

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Környezettudományi Doktori Iskola
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

**GEOSTATISZTIKAI MEGKÖZELÍTÉSEN ALAPULÓ DIGITÁLIS
TALAJTÉRKEPEZÉSI ÉS MINTAVÉTEL OPTIMALIZÁCIÓS
MÓDSZERTAN KIALAKÍTÁSA VALAMINT ALKALMAZÁSA
KÜLÖNBÖZŐ LÉPTÉKEKBEN**

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

SZATMÁRI GÁBOR

Témavezető:

Dr. Barta Károly
egyetemi docens

Külső konzulens:

Dr. Pásztor László
tudományos főmunkatárs

Szeged, 2017

*„The soil varies from place to place,
and many of its properties vary in time too.
This is what makes the soil so fascinating”*

HEUVELINK & WEBSTER
(2001)*

BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉSEK

A talajtani információk iránti igények mind hazai, mind nemzetközi szinten számottevőek és folyamatosan bővülnek. A talaj multifunkcionalitásának felismerése ugyanakkor a talajfelvételezésekre fordítható erőforrások beszűkülésével egy időben következett be. Ezért világszerte törekednek a már meglévő talajtani információk mind alaposabb felhasználására, illetve a terepi felvételezések minimalizálására /optimalizálására. Hazánkban, jelenleg a talajokkal kapcsolatos igényeket a rendelkezésünkre álló térbeli talajinformációs rendszerek segítségével elégítjük ki. Az ezekben az adatbázisokban raktározott adatok pontszerű észlelésekhez kötöttek, vagyis ezen adatponti értékek regionalizálásával elégíthetjük ki a felhasználók specifikus igényeit. A pontszerű észlelésekhez kapcsolódó talajtani információk térbeli kiterjesztése legcélravezetőbben a geostatisztika módszereivel tehető meg.

Napjaink digitális talajtérképezése és mintavétel optimalizációja nagyban épít a geostatisztika megközelítéseire, melyeket hazánkban is sikeresen implementáltak a talajtanos szakemberek. Ugyanakkor a talajtani információk iránti igények természete is megváltozott az elmúlt években, melyek a rendelkezésünkre álló talajtani információkkal és az eddig alkalmazott, „hagyományos” geostatisztikai módszerekkel egyre ritkábban fedhetők le. Gyakori elvárás például, hogy a talajtulajdonság térképeken túl a térképek hibájáról, illetve bizonytalanságáról is álljanak rendelkezésre információk, melyek napjainkban elengedhetetlenek egy megalapozott döntéshez. Ezeknek az elvárásoknak a „hagyományos” geostatisztikai módszerekkel kapott eredmények nem, vagy csak részben felelnek meg. Ezért kiemelten fontos, hogy hazánk digitális talajtérképezési gyakorlatában meghonosítsuk azokat a geostatisztikai módszereket, melyekkel a fenti igények kielégíthetők. E módszerek sikeres adaptálásának első lépése, hogy a geostatistikával kapcsolatos elméleti megfontolásokat koherens és konzekvens módszertanban foglaljuk össze. Ezért doktori kutatásaim célkitűzései:

- Geostatisztikai megközelítésen alapuló, koherens digitális talajtérképezési és mintavétel optimalizációs módszertan kialakítása, mely:

* Heuvelink, G.B.M., Webster, R., 2001. Modelling soil variation: past, present and future. Geoderma 100, 269–301.

- elméleti és gyakorlati keretet nyújt a mintavétel megtervezésétől a talajtérkép(ek) közreadásáig,
 - konzekvens és egymással kompatibilis lépésekből épül fel,
 - különböző léptékekben alkalmazható,
 - képes számításba venni a rendelkezésünkre álló segédinformációkat a térbeli becslés, a térbeli bizonytalanság modellezése, illetve a mintavétel optimalizáció során,
 - magában foglalja a térkép hibájának, illetve bizonytalanságának értékelését,
 - továbbá komponensei módosíthatók az adaptált valószínűségi függvény szerint.
- A kialakított módszertan szabad-hozzáférésű, nyílt forráskódú szoftverek (*Free and Open Source Software, FOSS*) segítségével legyen implementálható.
 - A regresszió krigelés alkalmazása különböző léptékekben. A regresszió krigeléssel előállított térképek hibájának értékelése.
 - Regresszió krigelésre felépített szekvenciális sztochasztikus szimuláció alkalmazása a térbeli bizonytalanság modellezésére.
 - A spatial simulated annealing (SSA) mintavétel optimalizációs algoritmus alkalmazása hazai mintaterületen.
 - Az egyváltozós SSA algoritmus kiterjesztése többváltozós mintavétel optimalizációs algoritmussá és alkalmazása hazai mintaterületen.

A kialakított módszertant három, hazai mintaterületen teszteltem, melyek mind kiterjedésükben, mind az ott érvényre jutó talajképződési folyamatok tükrében lényeges különbségeket mutattak. A kiválasztott mintaterületek: (1) szálkai kisvízgyűjtő (Szekszárdi-dombság), (2) előszállási szántóföldek (Közép-Mezőföld), illetve Zala megye. A vizsgálatok célváltozójaként a talajok szervesanyag-tartalmát választottam, mely kiemelkedő jelentőséggel bír nemcsak a talajtan, hanem a környezet- és földtudományok számára is. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a módszertan alkalmas egyéb talajtulajdonságok digitális térképezésére, illetve mintavétel optimalizációjára is.

ELMÉLETI MEGFONTOLÁSOK

A talajtulajdonságok és a talajban megfigyelhető jelenségek bonyolult, komplex, egymásra kölcsönösen hatást gyakorló fizikai, kémiai, illetve biológiai folyamatok eredői, melyek tér- és időbeli változékonyságáról töredékesek az ismereteink. Ennek következtében a talaj sok esetben úgy jelenik meg számunkra, mintha az egy véletlenszerű realizációja lenne. Ezért a talaj egy sztochasztikus folyamatként közelíthető és modellezhető. E

megközelítés alapján *a talajtulajdonságok olyan jellemzői a talajnak, melyek a mérési hely végtelen kicsiny sugarú környezetében valószínűségi változónak tekinthetők, ugyanakkor megadható olyan térben értelmezett függvény, mely ezeket a valószínűség változókat összekapcsolja.* Az ilyen tulajdonságokat a geostatisztika *regionalizált változóknak* nevezi.

A fenti elméleti megfontolásokat alapul véve a kialakított digitális talajtérképezési és mintavétel optimalizációs módszertan explicit tekinti a talajtulajdonságok térbeli változékonyságát regionalizált változónak, mely az alapját jelenti a mintavétel optimalizációnak, a térbeli becslésnek, illetve a térbeli bizonytalanság modellezésének.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Talajtani adatbázisok és segédinformációk

A kiválasztott, három mintaterületről archív talajtani információk álltak a rendelkezésemre, melyek szervesanyag-tartalom adataival teszteltem a kialakított módszertant. Doktori kutatásaimban új, kiegészítő mintavételezésekre nem került sor. A felhasználandó segédinformációkat a mintaterületekről rendelkezésemre álló digitális domborzatmodellek, illetve a belőlük származtatott morfometriai paraméterek jelentették. Ezek mellett további segédinformációként használtam fel az előszállási, illetve száلكai mintaterületen a 2005-ös légifotók alapján előállított felszínfedettségi térképeket, illetve Zala megyében a Digitális Kreybig Talajinformációs Rendszer (DKTIR) talajok vízgazdálkodási tulajdonság talajtérképezési egységeit.

Térképezési módszertan

Elsőként feltáró alapadat elemzést végeztem a szervesanyag-tartalom adatokon, melynek célja volt az adatok elsődleges értékelése. Az elemzés során olyan módszereket is alkalmaztam, melyek számításba vették az adatpontok földrajzi helyzetét. Vizsgáltam továbbá az adatpontok és a segédinformációk kapcsolatát.

A mintaterületek talajainak szervesanyag-tartalmát *regresszió krigeléssel* modelleztem, mely *szimultán alkalmazza a térképezendő talajtani változó és a rendelkezésünkre álló segédinformációk közötti többszörös lineáris regressziót, illetve a regresszió reziduumaire felépített egyszerű krigelési rendszert a célváltozó térbeli becslésére:*

$$Z_{RK}^*(\mathbf{u}) = \mathbf{q}^T(\mathbf{u}) \cdot \boldsymbol{\beta}_{GLS} + \boldsymbol{\lambda}_{SK}^T(\mathbf{u}) \cdot (\mathbf{z} - \mathbf{Q} \cdot \boldsymbol{\beta}_{GLS}), \quad (1)$$

ahol $\mathbf{q}(\mathbf{u})$ a független változók vektora, $\boldsymbol{\beta}_{GLS}$ a regressziós együtthatók vektora, $\boldsymbol{\lambda}_{SK}(\mathbf{u})$ az egyszerű krigelési súlyok vektora, \mathbf{z} az adatponti értékek vektora és \mathbf{Q} a független változók adatpontokra vonatkozó mátrixa. A

regressziós együtthatókat a GLS (*generalized least squares*) módszerrel becsültem, mely képes számításba venni a reziduumok kovariancia mátrixát. A multikollinearitás csökkentésére főkomponens analízist végeztem. A térbeli becslésekből szervesanyag-tartalom térképet szerkesztettem az egyes mintaterületekre.

Az elkészített térképeket független kontroll pontok segítségével értékeltem, kivéve a százkai mintaterület esetén, ahol az LOOCV (*leave-one-out cross validation*) keresztvalidációt alkalmaztam. A következő hibamértékeket határoztam meg: átlagos hiba, átlagos abszolút hiba, illetve az átlagos négyzetgyök hiba krigelési szórással standardizált értéke.

Előszálláson a térbeli bizonytalanságot a **regresszió krigelésre felépített szekvenciális sztochasztikus szimulációval** modelleztem. A krigeléssel szemben a sztochasztikus szimulációk célja, hogy a regionalizált változónak olyan alternatív, de egyenlően valószínű realizációit állítsák elő, melyek visszaadják a modell statisztikáit. Ezért a sztochasztikus szimulációk bizonyos globális értelemben vett „legjobb becslést” adják, mely következtében modellezhető a térbeli bizonytalanság. Ennek segítségével olyan döntési helyzetek is támogathatók, melyekre a krigelés alkalmatlan.

Modell alapú talajmintavétel optimalizációs módszertan

A kialakított, modell alapú mintavétel optimalizációs módszertan alapját az SSA (*spatial simulated annealing*) **algoritmus** jelenti, mely **olyan iteratív, kombinatorikus, modell alapú optimalizációs algoritmus, mely a lehetséges, alternatív mintavételi elrendezések (ún. kombinációk) szekvenciáját oly módon állítja elő, hogy minden új mintavételi kombináció az azt megelőző kombináció véletlenszerű megváltozásából jön létre.** A térképezési módszertan követelményeit figyelembe véve, az optimalizáció minőségi mértékének a regresszió krigelés becslési varianciáját választottam:

$$\sigma_{\text{RK}}^2(\mathbf{u}) = C(0) - \mathbf{c}^T \cdot \boldsymbol{\lambda}_{\text{SK}}(\mathbf{u}) + [\mathbf{q}(\mathbf{u}) - \mathbf{Q}^T \cdot \boldsymbol{\lambda}_{\text{SK}}(\mathbf{u})]^T \cdot (\mathbf{Q}^T \cdot \mathbf{C}_R^{-1} \cdot \mathbf{Q})^{-1} \cdot [\mathbf{q}(\mathbf{u}) - \mathbf{Q}^T \cdot \boldsymbol{\lambda}_{\text{SK}}(\mathbf{u})] \quad (2)$$

ahol $C(0)$ a reziduális komponens varianciája, \mathbf{c} az adatpontok és az ismeretlen pont közötti kovariancia vektora és \mathbf{C}_R a reziduumok kovariancia mátrixa. A becslési variancia első komponense az egyszerű krigelés becslési varianciája, míg a második komponense a trend hiba varianciája. A választott minőségi mértékből képzett célfüggvénynek – melynek globális minimuma jelenti az optimalizált mintavételi elrendezést – a regresszió krigelés becslési varianciájának összterületi átlagát választottam.

Az SSA algoritmus alkalmazhatóságának egyik legnagyobb korlátja az, hogy egy időben csak is egy talajtulajdonságra optimalizálható a mintavételezés. Ezért kiterjesztettem az algoritmust oly módon, hogy az

szimultán legyen képes több talajtulajdonságra optimalizálni a mintavételezést. Az optimalizáció minőségi mértékét ez esetben is a regresszió krigeles becslési varianciája jelentette, mely a térképezendő talajtulajdonságok és a rendelkezésünkre álló segédinformációk közötti regressziós struktúrákból, illetve a domináns talajjellemző variogram modelljéből vezethető le. A célfüggvényt ez esetben is a minőségi mérték összeszerületi átlaga jelentette.

A modell alapú talajmintavétel optimalizációs módszertan tesztelésére 8 scenáriót állítottam be az előszállási mintaterületen. A mintavétel optimalizációs scenáriókat úgy alakítottam ki, hogy azok jól reprezentálják a módszertan alkalmazhatóságát. 4 egyváltozós scenáriót állítottam be a szervesanyag-tartalom térképezésére. 2 scenáriót a többváltozós algoritmus tesztelésére állítottam be, ahol a cél a szervesanyag-tartalom és a termőréteg vastagság együttes térképezése volt. További 2 scenárió segítségével teszteltem a módszertan azon szélsőséges esetekre vonatkozóan, mikor más modellt adaptálnánk a valószínűségi függvényhez. A két szélsőséges esetet a hagyományos krigeles, illetve a többszörös lineáris regresszió jelentette. Esetükben a cél az volt, hogy oly módon optimalizáljam a mintavételezést a humusztartalomra vonatkozóan, hogy az a lehető legjobban szolgálja ki a fenti térbeli becslő eljárásokat. Esetükben az optimalizáció minőségi mértékét a hagyományos krigeles becslési varianciája, illetve regresszió hiba varianciája jelentette. Az egyes mintavétel optimalizációs scenáriók során számos mintavételi megszorítást vettem figyelembe, mint például: a vételezhető minták száma, a korábbi felmérésekből származó mintavételi pontok, a mintavételezés számára irreleváns vagy hozzáférhetetlen területek, a rendelkezésünkre álló segédinformációk, illetve a mintaterület szabálytalan határai.

Az optimalizált mintavételi elrendezések értékelésére az üres-tér függvényt, a krigeles szomszédok térképeit, illetve a Kolmogorov-Smirnov próbát alkalmaztam. Segítségükkel azt vizsgáltam, hogy az egyes scenáriókra kapott mintavételi elrendezések megfelelően fedik-e le a földrajzi és/vagy attribútum teret.

EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA, TÉZISEK

1. A talajtulajdonságok térbeli változékonysága hatékonyan modellezhető, ha regionalizált változóként tekintünk rájuk.

Kutatásaim során rámutattam arra, hogy a talajtulajdonságok bonyolult, komplex, egymásra kölcsönösen hatást gyakorló fizikai, kémiai, illetve biológiai folyamatok eredői, melyek tér- és időbeli változékonyságáról töredékesek az ismereteink. Ennél fogva a talaj sok esetben úgy jelenik meg számunkra, mintha az egy véletlenszerű folyamat realizációja lenne. Ezért a talaj egy sztochasztikus folyamatként modellezhető. E

megközelítés alapján a talajtulajdonságok olyan jellemzői a talajnak, melyek a mérési hely végtelen kicsiny sugarú környezetében valószínűségi változónak tekinthetők, ugyanakkor megadható olyan térben értelmezett függvény, mely ezeket a valószínűség változókat összekapcsolja. Az ilyen tulajdonságokat a geostatistika regionalizált változóknak nevezi.

2. A kialakított, digitális talajtérképezési és mintavétel optimalizációs módszertan szabad-hozzáférésű, nyílt forráskódú szoftverekkel (*free and open source software, FOSS*) implementálható és fejleszhető.

- a. A rendelkezésemre álló folytonos és kategória típusú segédinformációk előkészítéséhez *SAGA GIS*, a geometematikai és geostatistikai elemzésekhez, illetve modellezésekhez *R szoftver környezetet* használtam. A kutatásaim eredményeit (például: ábrák, hisztogramok, szórásdiagramok, indikátor térképek, realizációk, mintavételi elrendezések, kalibrációs görbék) is e szoftverek segítségével mutattam be. Kivételt képeztek a kartografált szervesanyag-tartalom térképeket, melyek előállításához ArcGIS környezetet használtam.
- b. *R szoftver környezetben* több eljárást is továbbfejlesztettem, illetve kidolgoztam, melyek a kialakított módszertanhoz igazodnak. Ezek az eljárások: (1) módosított üres-tér függvény, (2) krigelési szomszédok térképezése, (3) regresszió krigelésen alapuló szekvenciális sztochasztikus szimuláció, illetve (4) többváltozós mintavétel optimalizáció.
- c. Kutatásaimban rámutattam továbbá arra, hogy szabad-hozzáférésű, nyílt forráskódú szoftver környezet lehetőséget biztosít a kialakított digitális talajtérképezési és mintavétel optimalizációs módszertan további fejlesztésére.

3. A regresszió krigelés alkalmas a folytonos talajtulajdonságok térbeli modellezésére különböző léptékekben. Ugyanakkor tekintettel kell lenni a térképezendő talajtulajdonság és a rendelkezésünkre álló segédinformációk közötti linearitásra.

A kiválasztott mintaterületekre regresszió krigeléssel előállított szervesanyag-tartalom térképek szakértői elemzése során arra a megállapításra jutottam, hogy azok jól reprezentálták a szervesanyag-tartalom térbeli eloszlását. A meghatározott hibamértékek (átlagos hiba, átlagos abszolút hiba, illetve az átlagos négyzetgyök hiba krigelési szórással standardizált értéke) közel álltak azok várható értékéhez, mely alapján szintén elmondható volt, hogy az előállított térképek jól reprezentálják a választott talajtulajdonság térbeli változékonyságát. A Zala megyei térkép értékelése során kimutattam, hogy a kiugróan magas szervesanyag-tartalommal (>10%) jellemezhető területeken a módszer

alul becsülte a célváltozó értékét. Ennek háttérben a talajokban raktározott szerves anyag mennyiségét befolyásoló talajképződési folyamatok komplexitása és nem lineáris kapcsolata áll.

4. A regresszió krigelésen alapuló szekvenciális sztochasztikus szimuláció alkalmas a térbeli bizonytalanság modellezésére a digitális talajtérképezésben. Az előállított realizációk visszaadják a reziduumok variogram modelljét. A realizációk révén vizuálisan és kvantitatívan is értékelhető a térbeli bizonytalanság.

- a. A regresszió krigelésre felépített szekvenciális sztochasztikus szimuláció segítségével 100 alternatív, egyenlően valószínű realizációt állítottam elő az előszállási mintaterülete. A sztochasztikus szimuláció során az egyes grid pontokban a feltételes kumulatív eloszlás függvény varianciáját az egyszerű krigelés varianciájával határoztam meg. Az eredmények alapján elmondható, hogy a realizációk visszaadták a felhasznált, reziduumokra illesztett variogram modellt.
- b. Az előállított 100 alternatív, egyenlően valószínű realizációk közötti különbség a szervesanyag-tartalom térbeli leképezhetőségének a bizonytalanságát fejezi ki. A realizációk alapján elmondható volt, hogy a mintaterület alacsony lejtésű területein a szimulált értékek „alig” különböztek egymástól. Ugyanakkor megfigyelhető volt, hogy területet felszelő löszvölgyek mentén a realizációk közötti különbség sokkal szembetűnőbb.
- c. Az előállított realizációk alapján megadtam az egyes grid pontok feletti gyakorisági eloszlást, melyből származtattam a szervesanyag-tartalom várható érték típusú becslését, illetve a hozzátartozó 95%-os konfidencia intervallumot. Az értékekből térképet szerkesztettem. Bemutattam, hogy a 95%-os konfidencia intervallum szélességét ábrázoló térkép direkt információt nyújt a szervesanyag-tartalom várható érték típusú becslésének bizonytalanságáról.

5. Az egyes grid pontok feletti gyakorisági eloszlások alapján olyan célspecifikus talajtérképek származtathatók, melyekre a „hagyományos” krigelési eljárások alkalmatlanok.

Az előszállási mintaterületen megadott, grid pontok feletti gyakorisági eloszlások felhasználásával négy valószínűségi térképet állítottam elő. Az egyes térképek olyan „események” bekövetkezésének a valószínűségét ábrázolják a térben, mint például: mi annak a valószínűsége, hogy a szervesanyag-tartalom magasabb, mint 2%, de kisebb vagy egyenlő, mint 3%. Az ilyen jellegű „lekérdezésekre” a „hagyományos” krigelési eljárások – konstrukciójuk miatt –

alkalmatlanok. Az eredmények alapján elmondható, hogy az így kapott célspecifikus talajtérképek segítségével számos, talajtani információkkal szembeni igény kielégíthető, továbbá ezek segítségével hatékonyan támogathatók a szakmai döntések.

6. A regresszió krigelés becslési varianciája, általában véve, nem mértéke a lokális becslési pontosságnak. Ugyanakkor alkalmas az egyes geometriai adat elrendezések rangsorolására, mely felhasználható a talajmintavételezések optimalizációjában. Független lévén az adatponti értékektől idő- és költség hatékony minőségi mértéke az optimalizációnak.

- a. A regresszió krigelést a legjobb lineáris egyértelmű becslő (*best linear unbiased estimator, BLUE*) eljárás, mely „legjobb” abban az értelemben, hogy minimalizálja a becslült érték hibájának varianciáját. Azonban a becslési variancia független az adatponti értékektől. Ezért a becslési variancia csakis akkor alkalmazható a lokális becslési pontosság jellemzésére, ha (1) a hiba egy normál eloszlású valószínűségi változóként modellezhető és (2) a hiba variancia független az adatponti értékektől. Ezért, általában véve, a regresszió krigelés becslési varianciája nem tekinthető a lokális becslési pontosság mértékének.
- b. Rámutattam arra, hogy a regresszió krigelés definíciójából következik, hogy alkalmas az egyes alternatív, geometriai adat elrendezések rangsorolására. Továbbá képes számításba venni a földrajzi és attribútum tér lefedettségét, mely előnyös a mintavételezések optimalizációjában.
- c. A regresszió krigelés becslési varianciájának definíciójából következik, hogy független az adatponti értékektől, ezért értéke már a mintavételezések előtt származtatható/becsülhető. E szerint idő- és költség-hatékony megoldást jelent a talajmintavételezések optimalizációjában. Ezen előnyös tulajdonságát használtam fel a beállított scenáriók futtatása során.

7. A kialakított, modell alapú mintavétel optimalizációs módszertan, melynek minőségi mértékét a regresszió krigelés becslési varianciája jelenti, alkalmas a talajmintavételezések optimalizálására. A módszertan számos mintavételi megszorítás és igény figyelembe vételére alkalmas. Továbbá a lehető legjobban támogatja a regresszió krigelésen alapuló térképezési módszertant.

- a. A módosított üres tér, a krigelési szomszédság térképek, illetve a Kolmogorov-Smirnov próba eredményei alapján elmondható, hogy az optimalizált mintavételi elrendezések megfelelően fedték le a földrajzi és attribútum teret a mintavételezési scenáriók (1.,

- 2., 3. és 4.) során. A megszerkesztett kalibrációs görbék (2. és 4. scenárió) segítségével megállapítható volt továbbá az a minimális mintaméret az egyes scenáriókra, mely a földrajzi és attribútum tér optimális lefedéséhez szükséges.
- b. A scenáriók eredményei alapján elmondható volt, hogy a módszertan a mintavételi pontok optimális elhelyezése során képes számításba venni a vételezhető minták számát, a korábbi felmérésekből származó mintavételi pontokat, a mintavételezés számára irreleváns vagy hozzáférhetetlen területeket, a rendelkezésünkre álló segédinformációkat, az előre meghatározott minőségi mérték értékét, illetve a mintaterület szabálytalan határait.
 - c. A scenáriók rámutattak arra, hogy a regresszió krigelés becslési varianciája (mint választott minőségi mérték) szimultán keresi a földrajzi és attribútum tér, adott mintavételi megszorítások melletti, optimális lefedettségét. Ez megfelel a regresszió krigelésen alapuló térképezési módszertannak, mely megköveteli: (1) a segédinformációk által meghatározott attribútum tér és (2) a mintaterület által meghatározott földrajzi tér egységes lefedettségét.

8. A kidolgozott, mintavétel optimalizációs módszertan akkor is alkalmazható, ha más modellt adaptálunk a valószínűségi függvényhez. Ez a módszertan flexibilitásáról tanúskodik.

A beállított két mintavétel optimalizációs scenáriót állítottam be annak tesztelésére, hogy a módszertan akkor is alkalmazható, ha más modellt adaptálnánk a valószínűségi függvényhez. A scenáriók eredményei rávilágítottak arra, hogy a módszertan flexibilis az adaptált modellekkel kapcsolatban

- a. A hagyományos krigelés becslési varianciája (mint minőségi mérték) révén az SSA optimalizálta a mintavételezést a földrajzi térben (7. scenárió). A módosított üres-tér függvény és a krigelési szomszédság térkép alapján elmondható volt, hogy a módszertan a földrajzi tér „kvázi” szabályos lefedésére „törekedett”, mely támogatja a hagyományos krigelést.
- b. A regresszió hiba varianciája (mint minőségi mérték) révén az SSA optimalizálta a mintavételezést az attribútum térben (8. scenárió). A Kolmogorov-Smirnov próba eredményei alapján elmondható volt, hogy a módszertan az attribútum tér optimális lefedésére „törekedett”, mely támogatja a többszörös lineáris regressziót. A mintavételi pontok csoportosult mintázatot mutattak, melyet a módosított üres-tér függvény is megerősített.

9. A kiterjesztett SSA algoritmus alkalmas, hogy szimultán optimalizálja a mintavételezést a térképezendő talajtulajdonságokra vonatkozóan.

A többváltozós mintavétel optimalizációs scenáriókra (5. és 6.) kapott eredmények alapján elmondható volt, hogy a kiterjesztett algoritmus alkalmas volt a mintavételi elrendezések optimalizálására a két térképezendő talajtulajdonságot tekintve. A módosított üres-tér függvény, a krigelési szomszédság térképek, illetve a Kolmogorov-Smirnov próba eredményei alapján elmondható volt, hogy a mintavételi elrendezések megfelelően fedték le mind a földrajzi, mind az attribútum teret. Emellett a scenáriók eredményei rámutattak arra, hogy a többváltozós algoritmus megtartotta az egyváltozós SSA előnyeit, vagyis a mintavétel optimalizáció során számos mintavételi megszorítást képes számításba venni.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

- Szatmári, G.**, 2013. High-resolution mapping of soil organic matter content based on Regression Kriging in a study area endangered by erosion in Hungary. In: Horváth, J. et al. (Eds.) XVI. Congress of Hungarian Geomathematics and V. Congress of Croatian and Hungarian Geomathematics. Hungarian Geological Society, Mórahalom. pp. 76–79. (ISBN:978-963-8221-49-0)
- Szatmári, G.**, Barta, K., 2013. Csernozjom talajok szervesanyag-tartalmának digitális térképezése erózióval veszélyeztetett mezőföldi területen. *Agrokémia és Talajtan* 62(1), 47–60.
- Szatmári, G.**, Laborczi, A., Illés, G., Pásztor, L., 2013. A talajok szervesanyag-készletének nagyléptékű térképezése regresszió krigelemmel Zala megye példáján. *Agrokémia és Talajtan* 62(2), 219–234.
- Szatmári, G.**, 2014. Optimization of sampling configuration by spatial simulated annealing for mapping soil variables. In: Cvetkovic, M. et al. (Eds.) XVII. Congress of Hungarian Geomathematics and VI. Congress of Croatian and Hungarian Geomathematics. Croatian Geological Society, Zagreb. pp. 105–111. (ISBN:978-953-95130-8-3)
- Szatmári, G.**, 2015. Using a sequential stochastic simulation approach based on regression kriging to generate functional soil maps. In: Horváth, J. et al. (Eds) XVIII. Congress of Hungarian Geomathematics and VII. Congress of Croatian and Hungarian Geomathematics. Hungarian Geological Society, Mórahalom. pp. 134–140. (ISBN:978-963-8221-58-2)
- Szatmári, G.**, Barta, K., Farsang, A., Pásztor, L., 2015. Testing a sequential stochastic simulation method based on regression kriging in a catchment area in Southern Hungary. *Geologia Croatica* 68(3), 273–283. **(IF: 0,625 [2015])**
- Szatmári, G.**, Barta, K., Pásztor, L., 2015. An application of a spatial simulated annealing sampling optimization algorithm to support digital soil mapping. *Hungarian Geographical Bulletin* 64(1), 35–48.
- Szatmári, G.**, Barta, K., Pásztor, L., 2016. Multivariate Sampling Design Optimization for Digital Soil Mapping. In: Zhang, G.-L. et al. (Eds.) Digital Soil Mapping Across Paradigms, Scales and Boundaries. Springer-Verlag, Singapore. pp. 77–87. (ISBN:978-981-10-0414-8)
- Szatmári, G.**, Pásztor, L., 2016. Geostatistika a talajtérképezésben: Szemle. *Agrokémia és Talajtan* 65 (1), 95–114.
- Tóth, G., Hermann, T., **Szatmári, G.**, Pásztor, L., 2016. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the Total Environment* 565, 1054–1062. **(IF: 3,976 [2015/2016])**