

Sažetak

Hengl, T. 2003. Pedometrijsko kartiranje: prevladavanje razlika između tradicionalnog i pedometrijskog pristupa. Doktorska teza, Sveučilište u Wageningenu.

Posljednjih godina, digitalno kartiranje tala doživjelo je ubrzani razvitak novih i ekonomičnih metoda, uglavnom zbog veće dostupnosti tzv. pomoćnih karata (parametri reljefa, satelitski snimci itd.). Glavni cilj ovog istraživanja bio je razviti metodologiju za pedometrijsko kartiranje, koje se može koristiti za prevladavanje razlika između tradicionalnih i pedometrijskih tehnika. Teza pokriva sedam metodoloških područja kartiranja tala: uzorkovanje, predobradu, fotointerpretaciju, interpolaciju, vizualizaciju, organizaciju i kontrolu kvalitete.

UZORKOVANJE: U ovom poglavlju razmatrana su načela razmještaja observacija u tematskom i geografskom prostoru kao ključ za optimizaciju odabira uzorkovanja za potrebe prostorne predikcije temeljene na korelaciji sa pomoćnim kartama. Iako je uporaba pomoćnih karata u kartiranju tala uobičajena praksa, problemi vezani uz dizajn uzorkovanja često se zanemaruju. Ukupna pogreška predikcije, u slučaju generalizirane metode najmanjih kvadrata, ovisi o položaju točaka u oba prostora — tematskom i geografskom. Ujednačeni razmještaj točaka, proporcionalno distribuciji prediktora (tzv. *Equal range* stratifikacija ili ER dizajn), predložen je kao 'najsigurnija' strategija uzorkovanja kada je regresijski model između pedoloških i pomoćnih varijabli nepoznat. Postojećih uzorak od 100 pedoloških obzervacija na 50×50 km velikom području u središnjoj Hrvatskoj korišten je za ilustraciju ovih načela. Uzorak je bio podijeljen u podskupove od 25 obzervacija koristeći različite eksperimentalne dizajne: ER, te dva regresijska dizajna (minmax i D2). Dizajni su uspoređeni po uspjehu u predikciji sadržaja organske tvari (univarijatni primjer) uz pomoć nadmorske visine, koristeći ukupnu pogrešku predikcije kao kriterij procjene. ER dizajn postigao je sličnu ukupnu pogrešku kao i minmax dizajn, pa se može zaključiti da ER predstavlja dobar kompromis između točne procjene modela i minimizacije prostorne autokorelacije reziduala. ER dizajn je također proširen na multivarijatni slučaj. Četiri prediktora (nadmorska visina, temperatura, indeks vlažnosti i NDVI) prvo su transformirani u standardizirane komponente (*principal components*). Zatim su točke uzorkovanja raspoređene po komponentama i to proporcionalno varijanci objašnjenju u komponentnoj analizi, te proporcionalno distribuciji prediktora.

PREDOBRADA: Kvaliteta digitalnih modela reljefa (DMR) i reljefnih parametara neposredno utječe na kvalitetu pripadajućih aplikacija. Opisana su tri pristupa redukciji pogrešaka u DMR-ima i reljefnim parametrima: (a) rabeći empirijsko znanje, npr. korekcija DMR-a korištenjem linija reljefnih lomova i karte tokova; (b) rabeći GIS operacije filtriranja, te (c) rabeći metodologiju propagacije pogrešaka. Operacije filtriranja korištene su za uklanjanje grubih grešaka tj. redukciju outliers-a. Temelje se na strukturi prostorne autokorelacije, te usporedbi promatranih vrijednosti i vrijednosti procijenjenih uz pomoć susjednih piksela. Metodom propagacije pogrešaka, pogreške se smanjuju računanjem prosječnih vrijednosti iz nekoliko simulacija. Metode su testirane na 3.8×3.8 km području istraživanja koje obuhvaća dva različita tipa reljefa: brdo i ravan sa terasama. Digitalizirane konture su interpolirane koristeći linearnu interpolaciju. Udio artefakata (tzv. *padi* terase) u nefiltriranom DMR-u bio je 17.3%. Nakon dodatka linija loma, filtriranja outliersa, te korekcije DMR-a prema karti tokova, udio *padi* terasa se smanjio na 2.2%. Preostale greške u parametrima reljefa, kao što su nedefinirani pikseli te lokalni outliers-i, reducirani su uporabom filtriranja sa iteracijama i propagacije pogrešaka. Udio outliers-a u parameterima reljefa nije prelazio 2% ukupne površine. Oba pristupa redukciji pogrešaka — filtriranje i propagacija pogrešaka, daju nešto generaliziranu sliku parametara reljefa. Prednost filtriranja outliers-a je da metoda direktno rabi strukturu prostorne autokorelacije. Prednost metode propagacije pogrešaka je da može biti lako automatizirana. Redukcija pogrešaka poboljšala je kartiranje geomorfoloških jedinica (klasifikacija), te dubine tla (regresija). Točnost klasifikacije povećala se sa 51.3% na 72%, dok je R^2 regresijskog modela za predikciju dubine tla narastao sa 0.27 na 0.40.

FOTO-INTERPRETACIJA: Ovo poglavlje nudi opis metode koja poboljšava manualnu foto-interpretaciju geomorfoloških jedinica pri kartiranju većih područja. Tradicionalne aero foto-interpretacijske (AFI) karte pripremljene su korištenjem geopedološke legende (21 klasa) za šest test područja u Baranji, istočna Hrvatska, ukupne površine 111 km². Devet parametara reljefa izlučenih iz DMR-a (dubina podzemne vode, nagib terena, horizontalna kurvatura, vertikalna kurvatura, sjenčanje, drenažna površina, indeks vlažnosti, indeks transporta sedimenta i udaljenost do najbliže vodene površine), korišteni su za ekstrapolaciju foto-interpretacije na cijelom području istraživanja (1062 km²). Točnost klasifikacije procijenjena ili određena je uporabom matrice grešaka (*error matrix*), izračunate usporedbom svih AFI karata i točkastih uzoraka sa rezultatima klasifikacije na svim test područjima. Prvi rezultati klasifikacije, metodom maksimalne uvjetne vjerojatnosti (*maximum-likelihood*), dali su 58.2% (brdo), 39.1% (ravan), te 45.3% (cijelo područje) podudaranja sa test područjima. Šest klasa u ravnicama prouzročile su velike pogreške u klasifikaciji, vjerojatno zbog nedovoljno detaljnog DMR-a te kompleksne naravi geomorfoloških klasa (riječni obalni kompleksi, rubovi rijeka, aktivni kanali), koji ne mogu biti objašnjeni samo uz pomoć parametara reljefa. Pomoću simplificirane legende sa 15 klasa, točnost klasifikacije povećala se na 65.8% (ravan), 58.2% (brdo) i 63.4% (cijelo područje) za sve AFI karte. Nakon simplifikacije legende (15), te sa iterativnom (3) selekcijom točkastih uzoraka, klasifikacija je pokazala 97.6% (brdo), 86.7% (ravan), i 90.2% (cijelo područje) podudaranja sa test područjima. Vodjena (*supervised*) klasifikacija

pokazala je detalje koje nije bilo moguće izlučiti uz pomoć aero foto-interpretacije. Broj manualnih foto-interpretacija, koje je trebalo pripremiti, smanjen je sa 84 na 6. Ova metodologija može koristiti pedo-kartografskim timovima za korekciju i nadopunu postojećih karata te za poboljšanje ili zamjenu API-ja u novim pedo-kartografskim projektima.

INTERPOLACIJA: Metodološka shema za prostornu predikciju temeljena na regresijskom-krigingu opisana je i uspoređena sa ordinarnim kringingom i čistom regresijom. Podaci su prvo transformirani korištenjem *logit* transformacije za ciljne varijable te faktor analize za kontinuirane prediktore (pomoćne karte). Ciljne varijable su zatim modelirane korištenjem *step-wise* regresije, a reziduali su interpolirani ordinarnim kringingom. Generična metoda vizualizacije razvijena je za simultani prikaz vrijednosti predikcije i pripadajuće nepouzdanosti. Interpolacijski algoritam testiran je koristeći 135 pedoloških profila iz Baze tala Republike Hrvatske, podijeljenih u interpolacijske (100) i kontrolne točke (35). Tri ciljne varijable: organska tvar, pH u oraničnom horizontu i debljina oraničnog horizonta bile su interpolirane koristeći šest parametara reljefa te devet pedo-kartografskih jedinica. Točnost predikcije procijenjena je uz pomoć srednje pogreške (ME) i korijena srednjeg kvadratnog odstupanja (RMSE) izračunatih na kontrolnim točkama. Rezultati su pokazali da predloženi interpolacijski algoritam povećava uspješnost predikcije. Štoviše, algoritam je osigurao normalnost reziduala, te spriječio pojavu vrijednosti izvan fizičkog raspona varijabli. U slučaju predikcije organske tvari, interpolacijski algoritam postigao je manji standardizirani RMSE nego ordinarni kringing (53.3% *versus* 66.5%). U slučaju predikcije debljine oraničnog horizonta, postigao je manji standardizirani RMSE (66.5% *versus* 83.3%), te manji sistematski otklon (ME) nego ordinarni kringing (0.15 *versus* 0.69 cm). Sve tri metode nisu bile uspješne u predikciji pH u tlu. Ovaj interpolacijski algoritam otvara mogućnost razvitka integriranog algoritma, koji bi se mogao koristiti za GIS-temeljenu poluautomatsku interpolaciju podataka iz postojećih baza tala.

VIZUALIZACIJA: Opisana je metoda za vizualizaciju višestrukih pripadnosti (*memberships*), zvana “mješač boja” (*Colour Mixture* ili CM) i uspoređena sa alternativnim tehnikama: defuzifikacijom i “mješačem piksela” (*Pixel Mixture*). Šest parametara reljefa korišteno je za klasifikaciju geomorfoloških jedinica metodom vodjene *fuzzy k-means* klasifikacije. Kontinuirana kategorička karta proizvedena je uporabom GIS kalkulacija s bojama, gdje boja predstavlja taksonomski prostor određen prediktorima. Koordinate 9 taksonomskih centara (geomorfološke jedinice) su prvo transformirane iz multivarijantnog u dvodimenzionalni atributni prostor, i zatim projicirane na tzv. HSI (*Hue Saturation Intensity*) kružnu paletu boja (*colourwheel*). Taksonomska dimenzija kodirana je tipom boje (*Hue*), a konfuzija klasifikacije zasićenošću (*Saturation*). Kako bi postigli vizualnu impresiju nepouzdanosti (*uncertainty*), zasićenost je zamijenjena bijelom bojom, tj. ‘izbjeljivanjem’. Klase koje su bile bliže u atributnom prostoru sjedinjene su u sličnu generičnu boju. CM tehnika ograničava izračunatu miješanu boju, neovisno o ukupnom broju klasa, na sedam generičkih boja, što konačno omogućuje automatsku generalizaciju klasa. Zasićenost izlučena iz karte miješanih boja, rabljena je za detekciju primarnih granica te prostornu lokaciju područja velike taksonomske konfuzije.

ORGANIZACIJA: Glavna načela, operacije i organizacijska struktura grid-temeljenog Sustava Informacija o Tlu (*Soil Information System* -SIS) uspoređeni su sa tradicionalnim poligonskim SIS-om. Ta usporedba ilustrirana je koristeći 3.8×3.8 km test područje u istočnoj Hrvatskoj. Ključni prostorni element u grid-temeljenom SIS-u je kvadrat (*grid cell*) i svi GIS slojevi bili su podešeni na istu terensku rezoluciju (25 m u ovom slučaju). Pedološke varijable modelirane su koristeći tzv. “miješani model prostorne varijabilnosti” (*mixed model of spatial variation*), koji omogućuje i diskretne i kontinuirane prijelaze u prostoru. U ovom test području, SIS se sastojao od 21 prediktora (foto-interpretacijska karta, parametri reljefa, te satelitski snimci), šest karata pedoloških varijabli (debljina tla, učestalost moličnog, kalcinog i glejičnog horizonta, debljina oraničnog horizonta, te sadržaj praha), te šest karata pripadnosti (*memberships*) za svaki tip tla. Svaka pedološka varijabla interpolirana je metodom hibridne interpolacije (regresijski-kriging). Interpolirane karte su zatim klasificirane pomoću kontinuirane klasifikacije (*fuzzy k-means*), kako bi se dobile karte pripadnosti. Karte pripadnosti su zatim poslužile za izračun kontinuirane pogodnosti (0–1) za proizvodnju pšenice, kao primjer interpretacije koju ju moguće postići uz pomoć opisanog SIS-a. Foto-interpretacijska karta se pokazala kao nešto bolji prediktor ciljnih pedoloških varijabli nego parametri reljefa i satelitski snimci. Usporedba uspješnosti modeliranja (*goodness of fit*), te tematske konfuzije, pokazali su da grid-temeljeni SIS, u pravilu, postiže veću detaljnost i pouzdaniju predikciju nego tradicionalni (poligonski) SIS. Prednosti dizajniranog SIS-a, u usporedbi sa tradicionalnim kartiranjem tala, su: (1) završava kartom tipova tala, a ne kartom pedo-kartografskih jedinica; (2) sve pedološke varijable su kartirane kao kontinuirana polja visokog detalja; (3) pruža mjeru nepouzdanosti, kako za ulazne, tako za izlazne varijable; (4) i diskretni i kontinuirani prijelazi u prostoru su mogući; (5) originalne pedološke observacije i interpolacijski/klasifikacijski parametri pohranjeni su u posebnim tablicama, koje su dio SIS-a, tako da je moguće obnoviti izračunate karte. Nedostaci su: (1) sustav je računarski zahtjevan i traži puno memorije; (2) troškovi su veći (nabavka i obrada podataka) i (3) sustav je osjetljiv na kvalitetu ulaznih podataka.

KONTROLA KVALITETE: Opisana je metodologija za procjenu kvalitete i pogodnosti, te uporabljivosti nacionalne inventarizacije tala. Šest 1:50 K listova karata (od 185 ukupno), tri kontrolna kartiranja (svako veličine 4×4 km), te deset detaljnih pedoloških profila u glavnim reljefnim regijama u Hrvatskoj, korišteni su za procjenu efektivnog mjerila, točnosti legendi, te tematsku točnost točkastih opažanja. Također je procijenjena tematska čistoća i kontrast postojeće Baze tala (2198 profila) i osnovne pedološke karte Republike Hrvatske (u mjerilu 1:300 K), koristeći podatke o sadržaju gline, pH i organskoj tvari. Razvijene su i testirane nove metode za procjenu prostorne točnosti pedoloških granica i tematskog preklapanja između susjednih kartografskih jedinica. Rezultati ove studije pokazali su da srednja veličina poligona, te prostorna točnost pedoloških granica (oko ±40 m) odgovaraju efektivnom mjerilu od 1:150 K, dok gustoća profila odgovara mjerilu od 1:250 K. Pedo-kartografske jedinice su heterogene sa srednjom relativnom varijacijom od 17% unutar jedinica, te sa srednjim preklapanjem od 66% između susjednih poligona. Uočena je velika razlika između originalnih legendi i kontrolnih karata na nivou taksonomskih klasa,

te znatno manja razlika nakon grupiranja klasa prema sličnosti. Ova Nacionalna inventarizacija pogodna je za nacionalna planiranja sitnog mjerila, ali ne i za detaljna mjerila. Glavni problemi uporabljivosti su postojanje heterogenih kartografskih jedinica, nedostatak specifičnih interpretacija potrebnih korisnicima, te neriješena pitanja vlasništva i uporabe.

Osnovni zaključak je da predložena metodologija pedometrijskog kartiranja pospješuje pedo-kartografsku praksu, čineći pedološke karte objektivnijima, detaljnijima, te kompatibilnijima za integraciju sa drugim okolišnim geo podacima. Štoviše, više nema potrebe za korištenjem koncepta pedo-kartografskih jedinica ili tradicionalnih poligonskih karata. Sa druge strane, umjesto napuštanja foto-interpretacije, klasifikacije tala ili empirijskog znanja o tlima, ove se metode mogu uspješno integrirati sa pedometrijskih tehnikama.