

A talajspektrális könyvtárak nemzetközi jelentősége és hazai megalapozása

^{1,2*}CSORBA Ádám, ¹SZEGI Tamás, ³VÁRSZEGI Gábor, ^{1,4}NAGY Gábor, ¹MICHÉLI Erika

¹Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Gödöllő, Magyarország

²Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Agrártechnológiai Nemzeti Laboratórium, Gödöllő, Magyarország

³Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal, Mezőgazdasági Genetikai Erőforrások Igazgatóság, Budapest, Magyarország

⁴SCLab - SoilChem Agrár és Környezetanalitikai Laboratórium, Mórahalom, Magyarország

(Beérkezett: 2023.10.09.; Elfogadva: 2023.12.15.)

(Online megjelent: 2024.02.02.)

Szemle

© Szerző(k) 2023



Összefoglalás

Napjainkban soha nem látott igény mutatkozik megfelelő mennyiségű és minőségű talajadatra és információra. Spektroszkópiai technológiák a hagyományos laboratóriumi módszerekkel együttesen, párhuzamosan alkalmazva lehetőséget kínálnak a talajfelvételezés idő- és költséghatékonyabbá, valamint környezetkímélőbbé tételére. Jelen munkában lokális, regionális és globális léptékű talajspektrális könyvtárak bemutatása mellett az első országos szintű, az Agrártechnológiai Nemzeti Laboratórium projekt keretében kidolgozásra kerülő, Magyarország talajtani változatosságát reprezentáló spektrális adatbázis létrehozásának koncepcióját mutatjuk be. A spektrális könyvtárak olyan speciális talajadatbázisoknak tekinthetők, melyek tartalmazzák egy adott terület talajait reprezentáló talajminták hagyományos laboratóriumi módszerrel meghatározott paramétereit, valamint spektroszkópiai módszerrel rögzített spektrumait. A spektrális könyvtárakban tárolt adatok alapján elvégzett, spektroszkópiai kalibrációkra alapozott talajparaméter becslési eljárások lehetőséget kínálnak az adatbázisban szereplő talajminták fizikai-kémiai-ásványtani tulajdonságaihoz hasonló minták paramétereinek spektrális alapú megbízható megbecsléséhez. A hazai spektrális könyvtár alappilléret a Talajvédelmi Információs és Monitoring (TIM) rendszer mintavételezés kezdeti évében (1992-ben) gyűjtött, talajok genetikai szintjeiből vett talajmintákról felvett spektrumokra építjük. A spektrális adatbázist a közép- és infravörös (middle-infrared, MIR), valamint a látható- és közeli infravörös (visible and near-infrared, VIS-NIR) tartományban, a Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN) iránymutatásai alapján rögzített spektrális adatokra építjük. A

*Levelező szerző: CSORBA ÁDÁM, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, 2100 Gödöllő, Páter K. u. 1.
E-mail: csorba.adam@uni-mate.hu

folyamatosan bővülő spektrális könyvtár, és az erre az adatbázisra épülő talajtulajdonság-becselő eljárás lehetőséget fog kínálni számos fizikai és kémiai paraméterének megbízható meghatározására, ezzel (számottevő többletköltség nélkül) nyújt lehetőséget a jelenlegi laboratóriumi kapacitás növelésére.

Kulcsszavak: spektroszkópia, GLOSOLAN, spektrális könyvtár, talajparaméter-becslés

Bevezetés

A talaj az egyik legfontosabb, nehezen megújuló természeti erőforrásunk, mely az emberi tevékenységek széles skálájának nélkülözhetetlen forrása (VÁRALLYAY, 1998). A talajoknak az agráriumban betöltött és egyéb környezeti szerepének kiemelt jelentőségét felismerve egyre nyilvánvalóbbá válik, hogy a kizárólag hagyományos talajvizsgálati módszerekre alapozott talajadat-szolgáltatás csak korlátozottan képes kielégíteni napjaink talajinformáció-igényét (ADHIKARI & HARTEMINK, 2016; JÓNSON & DAVÍDSDÓTTIR, 2016). A konvencionális laboratóriumi eljárások alkalmazásának időbeli és anyagi korlátaira rámutatva körvonalazódik egy globálisnak is tekinthető trend, ami olyan technológiák talajvizsgálati gyakorlatba való integrálását támogatja, melyeket a hagyományos módszerekkel együttesen, párhuzamosan alkalmazva lehetőséget adnak a talajfelvételezés idő- és költségkímélőbbé, valamint környezetkímélőbbé tételére (NOCITA et al., 2015; VISCARRA ROSSEL et al., 2016; SHEPHERD et al., 2022).

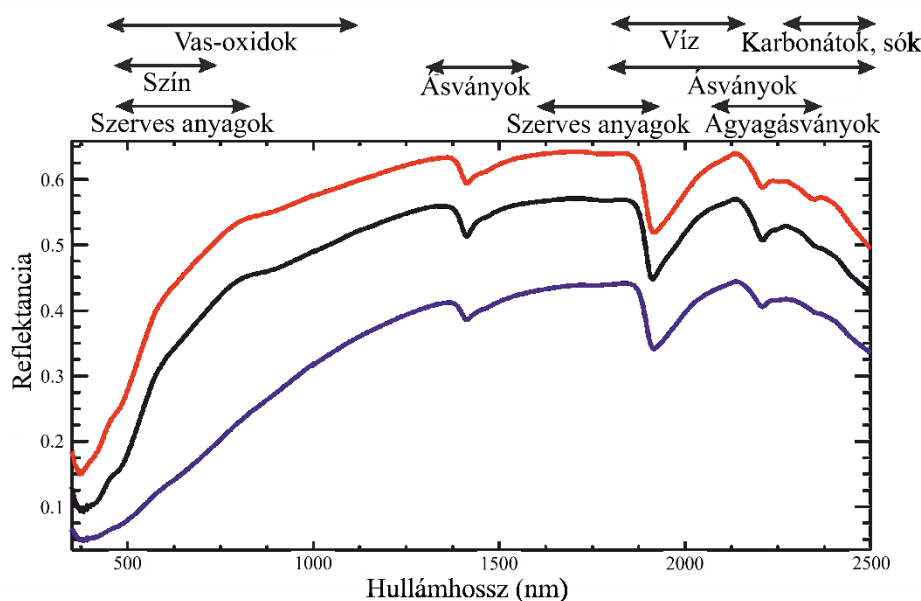
E globális törekvéseknek egyik fő pillére a száraz kémiai, spektroszkópiái technológiáknak a talajfelvételezés módszertanába való integrálása. Spektroszkópiái mérések spektrális abszorbanciája/reflektanciája, a spektrumokban megfigyelhető elnyelési/visszaverődési sávok jelenléte, azok tulajdonságai (szélességük, alakjuk és pozíciójuk) a talajokban jelenlévő alkotók mennyiségétől és minőségétől függ (VISCARRA ROSSEL et al., 2009). Az a tény, hogy ezeknek a módszereknek az alkalmazásával egyetlen méréssel számos talajalkotóról egyidejűleg nyerünk információt, a technológia alkalmazását rendkívül hatékonyá tudja tenni talajok összetételének vizsgálatában.

Napjainkban soha nem látott igény mutatkozik megfelelő mennyiségű és minőségű talajadatra és információra. Válaszul erre a kihívásra az Agrártechnológiai Nemzeti Laboratórium (ANL) (VOJTELA & BÉRES, 2021) projekt komponensei közé beillesztésre került, egy a spektroszkópiái módszerek integrálási lehetőségeit megalapozó alapkutatási komponens, melyet a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Környezettudományi Intézete (MATE KÖTI) koordinál. A projekt fő célja egy centralizált, személyes adatokat nem tartalmazó talajvédelmi és hatósági talajtani adatbázis létrehozása, mely a tápanyag-gazdálkodási szaktanácsadási rendszer és a digitális talajtani adatbázis (TalajWeb) alapja (HEFLER et al., 2021). A projekt keretében létrehozásra kerül a hazai talajlaboratóriumokban mért vizsgálati eredményeket tartalmazó, folyamatosan bővülő országos, központi adatbázis, kiegészülve egy hazai talajspektrális könyvtárral. A cél eléréséhez kialakításra kerül egy egységes nemzetközi standardoknak megfelelő modern laborvizsgálati

módszertan a szükséges infrastrukturális és eszközfejlesztésekkel, elsősorban a nem invazív, környezetbarát, spektroszkópiai alapokra helyezett műszerparkra építve. Jelen kézirat keretében beszámolunk a talajspektrális könyvtár kidolgozásának koncepciójáról, felépítéséről, valamint a munka előrehaladásáról.

A VIS-NIR és MIR spektroszkópia elméleti háttere

A talajtani kutatásokban és gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott technológiák közé tartozik a látható és közeli-infravörös (visible and near-infrared – VIS-NIR) valamint középső infravörös (middle-infrared – MIR) spektroszkópia. A spektroszkópiai eljárásokra épülő talajvizsgálati módszerek alapja a talajalkotók és az elektromágneses (EM) sugárzás kölcsönhatásának vizsgálata. A vizsgálatok során előre ismert hullámhosszal (és frekvenciával) jellemezhető EM sugárással „világítjuk meg” a megfelelően előkészített talajmintát, és a hullámhossz függvényében rögzítjük (mérési módtól függően) a minta által elnyelt/visszavert sugárzás intenzitását, melyet a hullámhossz, vagy hullámszám függvényében vizsgálunk.

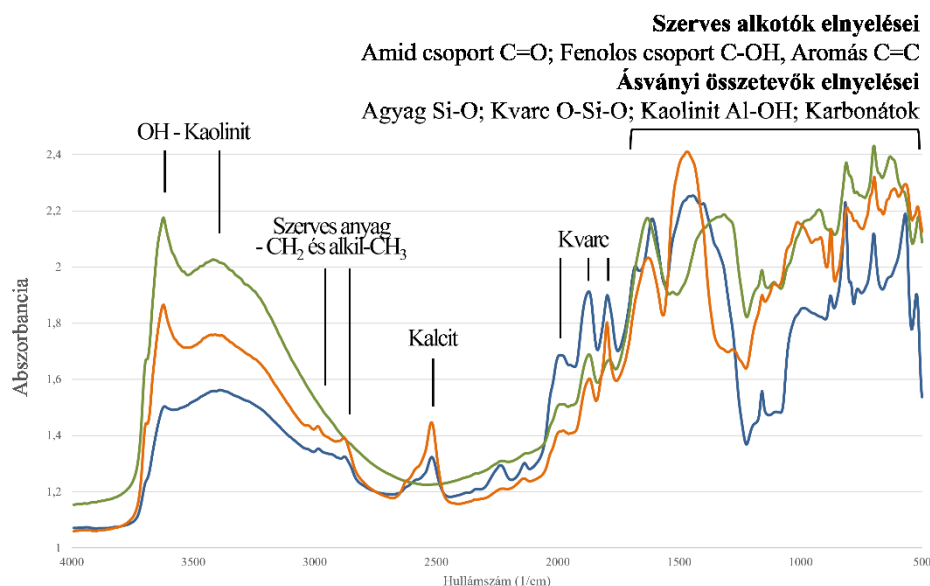


1. ábra

Talajokról felvett VIS-NIR reflektancia spektrumok és a talajalkotók meghatározásában kulcsszerepet betöltő spektrális tartományok

A VIS-NIR spektroszkópiai mérések során az EM spektrum 350 és 2500 nm közötti hullámhossz-tartományában vizsgáljuk az anyag és EM sugárzás kölcsönhatásait. Ebben a tartományban a talajok ásványaiban és szerves alkotóiban,

atomi-molekuláris szinten lejátszódó elektromos folyamatok és (az elsősorban a MIR tartományban detektálható) molekuláris alaprezgések felharmonikus és kombinációs rezgéseivel kapcsolódó elnyelési sávokat láthatunk (CLARK, 1999; SCHWERTMANN, 1993; STEVENS et al., 2008; CHABRILLAT et al., 2002; METTERNICHT & ZINCK, 2003; LAGACHERIE et al., 2008; BEN-DOR et al., 2006). Minden (ebben a tartományban spektrálisan aktív) talajalkotó rendelkezik karakterisztikus spektrális ujjlenyomattal, mely alapján az adott anyag beazonosítható. Talajokról felvett spektrumok alapján (1. ábra) látható, hogy az egyes talajalkotók spektrális ujjlenyomatai egyszerre jelennek meg a görbéken. Ennek köszönhetően egyetlen spektrum alapján számos fontos talajparaméterről nyerünk egyidejűleg információt annak figyelembevételével, hogy a különböző alkotók spektrális ujjlenyomatai nem feltétlenül egymás mellett jelennek meg, hanem elsősorban egymást akár átfedve mutatkoznak.



2. ábra

Példák a kutatás során vizsgált talajminták reprezentatív MIR spektrumaira, az ásványi és szerves alkotók jellegzetes spektrális ujjlenyomataival (LE GUILLOU et al., 2015 nyomán)

A Képre a CC BY 4.0 License feltételei nem alkalmazhatók

A MIR spektroszkópiai mérések során az EM spektrum 2500 és 25000 nm közötti hullámhossz tartományában vizsgáljuk az anyag és az EM sugárzás kölcsönhatásait. A VIS-NIR tartománytól eltérően, a spektrális görbéket ábrázoló diagramok vízszintes tengelyén nem a hullámhossz értékeket tüntetjük fel, hanem a hullámszámot. A MIR spektrális régióban (4000–400 1/cm hullámszám-tartomány) detektálható spektrális jelenségek molekuláris alaprezgések frekvenciájának

megfelelő hullámhosszúságú EM sugárzás elnyelésére vezethetőek vissza (2. ábra). A talajokról felvett MIR spektrum információban rendkívül gazdag és eltérően a VIS-NIR régióban rögzített görbékétől a spektrális ujjlenyomatok egymástól jobban elkülönülnek. A MIR tartományban számos talajalkotó detektálható, melyek közül a szerves anyagok, agyagásványok, karbonátok, kvarc, valamint az ezen talajalkotók által befolyásolt „másodlagos” talajtulajdonságok (pl. T-érték, kémhatás) kerültek a figyelem középpontjába (JANIK et al., 1998; VISCARRA ROSSEL et al., 2006; ZHANG et al., 2021).

A fejlesztés módszertani kerete - GLOSOLAN

A fejlesztés módszertani keretét a Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN) iránymutatásai határozzák meg (URL1). A GLOSOLAN a FAO Global Soil Partnership (GSP) egyik fő technikai hálózata, melynek fő célkitűzése globális szinten a talajlaboratóriumok vizsgálati kapacitásának megerősítése, megerősítése, és a talajanalitikai adatok harmonizációjának megvalósítása. A hálózat tevékenységének nagy szerepe van abban, hogy különböző forrásokból (különböző országok különböző talajlaboratóriumaiból) származó talajadatok egyrészt megbízhatóak, másrészt egymással összehasonlíthatóak legyenek, ami alapkövetelménye a kvantitatív információra építő, fenntartható talajhasználatot támogató döntéshozatali eljárásoknak.

A hagyományos talajanalitikai vizsgálatokat végző laboratóriumok támogatása (szabványosított módszerek és protokollok kidolgozása, módszertani harmonizáció, minőségbiztosítási és minőségellenőrzési tevékenységek) mellett a GLOSOLAN nagy hangsúlyt fektet a spektroszkópiai eljárásoknak a talajvizsgálati gyakorlatba való integrálására (BENEDETTI & VAN EGMOND, 2021; SHEPHERD et al., 2022). A hálózat ezen fő pillérének célkitűzése:

1. MIR spektroszkópiai mérésekre, és egy „arany-standard” laboratórium referencia adataira épülő, globálisan reprezentatív, folyamatosan bővülő talajspektrális könyvtár kidolgozása,
2. az erre épülő szabadon hozzáférhető, felhasználóbarát talajtulajdonság-bebecslő szolgáltatás nyújtása,
3. hozzájárulás a spektrális könyvtárhoz és a talajtulajdonság-bebecslő szolgáltatást használni kívánó országok támogatása,
4. a talajspektroszkópiai módszerek harmonizációja standardok és protokollok kidolgozásán keresztül, valamint
5. az országok és laboratóriumok spektroszkópiai mérési kapacitásának megerősítése.

A spektrális alapokra helyezett talajparaméter bebecslés alapja I. Spektrális könyvtárak

Spektrális adatokra alapozott talajparaméter bebecslési eljárások gyakorlati alkalmazásához, illetve a talajok spektrális változatosságának jellemzéséhez elengedhetetlen a spektrális könyvtárak folyamatos fejlesztése. A spektrális

könyvtárak speciális talajtani adatbázisoknak tekinthetők. Tartalmazzák egy adott terület talajait reprezentáló minták hagyományos laboratóriumi módszerekkel meghatározott fizikai, kémiai, biológiai paramétereit (referencia-adatok), valamint a száraz kémiai eljárásokkal felvett spektrumait. Függetlenül attól, hogy lokális, regionális, vagy akár globális léptéket veszünk figyelembe, kiemelt jelentőséggel bír a spektrális könyvtár adott területre vonatkoztatott reprezentativitása (SHEPHERD et al., 2022). A spektroszkópiai kalibrációkra alapozott talajparaméter becslési eljárások ugyanis nem alkalmazhatóak olyan mintákra, melyekhez hasonló fizikai-kémiai-ásványtani tulajdonságokkal rendelkező minták nem szerepelnek a spektrális könyvtárban. Számos esetben bebizonyosodott, hogy lokális talajfelvételezési projektek keretében, talajképző tényezők által hasonló módon befolyásolt területre összeállított – lokális talajtani jellegzetességeket reprezentáló – spektrális könyvtárak csak korlátozottan használhatóak olyan területek talajainak jellemzéséhez melyek a talajképző tényezők eltérő hatásmechanizmusa alatt állnak (DANGAL et al., 2019; GOMEZ et al., 2020).

Spektrális könyvtárak létrehozása napjainkban világméretű tendenciává fejlődött. Az ICRAF-ISRIC (International Council for Research in Agroforestry; International Soil Reference and Information Centre) a talajok világméretű diverzitását reprezentáló adatbázisa Afrika, Ázsia, Észak-Amerika és Dél-Amerika 58 országából származó, összesen 785 talajszelvényből gyűjtött 4438 talajmintáról felvett VIS-NIR spektrumot tartalmaz. A referencia méréseket különböző laboratóriumokban végezték el a standard ISRIC mérési módszerekkel (VAN REEUWIJK, 2002).

Az ausztrál spektrális könyvtár közel 4000 szelvényéből vett 21500 talajminta VIS-NIR spektrális reflektanciáját tartalmazó nagyméretű adatbázis. A minták különböző – kontinentális, regionális és farm szintű – talajvizsgálati és térképezési projektek során kerültek begyűjtésre. A referenciaméréseket különböző laboratóriumokban, különböző mérési protokollokat követve végezték (VISCARRA ROSSEL & WEBSTER, 2012).

Az Egyesült Államok egyik fő spektrális könyvtára 6017 véletlenszerűen kiválasztott mintaponton gyűjtött, összesen 32084 talajszelvényből gyűjtött 144833 talajminta VIS-NIR spektrumát tartalmazza. A mintavétel a Rapid Carbon Assessment projekt (URL2) keretében a szelvények 1 méteres mélységéig történt. Referenciamérésként a talaj szerves széntartalmát állapították meg, égetéssel módszerrel. Mindemelett az USDA-NRCS NSSC (United States Department of Agronomy-Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center) által létrehozott, különböző projektek keretében gyűjtött 20153 talajminta alkotja a MIR spektrális könyvtár alapját (WIJEWARDANE et al., 2018).

Az európai spektrális könyvtár közel 22000 felszíni (0–20 cm) mintáról felvett reflektancia spektrumot tartalmaz (ORGIAZZI ET AL., 2018). A minták a LUCAS (Land Use/Cover Area Frame Survey) program keretében az EU 28 tagországból kerültek begyűjtésre. A referenciaméréseket egyetlen laboratóriumban végezték el (STEVENS et al., 2013).

A kontinentális szintű spektrális könyvtárakon túl számos nemzeti adatbázis is folyamatos fejlesztés alatt áll. A spektrális adatbázisok bővítésében élen jár

Franciaország (GOGÉ et al., 2012; GRINARD et al., 2012), a Cseh Köztársaság (BRODSKY et al., 2011), Dánia (KNADEL et al., 2012), Florida állam (VASQUEZ et al., 2010), Ruanda (URL3), India (ICAR, 2020) és Brazília (BELLINASSO et al., 2010; DEMATTÉ et al., 2019).

A spektrális alapokra helyezett talajparaméter becslés alapja II. Spektrális becslési eljárások

A talajokról felvett VIS-NIR és MIR tartományban mért spektrumai talajinformációban rendkívül gazdagok, így a technológia alkalmas a talajok tulajdonságainak kvalitatív és kvantitatív jellemzésére. Számos kutatás világított már rá, hogy a talajok laboratóriumban felvett spektrális reflektanciája alapján számos talajtani és agronómiai célú kutatásban és gyakorlatban kulcsszerepet betöltő fizikai és kémiai talajtulajdonság megbízhatóan meghatározható a spektrális könyvtárakban tárolt spektrális és referencia-adatok alapján, matematikai-statisztikai (kemometriai) módszerek alkalmazásával létrehozott prediktív modellek létrehozásával. VISCARRA ROSSEL et al. (2006), SORIANO-DISLA et al. (2014) és AHMADI et al. (2021) összefoglaló munkái alapján jó hatásfokkal becsülhetőek VIS-NIR és/vagy MIR spektrális mérések alapján: szervesszén- és karbontartalom, összes nitrogéntartalom, kation-csere kapacitás, agyag/iszap/homokfrakció, vízdoldható összes sótartalom, kémhatás. Közepes hatásfokkal becsülhetőek a kicserélhető bázikus kationok, illetve néhány nehézfém koncentrációja. Fontos megjegyezni, hogy kizárólag olyan talajtulajdonságok megbízható becslése lehetséges spektrális mérések alapján, melyek értéke szoros összefüggést mutat egy, vagy több a vizsgált spektrális tartományban spektrálisan aktív talajalkotó mennyiségével.

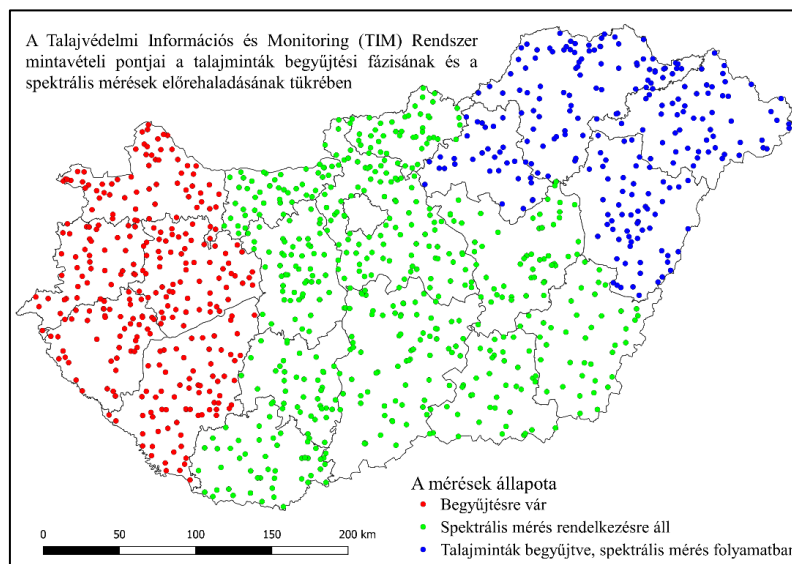
A spektrális adatokra alapozott talajparaméter becslési eljárások kidolgozásánál figyelembe kell venni, hogy a komplex, atomi-molekuláris szinten lejátszódó rezgési és elektromos folyamatokra visszavezethető spektrális sávok együttes, akár egymást átfedő jelenléte rendkívül bonyolulttá teszi a spektrális adatok kvantitatív kiértékelését (DUCKWORTH, 1998; BARRA et al., 2021). Ennek köszönhető, hogy (elsősorban a VIS-NIR tartományban) specifikus abszorpciós sávokat, illetve spektrális jellegzetességeket talajok alkotóelemeihez közvetlenül hozzárendelni rendkívül nehéz, vagy akár lehetetlen feladat. Továbbá, a spektrális méréseket terhelő, ellenőrzés alatt nem, vagy nehezen tartható zavaró ismert (műszeres zaj, szóródási jelenségek) vagy ismeretlen tényezők is hozzájárulhatnak a spektrumok komplexitásához.

Annak érdekében, hogy a spektrális adatok alapján talajparaméterek becsülhetőek legyenek, kemometriai modellezést kell végrehajtani. Az analitikai kémia egyik tudományágának tekinthető kemometria olyan többváltozós matematikai-statisztikai és gépi tanulási módszerekre épülő eljárásokat foglal magába, melyek alkalmazásával számszerűsíthető a talajmintákról felvett spektrumok (független változók) és hagyományos módszerekkel meghatározott laboratóriumi talajparaméterek (függő változók) közötti statisztikai kapcsolat. Így válik lehetővé egy olyan laboratóriumi eljárásnak a talajvizsgálati eljárások sorába való integrálása, mely szemben a konvencionális eljárásokkal gyors és

költséghatékony, valamint nem igényli a környezetre káros vegyszerek alkalmazását. Napjainkban leggyakrabban alkalmazott módszerek közé tartoznak a Partial Least Squares Regression, Random Forest, Neural Networks eljárások és mesterséges intelligenciára épülő módszerek is (HENGL et al., 2021; NG et al., 2020; SILA et al., 2016; YANG et al., 2021)

Az első hazai, országos talajspektrális könyvtár létrehozásának koncepciója

A már publikus spektrális könyvtárak felépítése, és az alkalmazott módszerek áttekintése után a MATE KÖTI Talajtani Tanszékének már meglévő műszerbázisára építve kezdtük meg a hazai adatbázis strukturális alapjainak lefektetését. Az alapadatbázist a hazai talajlaboratóriumok talajarchívumában fellelhető, a Talajvédelmi Információs és Monitoring (TIM) (VÁRALLYAY, 1995) rendszer mintavételezés kezdeti évében (1992) gyűjtött talajmintákról felvett spektrumokra építjük.



3. ábra

TIM mintavételi pontok a talajminták begyűjtési fázisának és a spektrális mérések előrehaladásának tükrében

A spektrális méréseket a TIM rendszer 1236 pontján feltárt talajszelvények genetikai szintjeiből vett talajmintákon végezzük. Az előzetes laboratóriumi spektrális méréseket a *Bruker Alpha II* Fourier Transzform Infravörös (FTIR) spektrométerrel kezdtük meg 2021 tavaszán a talajarchívumokból eddig begyűjtött, 14 vármegyét (Komárom-Esztergom, Fejér, Tolna, Baranya, Pest, Bács-Kiskun, Nógrád, Heves, Jász-Nagykun-Szolnok, Csongrád-Csanád, Szabolcs-Szatmár-

Bereg, Hajdú-Bihar, Békés) reprezentáló talajmintákon. Jelen kézirat benyújtásáig 2234 talajminta MIR spektrumának felvételét végeztük el. A begyűjtött, a spektrális mérésen átesett, valamint a begyűjtésre váró talajminták mintavételi pontjait a 3. ábrán tüntetjük fel.

1. táblázat

A vizsgált talajparaméterek listája, és a TIM projektben, a meghatározásukhoz alkalmazott módszerek

Talajparaméter	Vizsgálati módszer	Szabvány
Szervesanyag tartalom	Székel-módszer	MSZ-08-0452-1980
pH desztillált vízben és KCl-ben	Potenciometria	MSZ-08-0206/2-1978
CaCO ₃ tartalom	Scheibler (kalciméter)	MSZ-08-0206/2-1978
Kicserélhető Ca, Mg, Na, K	módosított Mehlich eljárás	MSZ-08-0214/1-2/1978
Adszorpciós kapacitás (T-érték)	módosított Mehlich eljárás	MSZ-08-0215-1978
Bázikus kationok S-érték	Kicserélhető Ca, Mg, Na, K alapján számított	∑ Ca,Mg,Na,K
Mechanikai összetétel (homok, agyag, por %)	Pipettás módszer	MSZ-08-0205-1978
Teljes vízkapacitás (pF=0)	Bolygatatlan talajminta vízzel telítése	MSZ-08-0205-1978
Szabadföldi vízkapacitás (pF=2,5)	Várallyay-féle pF box kaolinlapos berendezéssel	MSZ-08-0205-1978
Holtvíztartalom (pF=4,2)	Membránprés	MSZ-08-0205-1978

A MIR méréseket 2023 őszétől a korábban használt, kompakt spektrométer helyett a nagy mintakapacitású *Bruker Invenio* FTIR spektrométerrel végezzük, mely műszerhez kapcsolt HTS-XT mintaváltónak köszönhetően, egyszerre 95 talajminta spektrális jellemzése is lehetséges. A MIR méréseken felül, VIS-NIR méréseket is integrálunk a spektrális adatbázisba, mely adatokat a *Malvern Panalytcs ASD LabSpec 4 Hi-res* hordozható spektrométerével rögzítjük.

Referencia adatként a TIM adatbázisból kinyerhető, a talajok genetikai szintjeiből származó talajmintákra vonatkozó, hagyományos laboratóriumi módszerekkel meghatározott fizikai és kémiai talajparaméter értékeket használunk. A kutatás során vizsgált talajparaméterek listáját, illetve az alkalmazott laboratóriumi módszereket az 1. táblázatban tüntettük fel.

További lépések

A fejlesztés fő célja hazánk talajtani változatosságát reprezentáló talajspektrális könyvtár létrehozása. Az országos szintű VIS-NIR és MIR spektrális mérésekre épülő adatbázis, és ez erre épülő talajtulajdonság-becselő eljárás lehetőséget fog kínálni országos szinten számos talajparaméter spektrális alapon történő megbízható meghatározhatóságára. Így lehetővé válhat a jelenlegi talajlaboratóriumi-kapacitás

jelentős növelésére számottevő többletköltség nélkül. A spektrális könyvtár kidolgozása során kiemelt jelentőséget tulajdonítunk annak, hogy az országos szintű adatbázis talajszelvények genetikai szintjeiből vett minták spektrális elemzésére legyen alapozva. Azonban az archív talajokról felvett spektrális adatok értékelésénél fontos figyelembe vennünk, hogy a vizsgálatba bevont talajminták 1992-ben kerültek begyűjtésre. A 30 éve tartó tárolás okozhat olyan (elsődlegesen a szerves alkotókat érintő) változásokat, melyek a spektrális mérésekben tükröződnek, azonban a TIM rendszer indulási évében meghatározott referencia talajadatokban nem. A kidolgozásra kerülő modellek teljesítményét befolyásolhatja az a tény, hogy a referenciamérések nem egy központi, hanem több laboratóriumban kerültek meghatározásra. Ennek eredményeképpen az 1992-es minták spektrális elemzését követően, azon fix mélységekből vett mintákat is be fogjuk vonni a spektrális könyvtár építésébe, melyek hagyományos laboratóriumi elemzése egyetlen, központi laboratóriumban (a GLOSOLAN-ban referencia laboratórium szerepet betöltő NÉBIH Növény- és Talajvédelmi Nemzeti Referencia Laboratóriumában) történt meg.

Köszönetnyilvánítás

Az Agrártechnológiai Nemzeti Laboratórium fejlesztés c. projekt (projektazonosító szám: 2022-2.1.1-NL-2022-00006) a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal létrejött Támogatási Szerződés (NKFIH-3524-1/2022) alapján valósul meg.

Irodalom

- ADHIKARI, K., HARTEMINK, A. E., 2016. Linking soils to ecosystem services – a global review. *Geoderma*. **262**. 101–111.
- AHMADI, A., EMANI, M., DACCACHE, A., HE, L., 2021. Soil Properties Prediction for Precision Agriculture Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Agronomy*. **11**. (3) 433.
- BARRA, I., HAEFELE, S.M., SAKRABANI, R., KEBELE, F., 2021. Soil spectroscopy with the use of chemometrics, machine learning and pre-processing techniques in soil diagnosis: Recent advances—A review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. **135**. 116166.
- BELLINASSO, H., DEMATTE, J.A.M., ARAUJO, S.R., 2010. Spectral library and its use in soil classification. *Brazilian Journal of Soil Science*. **34**. 861–870.
- BENEDETTI, F., VAN EGMOND, F., 2021. Global Soil Spectroscopy Assessment. *Spectral Soil Data – Needs and Capacities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome
- BEN-DOR, E., PIMSTEIN, A., NOTESCO, G., 2010. Variation and stability of soil reflectance measurements with different ASD spectrometers under different conditions. In: *Proceedings ASD and IEEE GRS; Art, Science and Applications of Reflectance Spectroscopy*. **II**. (7). Boulder, Colorado.

- BRODSKY, L., KLEMENT, A., PENIŽEK, V., KODEŠOVÁ, R., BORŮVKA, L., 2011. Building soil spectral library of the Czech soils for quantitative digital soil mapping. *Soil and Water Research*. **6**. (4) 165–172.
- CHABRILLAT, S., GOETZ, A.F.H., KROSLEY, L., OLSEN, H.W., 2002. Use of hyperspectral images in identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*. **82**. 431–445.
- CLARK, R.N., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: RENCZ, A. (Ed), *Manual of Remote Sensing*. John Wiley and Sons, Inc., New York. pp. 3–58.
- DANGAL, S.R.S., SANDERMAN, J., WILLS, S., RAMIREZ-LOPEZ, L., 2019. Accurate and precise prediction of soil properties from a large mid-infrared spectral library. *Soil Systems*. **3** (11) 11.
- DEMATTÊ, J.A.M., DOTTO, A.C., PAIVA, A.F.S., SATO, M.V., DALMOLIN, R.S.D., DE ARAÚJO, M. DO S.B., DA SILVA, E.B., NANNI, M.R., TEN CATEN, A., NORONHA, N.C., LACERDA, M.P.C., DE ARAÚJO FILHO, J.C., RIZZO, R., BELLINASSO, H., FRANCELINO, M.R., SCHAEFER, C.E.G.R., VICENTE, L.E., DOS SANTOS, U.J., DE SÁ BARRETTO SAMPAIO, E.V., MENEZES, R.S.C., DE SOUZA, J.J.L.L., ABRAHÃO, W.A.P., COELHO, R.M., GREGO, C.R., LANI, J.L., FERNANDES, A.R., GONÇALVES, D.A.M., SILVA, S.H.G., DE MENEZES, M.D., CURI, N., COUTO, E. G., DOS ANJOS, L.H.C., CEDDIA, M.B., PINHEIRO, É.F.M., GRUNWALD, S., VASQUES, G.M., MARQUES JÚNIOR, J., DA SILVA, A.J., BARRETO, M.C. DE V., NÓBREGA, G.N., DA SILVA, M.Z., DE SOUZA, S.F., VALLADARES, G.S., VIANA, J.H.M., DA SILVA TERRA, F., HORÁK-TERRA, I., FIORIO, P.R., DA SILVA, R.C., FRADE JÚNIOR, E.F., LIMA, R.H.C., ALBA, J.M.F., DE SOUZA JUNIOR, V.S., BREFIN, M.D.L.M.S., RUIVO, M.D.L.P., FERREIRA, T.O., BRAIT, M.A., CAETANO, N.R., BRINGHENTI, I., DE SOUSA MENDES, W., SAFANELLI, J.L., GUIMARÃES, C.C.B., POPPIEL, R.R., E SOUZA, A.B., QUESADA, C.A., DO COUTO, H.T.Z., 2019. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. *Geoderma*. **354**. 113793.
- DUCKWORTH, J.H., 1998. Spectroscopic quantitative analysis. In: WORKMAN, J., SPRINGSTEEN, A. (Eds.), *Applied Spectroscopy*. Academic Press, San Diego, California. pp. 93–163.
- GOGÉ, F., JOFFRE, R., JOLIVET, C., ROSS, I., RANJARD, L., 2012. Optimization criteria in sample selection step of local regression for quantitative analysis of large soil NIRS database. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. **110**. (1) 168–176.
- GOMEZ, C., CHEVALLIER, T., MOULIN, P., BOUFERRA, I., HMAIDI, K., ARROUAYS, D., JOLIVET, C., BARTHÈS, B. G., 2020. Prediction of soil organic and inorganic carbon concentrations in Tunisian samples by mid-infrared reflectance spectroscopy using a French national library. *Geoderma*. **375**, 114469.
- GRINAND, C., BARTHÈS, B.G., BRUNET, D., KOUAKOUA, E., ARROUAYS, D., JOLIVET, C., CARIA, G., BERNOUX, M., 2012. Prediction of soil organic and inorganic carbon contents at a national scale (France) using mid-infrared reflectance spectroscopy (MIRS). *European Journal of Soil Science*. **63**. 141–151.
- HEFLER, J., SZTUPÁR, Z., VÁRSZEGI, G., National Pedological Database, New Milestone Through Soil Conservation. *Hungarian Agricultural Research*. **34**. (1–2) 16–22.

- HENGL, T., MILLER, M.A.E., KRIŽAN, J., SHEPHERD, K.D., SILA, A., KILIBARDA, M., ANTONJEVIĆ, O., GLUŠICA, L., DOBERMANN, A., HAEFELE, S.M., MCGRATH, S.P., ACQUAH, G.E., COLLINSON, J., PARENTE, L., SHEYKHOUSA, M., SAITO, K., JOHNSON, J.M., CHAMBERLIN, J., SILATSA, F.B.T., YEMEFACK, M., WENDT, J., MACMILLAN, R.A., WHEELER, I., CROUCH, J., 2021. African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Scientific Reports*. **11**. (1) 6130.
- ICAR, 2020. ICAR. Proceedings of an International Webinar on Soil Spectroscopy: An Emerging Technique for Rapid Soil Health Assessment, ICAR-India Institute of Soil Science and World Agroforestry.
- JANIK, E.J., MERRY, R.H., SKJEMSTAD, J.O., 1998. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? *Australian Journal of Experimental Agriculture*. **38**. 681–696.
- JÓNSSON, J.Ö.G., DAVÍÐSDÓTTIR, B., 2016. Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems*. **145**. 24–38.
- KNADEL, M., DENG, F., THOMSEN, A., GREVE, M.H., 2012. Development of a Danish National Vis-NIR Soil Spectral Library for Soil Organic Carbon Determination. *Digital Soil Assessments and beyond. Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping, Sydney, Australia*. CRC Press. pp. 403–408.
- LAGACHERIE, P., BARET, F., FERET, J.B., MADEIRA NETTO, J., ROBBEZ-MASSON, J.M., 2008. Estimation of soil clay and calcium carbonate using laboratory, field and airborne hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*. **112**. 825–835.
- LE GUILLOU, F., WETTERLIND, W., VISCARRA ROSSEL, R.A., HICKS, W., GRUNDY, M., TUOMI, S., 2015. How does grinding affect the mid-infrared spectra of soil and their multivariate calibrations to texture and organic carbon? *Soil Research*. **53**. (8) 913–921.
- METTERNICHT, G.I., ZINCK, J.A., 2003. Remote sensing of salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment*. **85**. 1–20.
- NG, W., DE SOUSA MENDES, W., DEMATTÊ, J.A.M., 2020. The influence of training sample size on the accuracy of deep learning models for the prediction of soil properties with near-infrared spectroscopy data. *Soil*. **6**. (2) 565–578.
- NOCITA, M., STEVENS, A., VAN WESEMAEL, B., AITKENHEAD, M., BACHMANN, M., BARTHÈS, B., BEN-DOR, E., BROWN, D.J., CLAIROTTE, M., CSORBA, A., DARDENNE, P., DEMATTÊ, J.A.M., GENOT, V., GUERRERO, C., KNADEL, M., MONTANARELLA, L., NOON, C., RAMIREZ-LOPEZ, L., ROBERTSON, J., SAKAI, H., SORIANO-DISLA, J.M., SHEPHERD, K. D., STENBERG, B., TOWETT, E.K., VARGAS, R., WETTERLIND, J., 2015. Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. In: SPARKS, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. **132**. 139–159.
- ORGIAZZI, A., BALLABIO, C., PANAGOS, P., JONES, A., FERNÁNDEZ-UGALDE, O., 2018. LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe: A review. *European Journal of Soil Science*. **69**. (1) 140–153.
- SCHWERTMANN, U., 1993. Relations between iron oxides, soil color and soil formation. In: BIGHAM, J.M. & CIOLKOSZ, E.J. (Eds.), *Soil Color, Special Publication*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin. pp. 51–70.

- SHEPHERD, K.D., FERGUSON, R., HOOVER, D., VAN EGMOND, F., SANDERMAN, J., GE, Y., 2022. A global soil spectral calibration library and estimation service. *Soil Security*. **7**. 100061.
- SILA, A.M., POKHARIYAL, G.P., SHEPHERD, K.D., 2016. Evaluating the utility of mid-infrared spectral subspaces for predicting soil properties. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. **153**. 92–105.
- SORIANO-DISLA, J.M., JANIK, L.J., VISCARRA ROSSEL, R.A., MACDONALD, L.M., MCLAUGHLIN, M.J., 2014. The performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical and Biological Properties. *Applied Spectroscopy Reviews*. **49**. (2) 139–186.
- STEVENS, A., NOCITA, M., TÓTH, G., MONTANARELLA, L., VAN WESEMAEL, B., 2013. Prediction of soil organic carbon at the European scale by visible and near infrared reflectance spectroscopy. *PLoS One*. **8**. (6) e66409.
- STEVENS, A., VAN WESEMAEL, B., BARTHOLOMEUS, H., ROSILLON, D., TYCHON, B., BENDOR, E., 2008. Laboratory, field and airborne spectroscopy for monitoring organic carbon content in agricultural soils. *Geoderma*. **144**. 395–404.
- VAN REEUWIJK, L.P., 2002. Procedures for Soil Analysis. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.
- VÁRALLYAY, G., 1995. TIM: Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer, 1. kötet. Módszertan. FM Növényvédelmi és Agrár-Környezetgazdálkodási Főosztály, Budapest.
- VÁRALLYAY, G., 1998. Soil degradation processes and their control in Hungary. In: FILEP, G. (Ed.), *Soil Pollution*. Agricultural University, Debrecen. pp. 1–19.
- VASQUES, G.M., GRUNWALD, S., HARRIS, W.G., 2010. Spectroscopic models of soil organic carbon in Florida, USA. *Journal of Environmental Quality*. **39**. (3) 923–934.
- VISCARRA ROSSEL, R.A., CATTLE, S.R., ORTEGA, A., FOUAD, Y. 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis–NIR spectroscopy. *Geoderma*. **150**. (3–4) 253–266.
- VISCARRA ROSSEL, R.A., WEBSTER, R., 2012. Predicting soil properties from the Australian soil visible near infrared spectroscopic database. *European Journal of Soil Science*. **63**. (6) 848–860.
- VISCARRA ROSSEL, R.A., WALVOORT, D.J.J., MCBRATNEY, A.B., JANIK, L.J., SKJEMSTAD, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*. **131**. 59–75.
- VISCARRA ROSSEL, R.A., BEHRENS, T., BEN-DOR, E., BROWN, D.J., DEMATTÊ, J.A.M., SHEPHERD, K.D., SHI, Z., STENBERG, B., STEVENS, A., ADAMCHUK, V., AICHI, H., BARTHÈS, B.G., BARTHOLOMEUS, H.M., BAYER, A. D., BERNOUX, M., BÖTTCHER, K., BRODSKÝ, L., DU, C.W., CHAPPELL, A., FOUAD, Y., GENOT, V., GOMEZ, C., GRUNWALD, S., GUBLER, A., GUERRERO, C., HEDLEY, C.B., KNADEL, M., MORRÁS, H.J.M., NOCITA, M., RAMIREZ-LOPEZ, L., ROUDIER, P., CAMPOS, E.M.R., SANBORN, P., SELITTO, V.M., SUDDUTH, K.A., RAWLINS, B.G., WALTER, C., WINOWIECKI, L.A., HONG, S.Y., JI, W., 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*. **155**. 198–230.

- VOJTELA, T., BÉRES, A., 2021. Az Agrártechnológiai Nemzeti Laboratórium kutatás-fejlesztési tevékenysége. In: SZALKA, É. (Szerk.), „Innováció és digitalizáció”: XXXVIII. Óvári Tudományos Nap. Absztraktkötet. pp. 71.
- WIJEWARDANE, N.K., GE, Y., WILLS, S., LIBOHOVA, Z., 2018. Predicting Physical and Chemical Properties of US Soils with a Mid-Infrared Reflectance Spectral Library. *Soil Science Society of America Journal*. **82**. (3) 547–732.
- YANG, Y., SHEN, Z., BISSETT, A., VISCARRA ROSSEL, R.A., 2021. Estimating soil fungal abundance and diversity at a macroecological scale with deep learning spectrotransfer functions. *Soil*. **8**. (1) 223–235.
- ZHANG, Y., HARTEMINK, A.E., HUANG, J., 2021. Spectral signatures of soil horizons and soil orders – An exploratory study of 270 soil profiles. *Geoderma*. **389**. 114961.

Internetes források

- URL1: FAO Global soil Laboratory Network. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/glosolan/en/> (2024.01.06.)
- URL2: USDA Rapid Carbon Assessment (RaCa) <https://www.nrcs.usda.gov/resources/data-and-reports/rapid-carbon-assessment-raca> (2024.01.06.)
- URL3: RWASIS. Rwanda Soil Information Service <https://www.cabi.org/projects/rwanda-soil-information-services-rwandasis/> (2024.01.06.)

The international importance and national establishment of soil spectral libraries

^{1,2*}Ádám CSORBA, ¹Tamás SZEGI, ³Gábor VÁRSZEGI, ^{1,4}Gábor NAGY, ¹Erika MICHÉLI

¹Institute of Environmental Sciences, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Gödöllő, Hungary

²Agrotechnology National Laboratory, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Gödöllő, Hungary

³Directorate of Agricultural Genetic Resources, National Food Chain Safety Office, Budapest, Hungary

⁴SCLab - SoilChem Agro- and Environmental Analytical Laboratory, Mórahalom, Hungary

Summary

There is an unprecedented demand for adequate quantity and quality of soil data and information. Spectroscopic (dry chemistry) technologies, when used in parallel with conventional laboratory (wet chemistry) methods, provide the opportunity to make soil information provision more time- and cost-effective, as well as more environmentally friendly. In this manuscript, in addition to presenting soil spectral libraries on local, regional and global scales, we introduce the concept of developing the first nationwide spectral database representing Hungary's soil diversity, developed within the framework of the Agrotechnology National Laboratory project. Spectral libraries can be considered as special soil databases containing the

parameters of soil samples representing the soils of a given area determined by conventional laboratory methods and spectra recorded by spectroscopic methods. Soil parameter estimation based on spectroscopic calibrations performed on the data stored in spectral libraries provides the opportunity for spectrally-based, reliable estimation of parameters of samples having physical, chemical and mineralogical properties similar to the samples included in the database. The foundation of the Hungarian spectral library is based on spectra acquired on soil samples collected from the genetic horizons of soil profiles in the first year (1992) of the Hungarian Soil Information and Monitoring System. The spectral database is based on spectral data recorded in the middle-infrared (MIR) and visible – near-infrared (VIS-NIR) regions considering the guidelines of the Global Soil Laboratory Network (GLOSOLAN). The continuously expanding spectral library and the soil property estimation workflow based on this database will offer the opportunity to estimate reliably a wide range of physical and chemical soil properties, thus improving the current laboratory capacity without significant cost increases.

Keywords: spectroscopy, GLOSOLAN, spectral library, soil parameter estimation

Open Access nyilatkozat: A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)
