiale, care acționează în sensul diminuării diferențierilor spațiale ale pedo-insușirilor, limitele dintre unitățile spațiale de sol sunt mai mult sau mai puțin difuze, fapt ce conferă *continuitate* învelișului de sol, cu deosebire în zone deluroase caracterizate printr-o relativă omogenitate a materialului parental și pante reduse la moderate. Dezvoltarea exponențială a metodelor catitative de analiză, respectiv a Sistemelor Informaționale Geografice și a aparatului statistic, permite în prezent abordarea obiectivă a problemei continuității învelișului de sol, prin posibilitatea aplicării unor metode de interpolare spațială a însușirilor de sol și integrarea subsecventă a acestora în cadrul SIG în scopul obținerii unor informații derivate cu caracter spațial continuu (ex: note de bonitare).

¹ Academia Română, Filiala Iași, Colectivul de Geografie

² Universitatea "Al. I. Cuza" Iași, Facultatea de Geografie și Geologie

2. Regiunile studiate și indicatorii ecopedologici analizați Studiul de față își propune testarea utilității cartografierii statistice în cazul unor indicatori ecopedologici utilizați în metodologia bonității terenurilor agricole: conținutul în argilă din orizontul A, reacția soluției solului în orizontul A și rezerva de humus în primii 50cm de sol. Regiunile studiate sunt situate în condiții fizico-geografice diferite, fiind reprezentate prin teritoriul administrativ al orașului Odobești (5787ha) și teritoriul comunei Vrâncioaia (6483ha), ambele situate în cadrul Județului Vrancea. Teritoriul Odobești este situat într-o zonă piemontană cu relief șters, cu altitudini ce descresc treptat de la Vest (275m) spre Est (50m). Învelișul de sol este dominat de cernoziomuri și aluviosoluri. Pentru acest teritoriu s-au utilizat datele analitice de la un eșantion de 59 de profile de sol, executate și analizate de OJSPA Vrancea, dintre care 50 au fost utilizate pentru elaborarea modelelor statistice, iar restul de 9 pentru validarea acestora. Comuna Vrâncioaia este situată în Subcarpații de Curbură, incluzând o parte din Depresiunea Vrancei. Relieful este mai fragmentat, cu altitudini ce variază de la 310m în Est, în lunca Putnei, la peste 900m în extremitatea vestică. Învelișul de sol este dominat de Preluvsoluri și Regosoluri. În cazul acestei comune, s-a analizat doar distribuția pH-ului în orizontul A, pe baza unui eșantion de 25 de profile de sol, executate și analizate de OJSPA Vrancea. Numărul mai redus de profile disponibile, datorat ponderii mari a suprafețelor împădurite, în cadrul cărora nu au fost executate profilele, ne-a împiedicat să păstrăm un eșantion independent pentru validare, aceasta realizându-se doar pe baza indicilor statistici.

3. Aspecte metodologice

3.1. Interpolarea prin regresie Solul și implicit însușirile sale sunt rezultatul acțiunii factorilor pedogenetici din prezent sau trecut prin intermediul proceselor pedogenetice. Este bine cunoscută *formula genezei solului* prin intermediul factorilor pedogenetici propusă de *V. V. Dokuceaev* încă din 1898. Progrese remarcabile pe marginea acestei problematice se remarcă în lucrările elaborate de *Hans Jenny* (1941, 1980). Pe lângă cuantificarea legăturilor cauzale dintre factorii pedogenetici și proprietățile învelișului de sol, analizele de regresie sunt larg utilizate în prezent în scopul elaborării așa-numitelor *funcții de pedotransfer* (PTF), destinate estimării unor variabile de sol, mai greu măsurabile, în funcție de altele, mai ușor de determinat. Aplicarea regresiei în scopul modelării influențelor factorilor pedogenetici trebuie să țină cont de faptul că învelișul actual de sol nu reflectă întotdeauna caracteristicile mediului actual de pedogeneză. În general, însușirile biochimice sunt mai sensibile la modificarea caracteristicilor mediului de pedogeneză, comparativ cu cele fizico-mecanice, care prezintă o inerție mai mare.

Regresia este o metodă, în general, *globală* de interpolare, care estimează valorile unei variabile în punctele necunoscute prin cuantificarea legăturilor dintre variabila analizată și factorii potențiali explicativi cu variabilitate spațială cunoscută. Modelul regresiei multiple liniare are următoarea formă:

$$\hat{y} = a + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i \pm \varepsilon$$

unde:

- \hat{y} - variabila dependentă;
- x_i - variabilele independente;
- n - numărul variabilelor independente;
- a - termenul liber;

- b_i - coeficienții de regresie parțială;
- ε - eroarea standard de estimare a variabilei dependente.

Determinarea termenului liber și a coeficienților de regresie parțială se bazează pe condiția de *minimizare a varianței reziduale*. Cu alte cuvinte, suma pătratelor diferențelor dintre valorile reale și cele estimate trebuie să fie minimă.

În categoria factorilor explicativi pot intra numeroase variabile, care descriu factorii pedogenetici: caracteristici hidro-climatice, lito-geomorfologice și biogeografice. Indispensabilă este însă exprimarea numerică a tuturor acestor variabile. În cazul studiului de față, s-au utilizat cu deosebire variabile morfometrice, având în vedere rolul preponderent al reliefului în explicarea distribuției spațiale a învelișului de sol. Este recomandat ca integrarea predictorilor în ecuația de regresie să se facă progresiv, pas cu pas, pentru a minimiza efectul coliniarității.

Validarea modelelor de regresie s-a realizat pe baza indicilor statistici specifici, prin testarea semnificativității statistice a coeficienților de corelație, coeficienților de regresie parțială și termenului liber, normalității reziduurilor, calculul erorilor standard și analiza distanțelor Cook ca metodă de validare încrucișată.

Există numeroase variante de aplicare a analizei de regresie. Dintre acestea, în cadrul studiului de față, au fost testate:

- *regresia multiplă progresivă*, având ca variabile explicative altitudinea, panta, orientarea versanților și coordonatele XY;
- *regresia cu punct de rupere* (tip breakpoint): utilă în cazul aproximării unei variații neliniare a variabilei dependente, în raport cu un anumit predictor, printr-o sumă de variații liniare;
- *regresia diferențiată pe clase de altitudine-pantă-expoziție*: utilă în cazul în care variabila dependentă se comportă diferit pe diferite paliere altitudinale, de pantă sau expoziție.

3.2. Interpolarea prin kriging Dezvoltată inițial în cadrul geologiei în anii '70, metoda kriging s-a răspândit rapid și în alte ramuri ale geografiei, cu deosebire în climatologie, dar și în pedologie, fiind utilizată tot mai mult la spațializarea însușirilor învelișului de sol la scara mare.

Kriging-ul este un interpolator local, care pleacă de la presupunerea că valorile unei variabile spațiale sunt *autocorelate* pe distanțe mici. Cu alte cuvinte, în jurul unui anumit punct, valorile din punctele apropiate vor fi asemănătoare celei din punctul central, diferențele crescând proporțional cu distanța față de acesta.

Interpolarea prin kriging presupune parcurgerea următoarelor *etape* (figura 1):

- Determinarea *semivariogramei experimentale (reale)*, respectiv a modului de variație, în raport cu distanța față de un punct central, a pătratelor diferențelor dintre valorile variabilei analizate;
- Determinarea *semivariogramei experimentale mediate*: presupune stabilirea unui interval de distanță (*lag*) și medierea semivarianțelor în interiorul acestora, astfel încât funcția semivariogramei mediate să fie crescătoare;
- Ajustarea semivariogramei experimentale cu o *semivariogramă standard (teoretică)*, cele mai utilizate fiind modelele sferice și exponențiale;
- Determinarea *distanței maxime de autocorelare (range)* și a *coeficienților de ponderare* prin rezolvarea sistemului de ecuații kriging: distanța maximă de autocorelare definește raza cercului în interiorul căruia se

- situează punctele ce vor fi utilizate pentru interpolarea valorii din punctul central.
- Estimarea valorii în punctul necunoscut ca *medie ponderată* a valorilor din punctele cunoscute învecinate, folosind coeficienții de ponderare determinați anterior.
- Calcularea *erorii standard a estimării* ca măsură a incertitudinii implicate în procedura de interpolare.

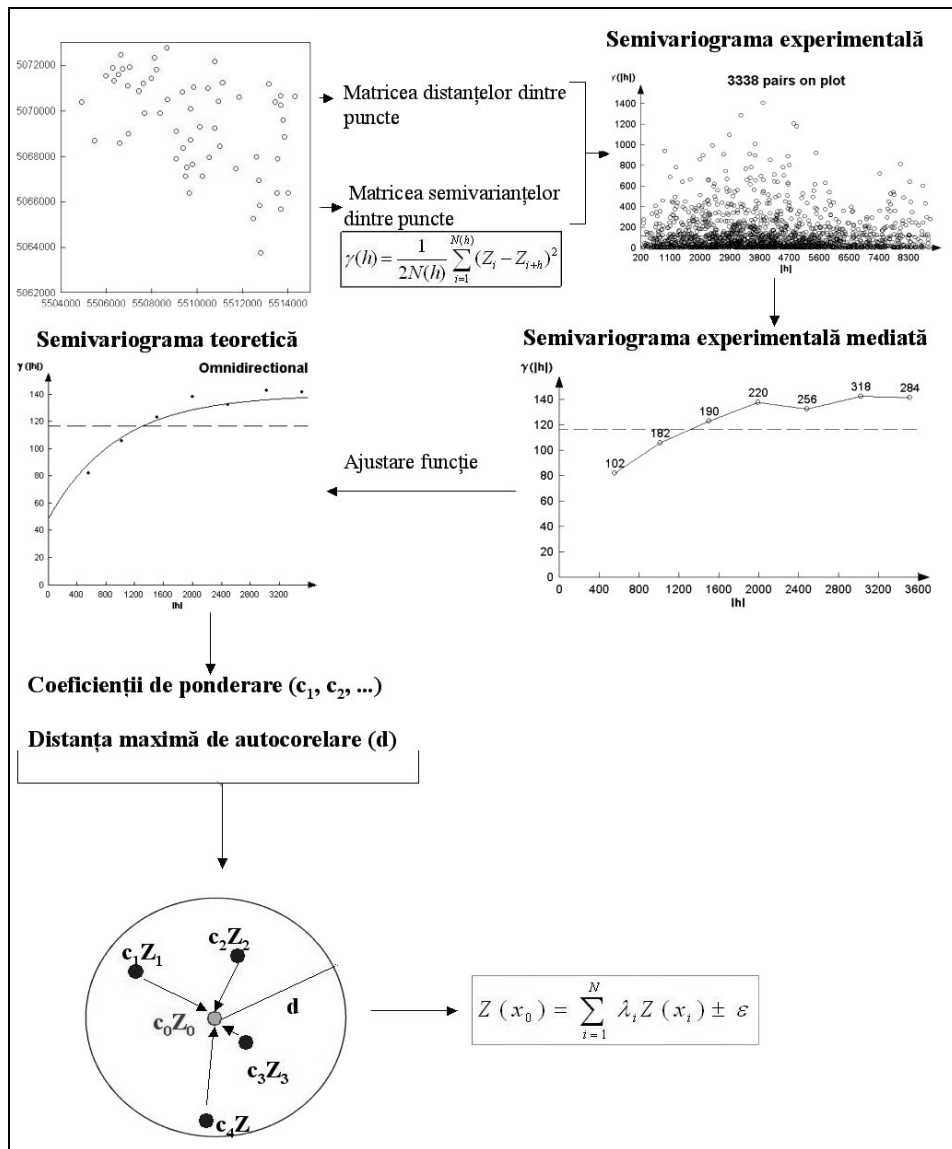


Figura 1. Etapele interpolării prin kriging

Variantele de kriging care au fost testate în cadrul studiului de față sunt:

- *Ordinar*
- *Ordinar cu anizotropie*
- Cu model de tendință de tip regresie (*rezidual*)
- Cu model de tendință de tip polinomial (*universal*)
- *Diferențiat pe clase de altitudine-pantă-expoziție*
- *Kriging la limitele unităților spațiale de sol*, considerând astfel interiorul acestora relativ omogen și tranziții graduale spre unitățile învecinate

Modelele spațiale elaborate au fost validate atât statistic, cât și cu ajutorul unui eșantion independent de 9 profile, în cazul teritoriului Odobești.

Analizând comparativ avantajele și dezavantajele utilizării celor 2 metode de interpolare (figura 2), remarcăm faptul că acestea se completează reciproc, astfel încât abordarea mixtă, pe baza krigingului rezidual, pare a fi optimă. Totuși, în cazul variabilelor de sol, așa cum vom vedea în continuare, utilizarea modelelor de regresie, care redau tendința spațială a variabilei analizate, nu se justifică întotdeauna, cu deosebire în cazul unor regiuni restrânse și cu relief estompat.

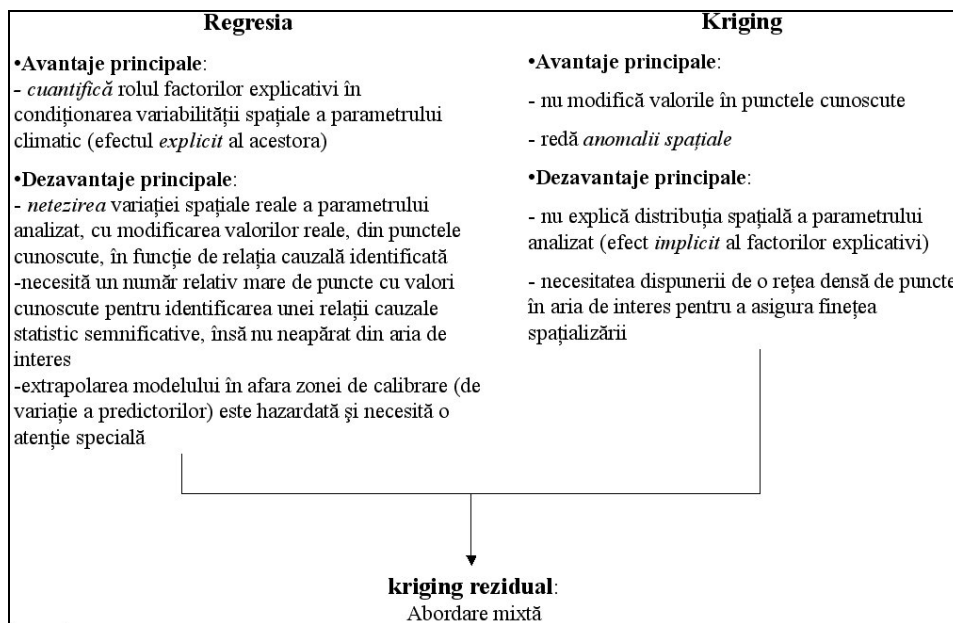


Figura 2. Analiza comparativă a aplicabilității regresiei și krigingului pentru modelare spațială

4. Rezultate obținute Analiza semivariogramelor experimentale mediate și teoretice (figura 3) relevă faptul că autocorelarea spațială este mai bună în cazul pH-ului, unde distanța maximă de autocorelare este cea mai mare (9300m) și mai slabă în cazul conținutului în argilă, unde punctele pentru interpolare vor fi preluate de pe o suprafață mai mică, distanța maximă de autocorelare fiind de 2846m. Raportul semivarianță explicată (sill) / zgomet (nugget) este maxim în cazul rezervei de humus și minim în cazul argilei, fapt ce indică variabilitatea spațială mai mare a primului parametru și eventual o calitate superioară a spațializării prin kriging datorită nivelului mai redus de

zgomot. Pe de altă parte, indicele de ajustare a semivariogramei teoretice (fit) este maxim în cazul rezervei de humus, evidențiind o mai slabă ajustare a semivariogramei experimentale prin modelul exponențial utilizat.

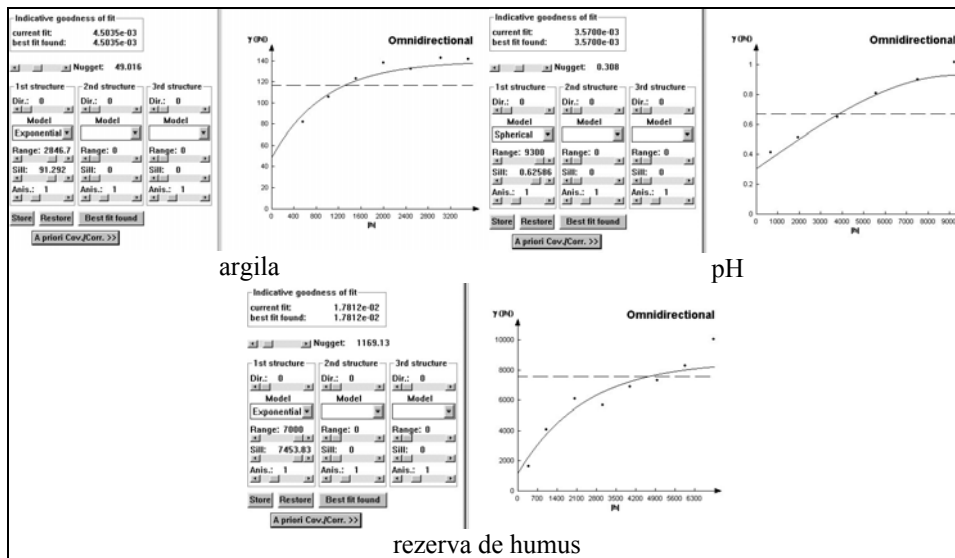


Figura 3. Semivariogramele experimentale mediate și teoretice în cazul krigingului ordinar

4.1. Modelarea spațială a conținutului în argilă în orizontul A Analiza reziduurilor la nivelul eșantionului de validare (figura 4), generate de aplicarea diferitelor metode de interpolare, indică o tendință de supraestimare a valorilor conținutului în argilă din orizontul A. Constatăm, de asemenea, că valorile mai mici sunt, în general, mai bine approximate decât valorile mari. Erorile medii pătratice (RMSE³) asociate diferitelor metode variază de la 11,4 (kriging cu anizotropie la limita unităților de sol) și 11,9 (kriging cu anizotropie) la 14,6 (kriging diferențiat pe clase de altitudine-pantă-expoziție).

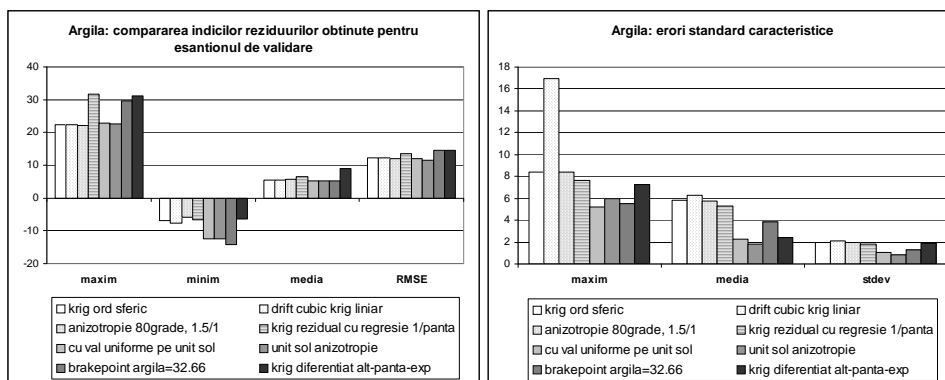


Figura 4. Analiza comparativă a modelelor elaborate pentru conținutul în argilă din orizontul A

³ Root Mean Square Error

Analiza erorilor standard ale modelelor spațiale (figura 4) indică varianta de kriging cu anizotropie la limita unităților de sol ca fiind cea mai bună, erorile standard ale estimării fiind cuprinse între 0,013% și 5,99%, cu o medie de 1,82% și o deviație standard de 0,81%.

Prin urmare, variantele de kriging cu anizotropie sunt ușor superioare celorlalte (figura 5), fapt ce poate indica existența unui transport (sub)superficial de argilă pe direcția generală de înclinare a reliefului (V-E).

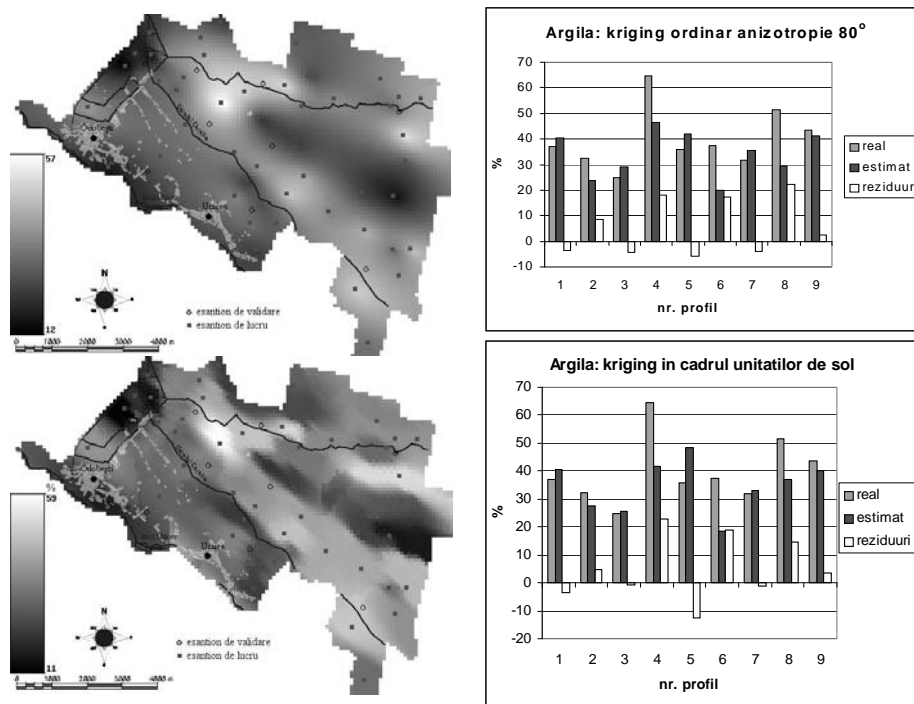


Figura 5. Spațializarea conținutului în argilă din orizontul A prin modele de kriging cu anizotropie

4.2. Modelarea spațială a reacției solului în orizontul A Modelarea spațială a acestui parametru este superioară celorlalte însușiri. Interpolarea prin kriging ordinar cu semivariogramă teoretică liniară dă rezultatele cele mai bune, prin prisma reziduurilor obținute la nivelul eșantionului de validare (RMSE = 0,49) (figura 6). Krigingul universal, cu tendință spațială polinomială de grad 4, se pretează, de asemenea, bine la spațializarea pH-ului, estimările valorilor din eșantionul de validare fiind foarte asemănătoare cu cele derivate prin kriging ordinar (RMSE = 0,5). Mai mult, prin prisma erorilor standard ale estimării, spațializarea prin kriging universal (figura 7) pare a fi ușor superioară celei prin kriging ordinar, prezentând erori ceva mai reduse (medie de 0,28 față de 0,32).

În cazul analizei efectuate pentru comuna Vrâncioaia, se remarcă o mai bună corelare a reacției solului cu factorii de control (altitudine, expoziție) datorită reliefului

mai variat care diversifică gama valorilor de pH. Astfel, relația acestui parametru cu altitudinea este una inversă, indicând creșterea acidității solului pe măsura creșterii altitudinii, ca urmare a precipitațiilor mai abundente, care contribuie la o desaturare mai avansată a solurilor, dar și a altor factori (frecvența sporită a arealelor forestiere, a rocilor acide). Relația cu componenta N-S a expoziției este una directă, indicând creșterea pH-ului de la expozițiile sudice spre cele nordice, ca urmare a creșterii umidității solului în același sens. Ecuația de regresie multiplă având ca variabile explicative altitudinea și

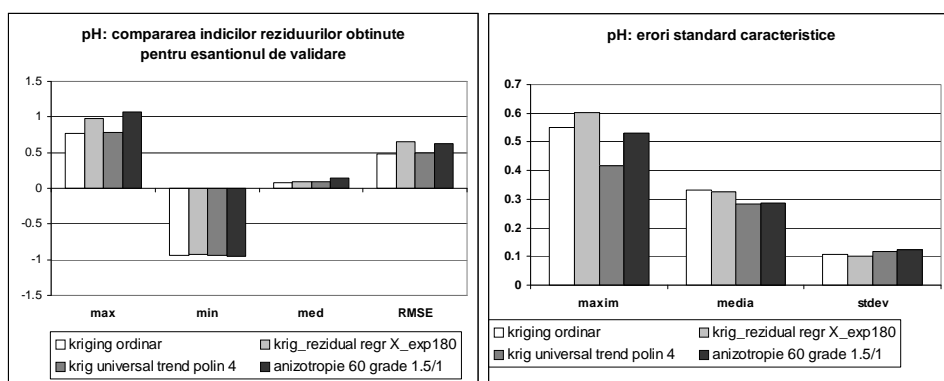


Figura 6. Analiza comparativă a modelelor elaborate pentru pH

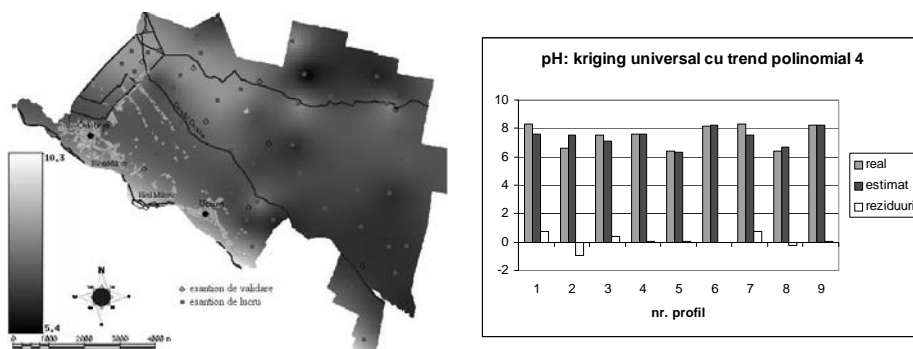


Figura 7. Spațializarea pH-ului prin kriging universal

componenta N-S a expoziției a fost utilizată pentru spațializarea reacției solului prin kriging rezidual (figura 8).

4.3. Modelarea spațială a rezervei de humus 0-50cm În cazul rezervei de humus, atât validarea cu eșantion independent, cât și mediile erorilor standard ale estimării (figura 9), indică spațializarea prin kriging rezidual cu regresie funcție de altitudine (figura 10) ca fiind optimă (RMSE = 74,38, media erorilor standard 21,237). Dintre cele 9 profile ale eșantionului de validare, 5 sunt foarte bine estimate, reziduurile fiind cuprinse între 1,16 și 23,1 t/ha. Media pozitivă a reziduurilor indică, ca și în cazul argilei, o tendință de supraestimare a valorilor. Relația inversă dintre rezerva de humus și altitudine se explică prin dominarea materialului parental nisipos (derivat din gresii) la altitudini ceva mai mari, care nu favorizează acumularea humusului. Pe măsura descreșterii altitudinii, materialul parental devine tot mai fin, iar particulele argiloase

favorizează coagularea complexelor argilo-humice și deci acumularea unei cantități mai mari de humus.

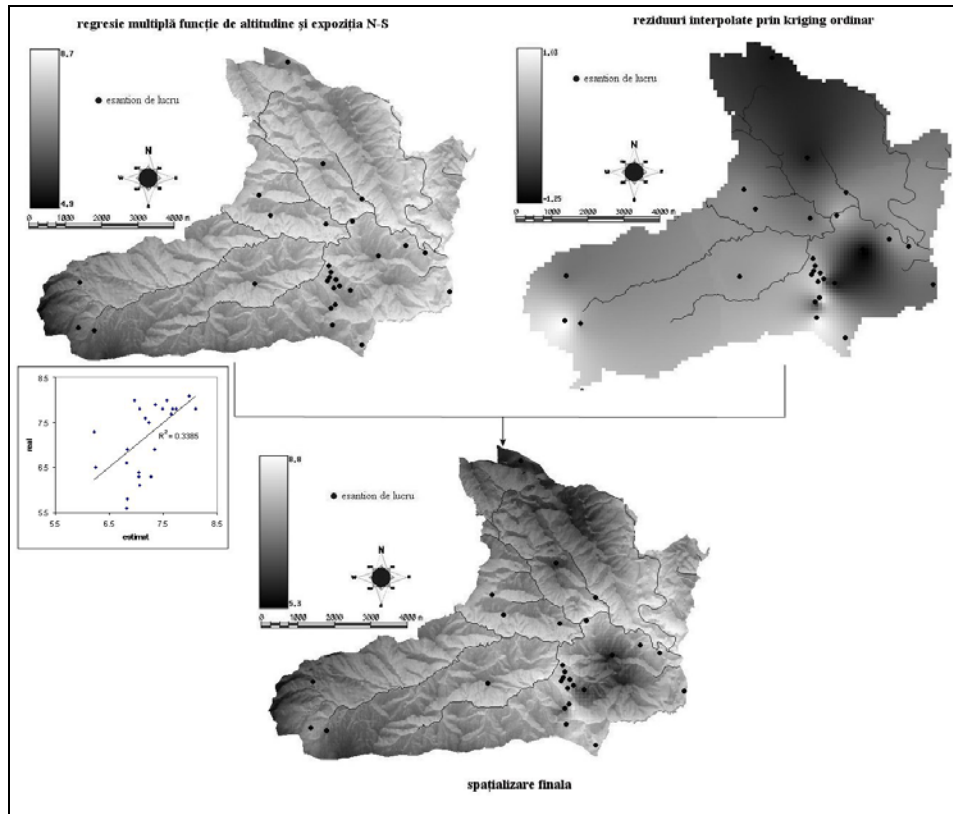


Figura 8. Modelarea spațială a pH-ului prin kriging rezidual pentru teritoriul comunei Vrâncioaia

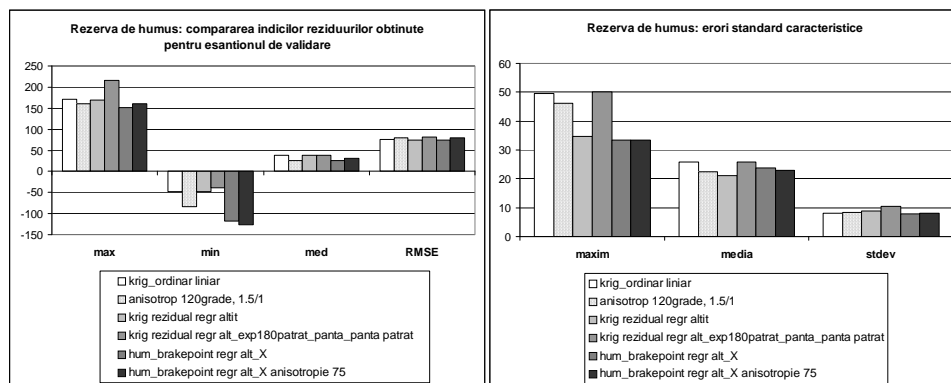


Figura 9. Analiza comparativă a modelelor elaborate pentru rezerva de humus 0-50cm

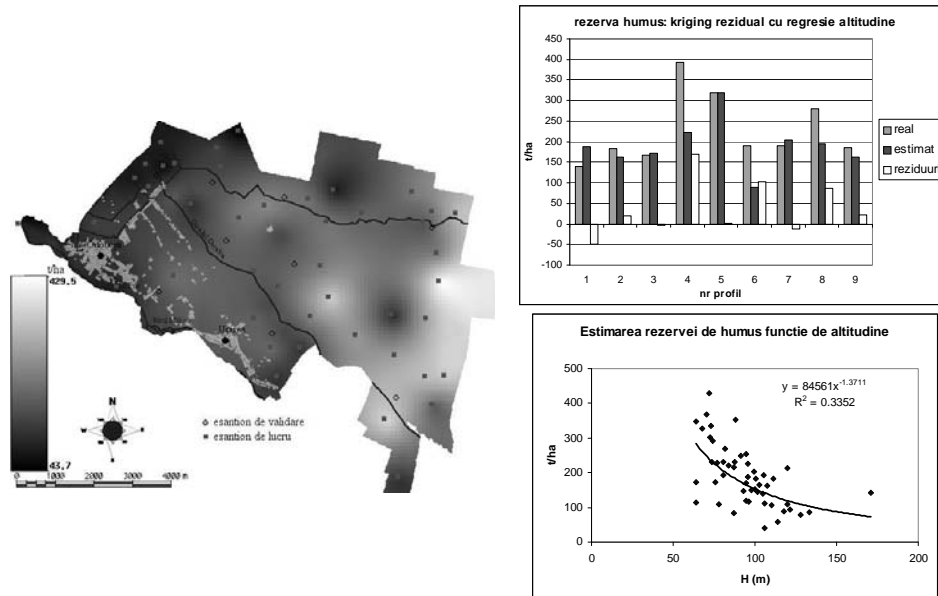


Figura 10. Spațializarea rezervei de humus prin kriging rezidual cu regresie neliniară funcție de altitudine

5. Concluzii Sintetizând rezultatele obținute, remarcăm faptul că cea mai bună ajustare spațială este în cazul pH-ului iar cea mai slabă în cazul conținutului în argilă, rezerva de humus situându-se pe o poziție intermediară. Pentru conținutul în argilă, prin prisma erorilor medii pătratică (RMSE) ale reziduurilor eșantionului de validare, modelele cu anizotropie s-au dovedit a fi ușor superioare celorlalte modele. Totuși, pe ansamblu, diferențele de performanță sunt reduse. În cazul pH-ului, cea mai bună spațializare s-a realizat prin kriging ordinar și kriging universal cu tendință polinomială de grad 4, iar în cazul rezervei de humus, prin kriging rezidual cu regresie tip putere în funcție de altitudine.

Remarcăm, de asemenea, rolul mai important al predictorilor externi în regiuni cu relief mai variat, în cazul cărora, aplicarea unor metode de spațializare mai laborioase, precum krigingul rezidual, este justificată.

BIBLIOGRAFIE

1. Anselin, L. (2003) – *An introduction to variography using Variowin*, University of Illinois.
2. Goovaerts, P. (1997) – *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.
3. Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., Stein A. (2004) – *A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging*, Geoderma 120, 75–93.
4. Johnston, R. J. (1978) – *Multivariate Statistical Analysis in Geography*, Longman, New York.
5. Pebesma, E. J., Wesseling, C. G. (1998) – *Gstat, a Program for Geostatistical Modelling, Prediction and Simulation*, Computers and Geosciences, 24(1), 17-31.
6. * * * (1995) – *Studii pedologice 1:5000 pentru teritoriul administrativ Odobești și Comuna Vrâncioaia*, OJSPA Vrancea.
7. * * * (2000) – *Reference Manual for the TNT products V6.4*, Lincoln, MicroImages Inc.