

# **Hiperspektrális képalkotás és terepi spektroszkópia az agrárinformatikai kutatás és fejlesztés területén**

Habilitációs tézisek  
2022

**Jung András**

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Informatikai Kar  
Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

## **Köszönetnyilvánítás**

Ez a téziszfüzet és habilitációs kutatási munka nem jöhetett volna létre, ha a kutatásaim során kollégák, barátok és családtagok nem támogattak volna. Időbeli sorrendben szeretném kiemelni a következő személyeket: Dr. Tőkei László, Prof. Dr. Tamás János, Dr. Kardeván Péter, Prof. Dr. Cornelia Gläßer, Dr. Christian Götze, Dr. Michael Denk, Prof. Dr. Michael Vohland, Michael Seidel, Rainer Graser, Dr. René Heine, Varga Zsófia, Prof. Dr. Hegedűs Attila, Dr. Marion Pause, Dr. habil. Angela Lausch és Prof. Dr. Zentai László.

Továbbá külön köszönetet szeretnék mondani az Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar vezetőinek, akik a "Habilitált doktori cím megszerzésének támogatására" kiírt támogatási programot létrehozták és felkészülésemet támogatták.

Családom nélkül az elmúlt tizenöt év kutatói és oktatói munkája nem lett volna eredményes, hálás köszönettel tartozom feleségemnek, Jung Tímeának a megértő támogatásáért.

# Tartalomjegyzék

<b>Bevezetés .....</b>	<b>4</b>
<b>Tématerületek és tézisek .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Tématerület I: Nem képkalkotó spektrális könyvtárak összehasonlíthatóságának javítási lehetőségei .....</b>	<b>6</b>
1.1. 1. Tézis: Spektrális könyvtárak összehasonlíthatóságának javítása fehér referencia alapú posztkorrekciós eljárás kidolgozásával .....	7
1.2. 2. Tézis: Nem-képkalkotó terepi spektrométerek mérés technikai hibáinak feltárása, empirikus értékelése nemzetközi összehasonlításban .....	9
<b>2. Tématerület II: Egy mobil képkalkotó spektrométer, mint innovatív adatgyűjtő eszköz fejlesztése és alkalmazása a terepi adatgyűjtésben .....</b>	<b>12</b>
2.1. 3. Tézis: Hordozható valós idejű képkalkotó spektrométer kifejlesztése légi és vízalatti adatgyűjtésre .....	13
2.2. 4. Tézis: A „snap-shot” hiperspektrális kamera alkalmazhatóságának vizsgálata a precíziós növénytermesztési kutatásban .....	17
<b>3. Tématerület III: A képkalkotó és terepi spektroszkópia alkalmazhatósága a növény- és talajvizsgálatokban .....</b>	<b>22</b>
3.1. 5. Tézis: A növényi stresszfaktorok (hőmérséklet és nehézfém), vegetációs indexek és a “vörös-él” tartomány statisztikai kapcsolatának feltárása .....	23
3.1. 6. Tézis: Gyors és roncsolásmentes talajdiagnosztikai módszer kidolgozása kemometria i módszerek alkalmazásával .....	26
<b>Új tudományos eredmények .....</b>	<b>28</b>
<b>A tézisekhez kapcsolódó fontosabb saját publikációk összefoglalása .....</b>	<b>29</b>
<b>Irodalmi hivatkozások .....</b>	<b>31</b>

## Bevezetés

Az informatika egyik alkalmazási területe az agrárinformatika. Időszerű, fenntartható és hatékony mezőgazdaság informatikai módszerek, rendszerek alkalmazása nélkül ma már elképzelhetetlen. A FAO jelentései szerint 2050-re az emberiség élelmiszerigénye 60-70 %-kal növekedni fog, a 10-15 évvel ezelőtti igényekhez képest, valamint a következő harminc évben két milliárdan többen leszünk a Földön (Alexandratos és Bruinsma 2012, Valin 2019, Tian et al. 2021). Emellett azt is meg kell említeni, hogy a mezőgazdaságban dolgozók száma folyamatosan csökken. Egy növekvő produktivitási igény áll szemben egy radikálisan csökkenő foglalkoztatási perspektívával, miközben a minőségi élelmiszerellátás biztosítása mindannyiunk elemi érdeke. A felvázolt makro- és mikrogazdasági feszültségek csökkentésében, valamint az agrárágazatok modernizálásában a szakmai döntéshozók az agrárinformatikának jelentős szerepet szánnak. Ezt támasztja alá és támogatja Magyarország kormányának Digitális Jólét Programja (DJP), azon belül Magyarország Digitális Agrár Stratégiája (DAS). A tématerület hazai jelentőséget a következő idézettel emeljük ki: „A hazai agrárágazat elengedhetetlen technikai fejlesztéséhez, a digitális technológiák hatékony felhasználásához, az üzemszintű fejlesztések tervezéséhez, az üzemeltetéshez és a digitális technológia karbantartásához 2500-3000 agrárinformatikusra lesz szükség” továbbá „Az interdiszciplináris képzésekhez meg kell teremteni az intézmények között szakmai együttműködés intézményesített csatornáit a képzési, kutatás-fejlesztési és egyéb szakmai feladatok hatékonyabb ellátása érdekében” (DAS, 2019). A társadalmi és szakmapolitikai háttér, valamint a szakirodalmi és szakmai források alapján látható, hogy egy szélesen értelmezett kutatási és alkalmazási területről van szó. A Német Agrárinformatikai Társaság megállapításai szerint, az agrárinformatika lényegében az információs technológiák és az elektronika mezőgazdasági alkalmazásával foglalkozik (GIL, 2021). A hazai szóhasználatba az „Agrárinformatika” kifejezést lényegében a német szakmai nyelv azonos szóhasználatából (németül: Agrarinformatik) vettük át. Ezzel szemben az angol nyelvű irodalomban és tematikus elhelyezésekben inkább és növekvő mértékben a „digital farming” kifejezés terjed(t) el. Ez kifejez egyfajta ipari és műszaki kötődést is, mert a legtöbb ipari és piaci elemzés vagy előrejelzés előszeretettel használja a „digital farming” megnevezést. Ehhez kapcsolódóan gyakran olvashatjuk a „smart farming”, „precision farming” vagy „digital agriculture” kifejezéseket is.

Az ausztriai székhelyű StartUs Insights szakemberei összeállítottak egy „AgriTech Innovation Map”-et (StartUs Insights, 2020). A jelentés szerint nyolc kulcstechnológiával lehet számolni a jövőben. A kifejezések sajátos jellege, használati jelentősége és elterjedtsége miatt eredeti, angol változatban hagyjuk a nemzetközileg elterjedt elnevezéseket.

- Internet of Things (IoT)
- Smart Farming
- Precision Farming
- Robotics & Automation
- Vertical Farming
- Biotech
- BigData & AI
- Drones & Satellites



A Biotech és BigData & AI kivételével, valamennyi terület közvetlen felhasználója az optoelektronikai mérés technológiának, ezen belül a spektrális képalkotás vagy terepi spektroszkópia eredményeinek. Röviden összefoglaljuk az ide vonatkozó alkalmazásokat.

*Internet of Things (IoT):* Egyik kapcsolódó példa, a talajtermékenységet vizsgáló spektrális vagy a levél klorofiltartalom gyors meghatározására alkalmas multi- és hiperspektrális szenzorok, amelyek jól integrálhatók az IoT-be (Bhargavi and Jyothi, 2019).

*Smart Farming:* A növénytermesztés számos területén (pl. öntözés, permetezés stb.) használnak mobil és felhő alapú adatgyűjtést spektrális szenzorok alkalmazásával, különös tekintettel az automatizálás adta lehetőségekre (Bacco et al. 2018).

*Precision Agriculture:* A modern mezőgazdaság szinonimája lett. Kezdeti célja a szántóföldi területek heterogenitásának pontos megismerése volt, többek között multi- és hiperspektrális kamerák és optikai szenzorok felhasználásával (Caballero et al. 2020).

*Robotics & Automation:* A munkaerőhiány növekedése miatt a spektrális gépi látás adta lehetőségek a mezőgazdaság valamennyi területére (növényvédelem, betakarítás, válogatás stb.) hatással lesznek (Gutiérrez et al. 2019).

*Vertical Farming:* A kertészeti növénytermesztés új időszaka kezdődött el a LED alapú mesterséges világítástechnika bevezetésével. A megfelelő hullámhosszúságú fény kiválasztásához elengedhetetlenek a terepi spektrométerek (Sipos et al. 2021).

*Drones & Satellites:* A hiperspektrális távérzékelés kiegészült a drónos és földközeli eszközök használatával, különösen a snap-shot spektrális kamerák megjelenése óta. Egyre több drónos multi- és hiperspektrális kamera válik elérhetővé (Bareth et al. 2015), a kutatásból az ipar felé haladva.

A tézisek végén jelezni fogom, hogy mely agrárinformatikai területhez kapcsolódnak a saját kutatás eredményei legszorosabban.

A tézisfüzetben a doktori fokozat megszerzése óta (2006.02.21) eltelt időszak tudományos eredményeimet foglaltam össze, amelynek jelentős része német kutatási és fejlesztési programok keretében végzett munkáimat tartalmazza. A hiperspektrális távérzékelés és terepi spektroszkópia igen szerteágazó alkalmazott tudomány lett az elmúlt években, egy folyamatosan növekvő tudományos közösséggel. 2008-tól kezdve a Német Fotogrammetriai, Távérzékelési és Térinformatikai Társaság Multi- és Hiperspektrális Munkacsoportjának vezetőjeként (<http://www.dgpf.de/aks.html>) lehetőséget kaptam számos terület közelebbi megismerésére. Itthoni tapasztalataim tekintetében, 2018 óta rendszeren részt veszek a hazai egyik legnagyobb precíziós gazdálkodási és agrárinformatikai konferencia (PreGa) szervezésében és szekcióinak vezetésében, ahol 2022-ben az ELTE Informatikai Kar vezetésével önálló adattudományi szekciót is elindítunk. A hiperspektrális képalkotás és terepi spektroszkópia agrárinformatikai alkalmazásai sokrétegűek. Mindez jelenthet

műszerfejlesztési, adatminőségi feladatokat, alkalmazástechnikai vagy többváltozós statisztikai elemzéseket is.

A téziszűzet tematikus tartalmát három fő terület köré csoportosítottam. Az első (i) témakörben a nem képalkotó spektrális könyvtárak javítási lehetőségeit és minőségi problémáit szeretném bemutatni. A második (ii) téma egy „snap-shot” hiperspektrális kamera fejlesztését és alkalmazási lehetőségeit foglalja össze. A harmadik (iii) rész a hiperspektrális képalkotás és terepi spektroszkópia alkalmazásával, a növény- és talajkutatásban elért eredményeinket mutatja be.

A hiperspektrális kutatásaimat az első hazai hiperspektrális repülési kampány (Hysens 2002) adatainak felhasználásával kezdettem meg 2002-ban a Szent István Egyetemen. Ezt követően célszerűnek tűnt a külföldi tudományos eredmények minél behatóbb tanulmányozása, abban az időben a hazai tapasztalatok még kezdeti stádiumban voltak ezen a területen. A CEEPUS ösztöndíjprogram támogatásával 2004-ben négy hónapot töltöttem a bécsi BOKU Egyetem Geomatikai Intézetében, ahol a műszeres háttérnek köszönhetően, megalapozhattam ismereteimet a terepi spektroszkópiában. Ugyanezen évben DAAD ösztöndíjjal három hónapot töltöttem a Halle-Wittenbergi Martin-Luther Tudományegyetem (továbbiakban Hallei Egyetem) Térképészeti és Távérzékelési tanszékén, ahol légi hiperspektrális távérzékeléssel foglalkoztam. Egy posztdoktori álláslehetőség sikeres megpályázása után 2006 végétől a Hallei Egyetemen folytattam tudományos munkámat 2010-ig. Ezt követően különböző német egyetemeken (2012-2013 Ulmi Tudományegyetem Orvosi Lézertechnológiai Intézet, 2013-2015 Lipcsei Tudományegyetem Térinformatikai és Távérzékelési Tanszék) végeztem kutatásaimat, amelyek ipari és tudományos alkalmazásokra is kiterjednek. Hazatérésem után 2016-tól 2020 nyaráig a Szent István Egyetemen dolgoztam, majd ezt követően az ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Intézetének lettem munkatársa.

## **Tématerületek és tézisek**

### **1. Tématerület I: Nem képalkotó spektrális könyvtárak összehasonlíthatóságának javítási lehetőségei**

A tématerülethez kapcsolódó fontosabb saját tudományos eredmények:

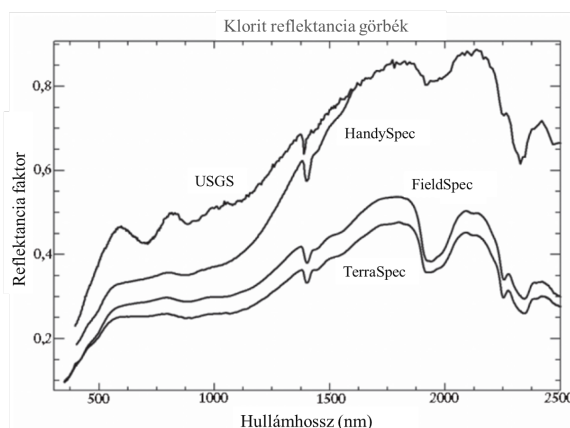
1. **(Q2) Jung, A., Götze, C., Gläßer, C.** 2010: White-reference Based Post-correction Method for Multi-source Spectral Libraries. *PFG (ISSN 1432-8364)* 5, 361-368. (1. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
2. **(Q2) Jung, A., Götze, C., Gläßer, C.** 2012: Overview of Experimental Setups in Spectroscopic Laboratory Measurements – the SpecTour Project. *PFG (ISSN 1432-8364)* 4, 0433-0442 (2. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
3. **(Q2) Hutengs, C., Ludwig, B., Jung, A., Eisele, A. and Vohland, M.,** 2018: Comparison of Portable and Bench-Top Spectrometers for Mid-Infrared Diffuse Reflectance Measurements of Soils. *Sensors (ISSN 1424-8220)*, 18(4), p. 993. (2. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)

Milton 1987-es összefoglaló munkája szerint a terepi spektroszkópia elsődleges feladata a laboratóriumi és terepi reflektancia-mérések összekapcsolása, oly módon, hogy nem

feledkezünk meg az in-situ körülmények hibaforrásairól és korlátozó tényezőiről. Több mint harminc év elteltével, ugyanezen szerző (Milton et al. 2009) és társai újabb áttekintő munkát adtak közre, amely jelentősen kibővítette a terepi spektroszkópia feladatait, kiemelte a terepi metaadatok és a kutatók közötti standardizált adatsere fontosságát. Ebben az időszakban, az alkalmazások növekvő száma és a bővülő tudományos célkitűzések miatt egyre több kutató kezdte meg különböző terepi spektrométerek összehasonlító vizsgálatát (Castro-Esau et al. 2006). Mi is ezen a területen kezdtünk kutatásokat 2008-ban interkalibrációs céllal, majd fejlesztettük tovább tapasztalatainkat egy nemzetközi projekt létrehozásával.

### **1.1. 1. Tézis: Spektrális könyvtárak összehasonlíthatóságának javítása fehér referencia alapú posztkorrekciós eljárás kidolgozásával**

Saját kutatási munka keretében 2009-ben egy többműszeres kísérletet hajtottunk végre a Halle-Wittenbergi Martin-Luther Egyetemen. Ennek során összehasonlítottuk három terepi spektrométer mérési eredményeit a USGS (United States Geological Survey) spektrális könyvtárával (lásd 1. ábra). A legnagyobb eltérést a „HandySpec” spektrométer által mért spektrum mutatta, amely korrekció nélkül jelentős hibaforrás lenne egy összehasonlító statisztikai eljárásban (pl. spektrum alapú osztályozás vagy azonosítás esetén).

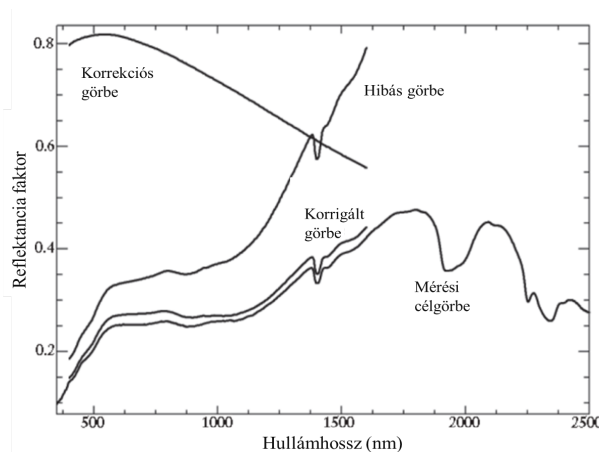


**1.ábra. Négy különböző spektrométerrel mért klorit reflektancia görbék**

A kísérlet eredményeként kidolgoztunk egy utólagos korrekciós eljárást, amely jelentősen javította a spektrumok összehasonlíthatóságát (lásd. 2.ábra). Az “utólagos korrekció” csak bizonyos feltételek teljesülése mellett alkalmazható, ide tartozik az egyes “fehér referencia mérések” és egy ún. “vezér referencia mérés” (master reference) pontos ismerete abszolút mérési formátumban, ami lehet radiancia vagy azzal arányos digitális érték, de semmi esetre sem átszámított reflektancia. Ezek birtokában a különböző spektrométerekkel készített reflektancia spektrumok utólagosan is korrigálhatók, kompatibilitásuk jelentősen javítható. A következő összefüggést dolgoztam ki. (Az eredeti képlet magyarosított változata kerül itt bemutatásra, Jung et al. 2010.)

$$ERG_{ct} \frac{AME_{cp}}{AME_{mp}} = KRG_{ct} \quad (1)$$

ahol  $ERG_{ct}$  = A céltárgy (ct) eredeti reflektancia görbéje (ERG),  
 $AME_{cp}$  = A céltárgyhoz tartozó referenciapanel (cp) abszolút mérési értékei (AME),  
 $AME_{mp}$  = Az etalon referencia (master) panel (mp) abszolút mérési értékei (AME),  
 $KRG_{ct}$  = A céltárgy (ct) korrigált reflektancia görbéje (KRG).



**2. ábra. A posztkorrekciós eljárás hatásának bemutatása**

A módszer eredményessége tekintetében két példát emelnék ki:

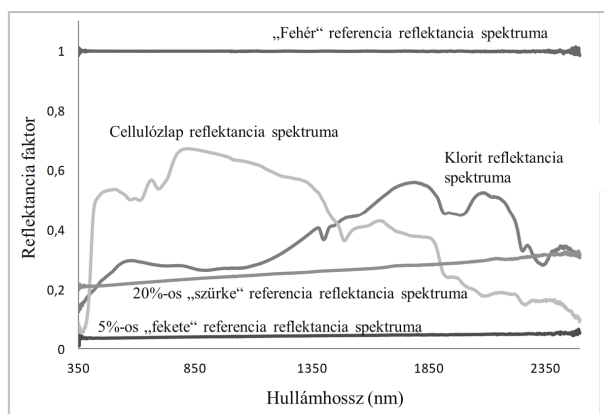
- i) A FieldSpec típusú spektrométerrel mért mérési adatok egyezősége a HandySpec spektrális könyvtárral a korrekció előtt 0,89 volt, a korrekció után 0,95 lett.
- ii) A TerraSpec típusú spektrométerrel mért mérési adatok egyezősége a HandySpec spektrális könyvtárral a korrekció előtt 0,92 volt, a korrekció után 0,97 lett.

A kutatás általános eredményeként elmondható, hogy az általunk kidolgozott eljárás a reflektancia spektrumok összehasonlíthatóságát átlagosan 5-10%-kal javította, ami segítséget nyújt a nemzetközi spektrális könyvtárak minőségének javításában.

Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Smart farming, Drones & Satellites

## 1.2. 2. Tézis: Nem-képalkotó terepi spektrométerek mérés technikai hibáinak feltárása, empirikus értékelése nemzetközi összehasonlításban

A spektrométerek műszaki tulajdonságai viszonylag jól rögzíthető paraméterek. Ennek ellenére még számos tényező befolyásolhatja a mérések pontosságát és a spektrális könyvtárak minőségét. Ide sorolandó például az emberi tényezők hatása vagy a hibás mérési szokások kialakulása. Ezen feltételezések alapján indítottuk el a Hallei Egyetemen 2009-ben a nemzetközi SpecTour projektet ([www.spectour.org](http://www.spectour.org)), amely hat országból, több mint 35 terepi spektrométert tudott elérni és azokról használati és használói adatokat gyűjteni. A projekt a Német Fotogrammetriai, Távérzékelési és Térinformatikai Társaság ([www.dgpf.de](http://www.dgpf.de)) védnöksége alatt állt. A kísérlet egyik alapvető célkitűzése a spektrométeres mérési protokollok megismerése és dokumentálása volt. A résztvevőknek az általunk összeállított és kiküldött referenciákat kellett lemérniük, amely három reflektancia panelt (5%, 20% és 90%), egy szürke cellulózlapot és egy klorit ásványdarabot foglalt magában.

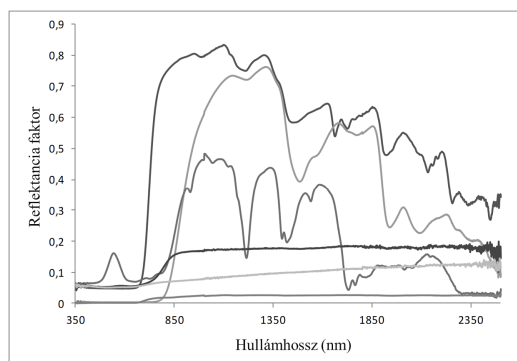


3.ábra. A referencia anyagok reflektancia görbéi

A referencia anyagok leérése mellett valamennyi résztvevő kitöltött egy a mérési folyamatra vonatkozó digitális kérdőívet. Ezek ismeretében megtudhattuk, hogy milyen műszaki körülmények között mérnek a különböző németországi és nemzetközi munkacsoportok. A legfontosabb mérés technikai eredmények kiemelésével a következő megállapításokat tehetjük.

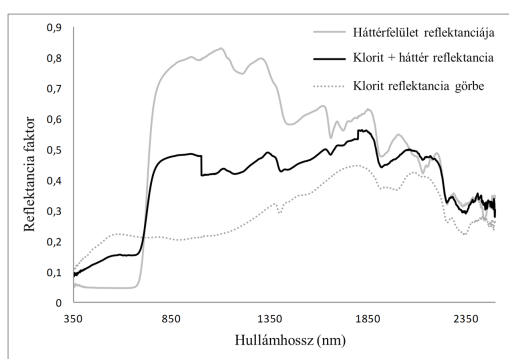
- i) A résztvevők 50%-a 21-30 cm között választott mérési, 31-60 cm között megvilágítási távolságot, 56%-a 36-45°-os megvilágítási szöggel dolgozott.
- ii) A résztvevők 62%-a 136 ms-os integrációs időt választott, 50%-a pedig 25 ismétlésből átlagolt egy mérési eredményt.
- iii) A résztvevők 62%-a már kétszer kalibráltatta műszerét, 84%-a egy lámpát használ labormérésnél, a lámpák 63%-a 50W-os halogén izzóval működik.

A kérdőívek kiértékelése mellett még számos mérési hibaforrásra derült fény. Tipikus probléma, hogy az operátorok nem veszik figyelembe a háttérreflexiót, ill. nem ismerik annak hatását, ezért megkértünk minden résztvevőt, hogy a háttéranyagok spektrális tulajdonságait is rögzítsék. A 4. ábra jól mutatja, hogy nem kivételes jelenségről, problémáról van szó, aminek a legnagyobb veszélye, hogy a háttér vagy tartófelület spektrális hatása belekeveredik a mérési eredményekbe.



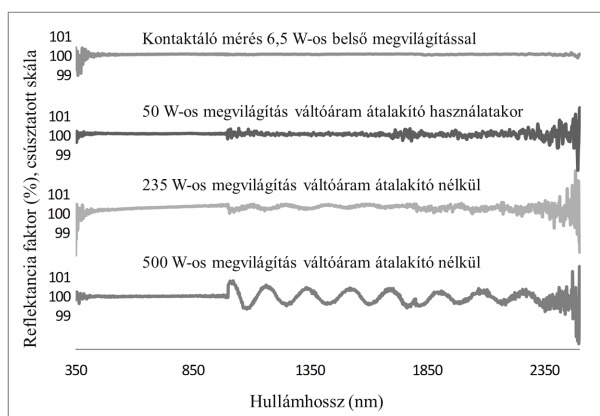
**4. ábra. Zavaró reflektancia spektrumú anyagok a referenciamérések során**

A zavaró spektrumok jól érzékelhető hatását mutatja be az 5. ábra. Amennyiben a célspektrum keveredik a háttér- vagy tartófelület spektrális tulajdonságaival kevert spektrum jön létre. Ez nem felel meg a valóságnak, ill. a mérési célkitűzésnek, jelentős pontatlanságot okozva a spektrális könyvtárakban.



**5. ábra. Kevert spektrum kialakulása hibás háttérmérés hatására**

A kísérlet egyik legtanulságosabb eredménye volt, hogy néhány munkacsoportban a fényforrások energiaellátását nem választották meg kellő körültekintéssel. A 6. ábrán látható, hogy amennyiben a fényforrás áramellátása váltóáram, a spektrumok ennek megfelelően szinuszos görbeállapotokat vesznek fel. Erre a jelenségre a SpecTour projekt hívta fel a figyelmet, aminek eredményeként a nemzetközi munkacsoportok korrigálták mérés technikai hiányosságait.



**6. ábra. A váltóáram hatása a spektrális reflektancia-görbékre**

A SpecTour kutatási projekt érzékennyé tette a szakmai közösséget néhány olyan létező probléma iránt, amelynek konkrét hatása van a mérések és a spektrális könyvtárak minőségére. Ezt azért fontos hangsúlyozni, mert egyre több felhasználó, tudományos csoport kapcsolódik be a távérzékelési adatgyűjtésbe és megfelelő alapismeretek nélkül helyrehozhatatlan adathibák keletkeznek.

A projekt eredményei arra is rámutattak, hogy standardok és nemzetközileg elfogadott mérési protokollok nélkül a terepi spektroszkópia túlságosan bizonytalan adatgyűjtési eszköz lehet, szükséges a megfelelő irányelvek hosszútávú kidolgozása. Projektünk további hasonló karakterű kutatómunkáknak is mintául szolgált. A téma fontossága miatt a mérési projekt eredményeit az utóbbi időben több nemzetközi szerző is felhasználta (Jiménez et al. 2014, Rasaiah et al. 2015, Pacheco-Labrador & Martin 2015, Lausch et al. 2018).

Az eredmények gyakorlati hasznosítása a következő években várható, mert megkezdődött a lokális, regionális és globális spektrális könyvtárak összefűzése, ami a kompatibilitás vizsgálata nélkül elképzelhetetlen. A spektrális talajtani könyvtárak élen járnak ebben a folyamatban, az idevonatkozó standardok és protokollok kidolgozásában már hasznosításra kerültek a kísérleti eredményeink (Ben-Dor et al. 2015).

Az agrárinformatika és optikai adatgyűjtés egyik kapcsolódási pontja, hogy hogyan tudjuk a helyhez kötött spektrális mérőeszközöket hordozhatóvá tenni a szántóföldi gyakorlatban és pontosságukat megítélni. A talajminőségi paraméterek megítélésében az ún. FTIR (Fourier Transform Infrared) spektrométerek igen elterjedtek a laborgyakorlatban, de műszaki okokból kevés alkalmazást láttunk terepi viszonyok között. Az Agilent nevű cég jelent meg először ebben a szegmensben és Németországban elsőként kezdtünk összehasonlító munkába ezen a területen 2014-től. Kutatási eredményeink szerint a hordozható FTIR spektrométer (Agilent 4300 Handheld FTIR) ugyanolyan minőségben képes spektrális talajadatokat gyűjtésére, mint egy asztali vagy laboros eszköz (Bruker Tensor 27 bench-top). Ezzel utat nyitottunk a talajtani terepi FTIR spektrométeres nem-képalkotó mérések megkezdéséhez (Hutengs et al 2018). A nem-képalkotó vagy pontspektrométerekkel készített könyvtárak felvetik a képalkotó spektrométerekkel létrehozott adatok minőségi kérdéseit is.

Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Smart Farming, Drones & Satellites

## 2. Tématerület II: Egy mobil képalkotó spektrométer, mint innovatív adatgyűjtő eszköz fejlesztése és alkalmazása a terepi adatgyűjtésben

A tématerülethez kapcsolódó fontosabb saját tudományos eredmények:

1. **Jung, A.**, Michels, R., Graser, R. 2013: Non-scanning hyperspectral imaging camera for UAS platforms (Nichtscannende hyperspektrale Kamera für UAS Plattformen). *Bornimer Agrartechnische Berichte (ISSN 0947-7314)*, 81,141-147. (3. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
2. **(Q1)** Seidel, M., Hutengs, Ch., Oertel, F., Schwefel, D., **Jung, A.**, Vohland, M. 2020: Underwater Use of a Hyperspectral Camera to Estimate Optically Active Substances in the Water Column of Freshwater Lakes. *Remote Sensing (ISSN 2072-4292)*, 12(11), 1745 (3. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
3. **(Q2)** **Jung, A.**, Vohland, M. 2014: Snapshot Hyperspectral Imaging for Soil Diagnostics – Results of a Case Study in the Spectral Laboratory, *PFG (ISSN 1432-8364)*, 6, 0511-0522. (4. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
4. Bareth, G., Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M. L., Bolten, A., **Jung, A.**, Michels, R., Soukkamäki, J. 2014: Spectral comparison of low-weight and UAV-based hyperspectral frame cameras with portable spectroradiometer measurements. *Kölner Geographische Arbeiten (ISSN 0454-1294)* 94, 1-6. (4. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)
5. **(Q2)** Bareth, G., Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M. L., Bolten, A., **Jung, A.**, Michels, R., Soukkamäki, J. 2015: Low-weight and UAV-based Hyperspectral Full-frame Cameras for Monitoring Crops: Spectral Comparison with Portable Spectroradiometer Measurements, *PFG (ISSN 1432-8364)*, 1, 69-79. (4. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)

A képalkotó spektroszkópiát az utóbbi évtizedekben a szkennertípusú adatgyűjtők uralták (Goetz 2009) mind a műholdas, mind a légi és terepi alkalmazások területén. A terepi és mobil alkalmazások jelenlegi igényei viszont nem elégíthetők ki statikus állványszerkezetre felállított spektrális szkennerekkel, melyek mérési ideje akár több tíz percet, installálásuk fél-egy órát is igénybe vehet. A szkennerek képalkotási folyamata nem teszi lehetővé, hogy a teljes képfelület valamennyi pontja és a hozzátartozó spektrális adat egyidőben jöjjön létre. Ezt az ellentmondást oldja fel az ún. “snap-shot” spektrális képalkotás (Hagen et. al 2012), melynek előnye, hogy valós idejű teljes spektrális képadatrögzítésre képes. Hátránya, hogy hullámhossz-érzékenységi tartománya szűkebb, mint a szkennereké, jellemzően a 400 és 1100 nm közötti intervallumot öleli fel. A chip- és filtertechnológia fejlődésének köszönhetően azonban ma már 1700 (2500) nm-ig is mérni képesek ezek az extrém gyors spektrális képalkotó eszközök. A következőkben az Ulmi Egyetemen végzett “snap-shot” spektrométerre vonatkozó fejlesztésünket mutatom be, ill. annak kezdeti alkalmazási területeit.



## 2.1. 3. Tézis: Hordozható valós idejű képalkotó spektrométer kifejlesztése légi és vízalatti adatgyűjtésre

A terepi spektroszkópia adatgyűjtési módjai között egyre elterjedtebb a “snap-shot” képalkotó spektrométerek használata. Mindez köszönhető az alkalmazásspecifikus műszerfejlesztéseknek és a szintetizáló technológiai tudás kialakulásának.

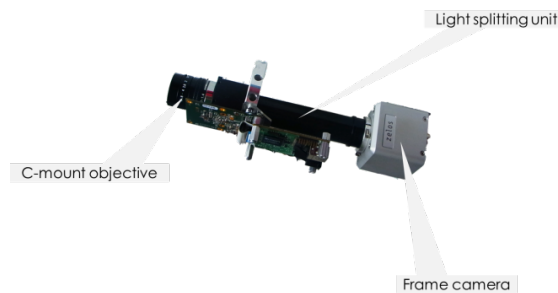
A fejlesztési lehetőségeket és a terepi spektroszkópia igényeit figyelembe véve 2011-ben, két német kollégával (Dr. René Heine, Rainer Graser), egy többfordulós pályázat keretében sikeresen pályáztunk a Baden-Württembergi Tudományos, Kutatási és Művészeti Minisztérium “Junge Innovatoren” nevű kiemelt innovációs támogatási programjára. A támogatást 12+12 hónapra nyertük el azzal a céllal, hogy elkészítsünk egy távérzékelési szempontból megfelelő, a terepi, felszínközeli és drónos (max. 100 m magasság) adatgyűjtésre alkalmas, 1 kg-nál könnyebb, hordozható hiperspektrális „snap-shot” kamerát. A projekt 2013-ban tudományos és műszaki szempontból is eredményesen záródott, melynek egyik eredménye, hogy a létrehozott technikai megoldás, a Cubert GmbH (<https://www.cubert-hyperspectral.com/>) gondozásában ipari felhasználást is nyert, ill. továbbfejlesztése biztosítottá vált. A fejlesztések 2015-ben Németországban elnyerték az „inVision TopInnovation 2015” díjat, majd 2020-ban az USA-ban a Vision Systems Design arany medálját.

A kifejlesztett spektrális képalkotási technológia működési elvét több szabadalom is védi, amelyeket a Cubert GmbH jegyez. Ettől függetlenül a kamera számos tulajdonsága, paramétere bemutatásra, tesztelésre és közlésre került. A terepi spektroszkópia szempontjából legfontosabb paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

**1.táblázat. A hiperspektrális „snap-shot” kamera fő paraméterei (Jung et al. 2013, 2020 alapján)**

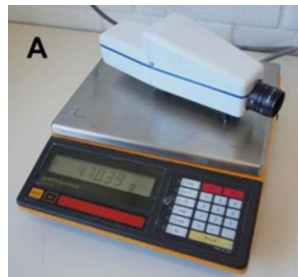
<b>Paraméter</b>	<b>2013-as célértékek</b>	<b>2015-ös értékek</b>	<b>2020-as értékek</b>
Képméret	50 x 50	50 x 50	410 x 410
Súly	< 1 kg	490 g	350 g
Csatornák száma	100 <	125	165
Spektrális felbontás	< 10 nm	4 nm	4 nm
Képalkotás sebessége	5 ms	1 ms	1 ms
Képfrekvencia	10 Hz	25 Hz	8 Hz
Spektrális tartomány	450-950 nm	450-950 nm	350-1000 nm

A 7. ábra bemutatja a kamera három fő alkotórészét. Az innovatív fejlesztés a középső (light splitting unit) fényfelbontó és -elosztó részben van, ami a beérkező fény térbeli és spektrális eloszlását rávetíti a fényérzékeny szilícium chipre.



**7. ábra. Az első UHD 185 „snap-shot” kamera belső felépítése (Fotó: Cubert GmbH)**

A kamera fejlesztése során a legfontosabb cél a szabadföldi (out-door) drónos (UAV) alkalmazások kiszolgálása volt. Ennek érdekében a súlycsökkentés és a spektrális teljesítmény összehangolása jelentette a legnagyobb kihívást. A 8. ábra szemléletesen mutatja be, hogy mennyire sikerült a súlycsökkentés a kamera önsúlya tekintetében.



**8. ábra. A spektrális kamera első végső formája 2013-ban, súlyparamétereinek (470,39 g) bemutatásával (Fotó: Szerző felvétele)**

A fenti műszaki fejlesztéssel lehetővé vált, hogy a kamera egy távirányított repülő szerkezetről készítsen hiperspektrális felvételeket. Ez a fajta terepi szabadság nem csak technikailag fontos, hanem egy pontosítási lehetőség is az időben változó jelenségek megfigyelésére. Ez különösen igaz a növénytermesztésre, amelynek időben változó termelési folyamatai nagyobb időbeli és térbeli felbontást igényelnek, mint amit a műholdak szolgáltatni képesek. Az a tény, hogy saját adatgyűjtő platform esetén, az adatgyűjtés sokkal okszerűbben végrehajtható, elősegíti a drónos alkalmazások elterjedését. Ezért is emeli ki a szakirodalom gyakran a drónok szerepét a precíziós gazdálkodásban ill. az agrárinformatikában. A 9. ábrán a hiperspektrális kamera első multikopterre szerelt változata látható 2013-ban, amely egy megfelelő tükrös elő-optikával segíti a kamerát abban, hogy repüléskor lefelé (at nadir) nézzen.



**9. ábra. Első mini hiperspektrális kamera multikopterén (Fotó: Bareth, 2013)**

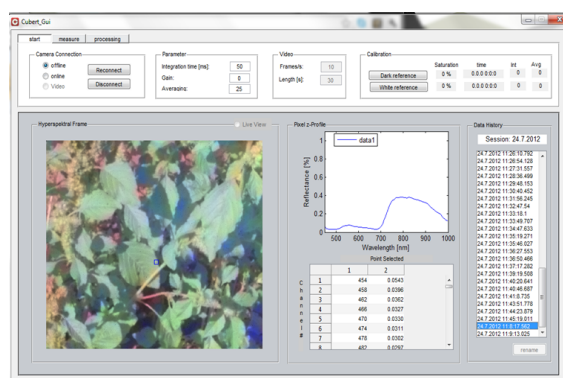
A kamera fejlesztése nem csak a multikopteres, hanem a kézi alkalmazásokat is figyelembe vette. Ezt láthatjuk a 10. ábrán. Itt szabadföldi körülmények között, a nap sugárzási energiája megfelelő mennyiségű megvilágítást biztosít ahhoz, hogy jó minőségű reflektancia spektrumokat nyerhessünk növényekről vagy talajfelszíni jelenségekről.



**10. ábra. Hiperspektrális „snap-shot” kamera terepi alkalmazásban (Fotó: szerző felvétele, Hohenheimi Egyetem, 2013)**

A fizikai adatgyűjtési szakasz során egy kezelői szoftverfelület biztosítja a kamera irányítását, a felvételre kerülő terület valósídejű bemutatását és az ezzel párhuzamos adatrögzítést. A szoftverfejlesztésünknek nem volt célja egy teljes kiértékelő program létrehozása, de néhány alapvető képfeldolgozási művelet (pl.: osztályozás, szelektálás) vagy növényi index kiszámítása elvégezhető. A 11. ábra mutatja be, hogy a képen tetszőleges pixel kiválasztása után a hozzá tartozó reflektancia-spektrum azonnal megjelenik. Valósídejű „teljeskép-alkotó” (full-frame) spektrális adatrögzítés a fenti kameratechnikával kivitelezhetővé vált és ezzel párhuzamosan új alkalmazási területek kialakulását tette lehetővé.

Azon túlmenően, hogy az általunk kifejlesztett kamera, azonos időben rögzíti az összes képpontot a spektrumokkal, fontos kiemelni az adatrögzítés sebességét is, ami ideális megvilágítás esetén 1 ms. Ez lehetővé teszi, hogy másodpercenként akár 15-20 hiperspektrális adatkocka jöjjön létre.



**11. ábra. Kezelői szoftverfelület valósídejű funkciókkal és képspektrummal (Fotó: szerző felvétele)**

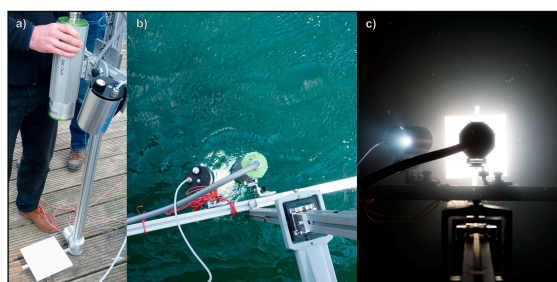
Ez a technikai képesség átvezet a videospektroszkópia területére, ami még szinte érintetlen terület az agrárinformatikai alkalmazások szempontjából. Ennek köszönhetően, álló kamerapozícióból mozgó objektumok (pl. betegségvizsgálat, gyümölcsválogatás), mozgó kamerapozícióból mozgó objektumok (pl. helyváltoztató élőlények) detektálása is lehetővé

válhat. Ily módon az élelmiszeriparban folyadékokban zajló keveredési folyamatok spektrális leírása is kivitelezhető. Ennek szemléltetésére két videót szeretnék bemutatni: (A hozzáféréshez internetkapcsolat szükséges.)

- Az 1. film<sup>1</sup> egy folyadékkeveredési folyamatot szemléltet valós idejű spektrális változással öt tetszőlegesen kiválasztott képpontra (Graser, Heine és Jung, 2013). <https://youtu.be/d0P11kh2XsU>
- A 2. film<sup>2</sup> három paprikaminta forgatása közben mért reflektancia spektrumokat mutat be öt képpontra, amelyek szín és pigmenttartalom szerint változnak (Graser, Heine és Jung, 2013). <https://youtu.be/TcuLqEUolw4>

A „snap-shot” képalkotó spektrométerek felhasználása méretük, mobilitásuk és teljesítményük miatt sokoldalú. A technika újszerűsége okán az alkalmazások nagy része még kutatási stádiumban van. Ide tartoznak az orvosi és endoszkópos, anyagvizsgálati és bányászati, víz alatti és hulladékfeldolgozási stb. alkalmazások. Ugyanígy a precíziós mezőgazdasági alkalmazások is újszerűnek tekinthetők. Ezen a területen a „snap-shot” hiperspektrális kamera használatát két témakörben kezdtük el, amelyek bemutatása a következő alfejezetben (4. tétel) olvasható. A multikopterre optimalizált hiperspektrális kamera új- és időszerű alkalmazási területnek tekinthető. A terepi hordozható spektrálkamera szintén innovatív adatgyűjtési eszköz, amelynek talajvizsgálati alkalmazását elsőként kezdtük meg Németországban. További érdekesség, hogy 2012 óta több mint százötven olyan tudományos és ágazati cikk jelent meg, amelyek az általunk kifejlesztett kamerát használták fel (saját irodalmi gyűjtés alapján).

Eddig a „snapshot” kamera szárazföldi alkalmazását mutattuk be. 2013-tól a Lipcse Egyetemen végeztem tudományos munkámat, többek között azzal a céllal, hogy a snapshot képalkotó technikát víz alatt, édesvizek vizsgálatára is alkalmassá tegyük. A projektet (HYSWA – Hyperspektrale Bildanalyse im Medium Wasser BMWi/ZIM) Prof. M. Vohlanddal vezettük hazatérésemig, 2016-ig. Ez egy egyetemi és ipari együttműködési program volt, ahol kettős szerepet vállaltam, az ipari és tudományos összehangolásban. A projekt eredményeként létrejött egy vízalatti hiperspektrális snapshot kamera, amely később piaci terméként is megjelent (<https://sphereoptics.de/en/product/hyperspectral-underwater-cameras/>). A fejlesztés prototípus változatát láthatjuk a 12. ábrán.



**12.ábra. Víz alatti hiperspektrális snapshot kamera (Seidel et al. 2020), a. Kamera és a halogén megvilágítás, b. Kamera és megvilágítás vízfelszíni megfigyeléshez, c. Kamera és megvilágítás vízalatti pozícióban**

<sup>1</sup> 1. film: <https://youtu.be/d0P11kh2XsU>

<sup>2</sup> 2. film: <https://youtu.be/TcuLqEUolw4>

A kamera alkalmazásával vizsgálni lehet a víz ún. optikailag aktív összetevőit (optically active substances, OAS), ezen belül első sorban a klorofill (pl. algásodás, eutrofizáció stb.) és az oldott színes szerves anyag tartalmát (colored dissolved organic matter, CDOM). Eddig az ismertetett paraméterek valós idejű térbeli eloszlását szkennerek alkalmazásával nem lehet megvizsgálni, ebben előrelépést jelentett a snapshot technológia alkalmazása.

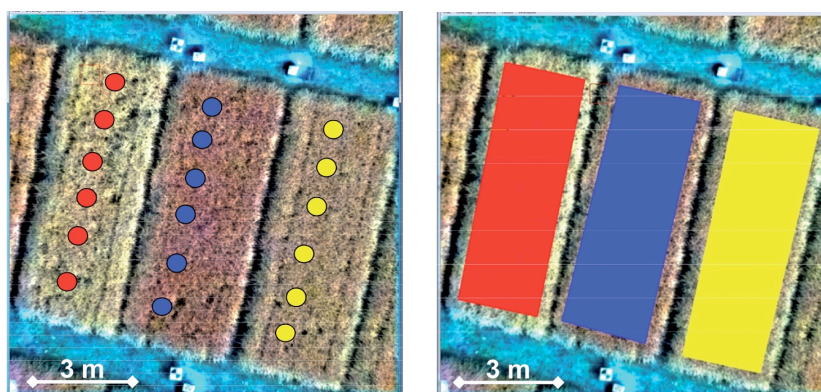
Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Drones & Satellites, Precision Agriculture

## 2.2 4. Tézis: A „snap-shot” hiperspektrális kamera alkalmazhatóságának vizsgálata a precíziós növénytermesztési kutatásban

A roncsolásmentes adatgyűjtés valamennyi optikai távérzékelési módszer jellegzetessége, amit a mezőgazdasági termelés sikere érdekében széles körben fel lehet használni. A jövőben szükséges lesz a térbeli és időbeli felbontás növelése, melyet az eddig alkalmazott műholdakkal nem lehet maradéktalanul biztosítani. Ennek következtében a precíziós növénytermesztésben használt hiper- és multispektrális szenzorok növekvő érdeklődésre tarthatnak számot. Újszerű technikai megoldást célszerű összehasonlító kísérletben tesztelni és jól ismert mutatók megadásával értékelni. Ehhez mutatom be két kísérletünk kutatási eredményeit.

### *A klein-altendorfi árpa kísérlet*

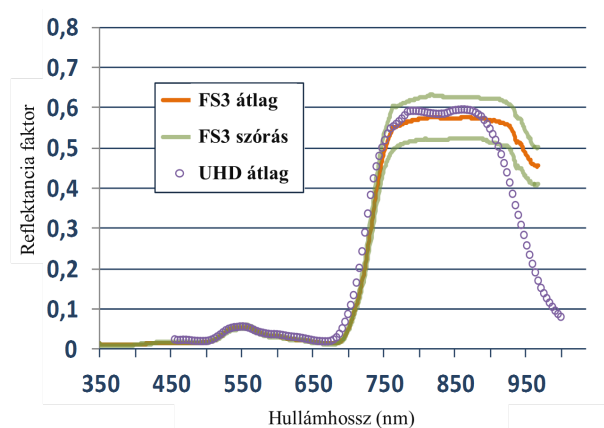
A németországi klein-altendorfi kísérlet célja az volt, hogy az általunk kifejlesztett hiperspektrális kamera spektrális adatait egy jól ismert terepi spektrométer (ASD FieldSpec) mérési eredményeivel összevessük és így a kamera megbízhatóságát, terepi használhatóságát értékeljük (lásd 13. ábra). A kísérlet egy árpa tartamkísérleti telepen zajlott, ahol 36 parcellán (3 x 7 m) 18 árpafajtát állítottak be, 40 vagy 80 kg/ha-os nitrogén műtrágyázási stratégiával. Ebből a 41-, 42- és 43-as parcellákat vontuk be a kísérleti munkába.



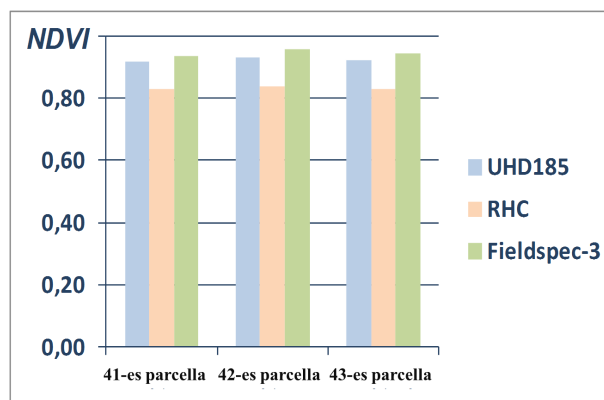
13. ábra. Mintavételi stratégia pontspektrométerrel (ASD FieldSpec, balra) és képalkotó spektrométerrel (UHD 185, jobbra)

Döntő jelentőségű volt, hogy a detektált reflektancia spektrumok és az azokból levezethető indexek hasonlóak-e ill., hogy a kamera átveheti-e kockázat nélkül a pontspektrométer szerepét. A 14. ábrán egyértelműen felismerhető, hogy a kamera és a pontspektrométer görbék hasonló lefutásutak és a kamera görbéje a pontspektrométer (FS3) görbéjének szórási tartományán belül található, azaz a kameraspektrumok megfelelő pontossággal rendelkeznek. Ennek további bizonyítására több vegetációs indexet is megvizsgáltuk.

Az egyik legismertebb vegetációs index a Rouse-féle (1973) NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), amely a 15. ábrán látható, két kamera (UHD185 és RHC) és egy nem-képalkotó spektrométer (FieldSpec-3) mérési eredményeit ábrázolja. A kameralapú NDVI értékek jól közelítik és követik a pontspektrométer NDVI értékeit.



**14. ábra. A pont- és a képalkotó spektrométer mérési adatainak összevetése (FS3 átlag: pontspektrum átlagok, FS3 szórás: szórási tartomány, UHD átlag: képspektrum átlagok)**



**15. ábra. NDVI értékek alakulása három kísérleti parcellán. Az NDVI értékeket két hiperspektrális kamera (UHD185, RHC) és egy pontspektrométer (FieldSpec-3) adta**

A kamera előnye, hogy nem csak egy értéket képes szolgáltatni mérésenként, hanem egy egész képet (lásd 13. ábra). A reflektancia görbék hasonló lefutása (lásd 14. ábra) biztosítja a szükséges statisztika megbízhatóságot ahhoz, hogy valamennyi görbe vagy index alapú számítási módszer a képadatokon is sikeresen működjön. A multikopter nyújtotta flexibilitás, az elérhető nagy térbeli felbontás (< 2 cm), valamint a több mint 130 spektrális csatorna,

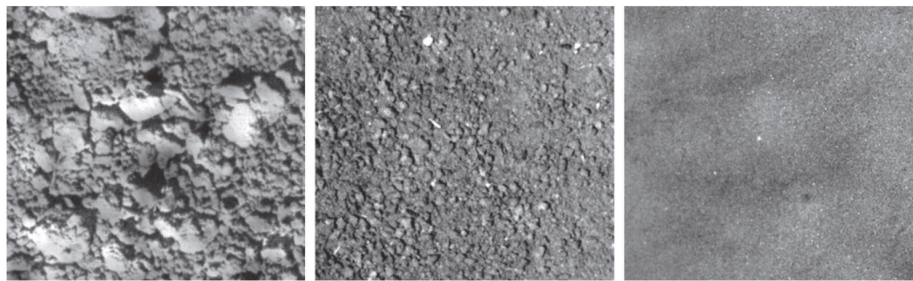


újszerű lehetőséget kínál a növénytermesztési adatgyűjtésben, amely a termésbecsléstől, a növényvédelmi intézkedéseken át a műtrágyázásig terjedhet.

#### *A lipcsei talajvizsgálati kísérlet*

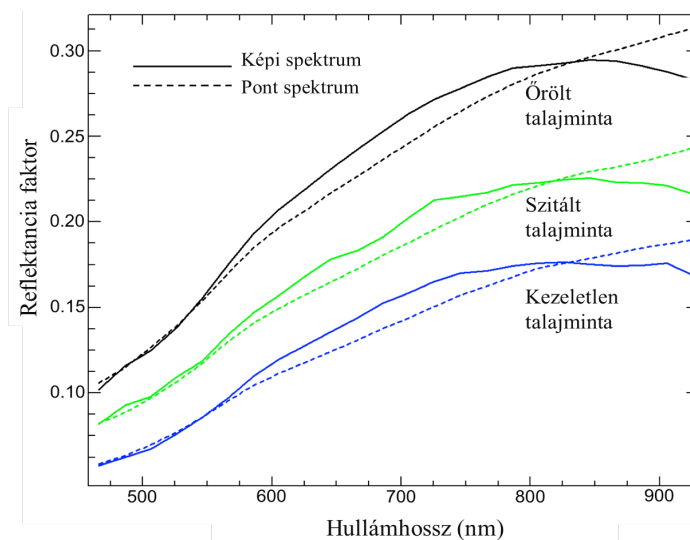
A precíziós műtrágyázási technikák igen előrehaladottnak tekinthetők a precíziós módszerek között. Az traktorra rögzített nitrogén-szenzorok már évek óta elérhetők az agrárinformatikai piacon és mint költségmegtakarító eszközök folyamatosan az érdeklődés középpontjában állnak. Ezek közös jellemzője, hogy a talaj nitrogén igényét nem közvetlenül, hanem a területen található növényzet indirekt tulajdonságaiból vezetik le és ilyen módon következtetnek a nitrogénellátottság heterogenitására.

A talajminőséget vizsgáló kísérlet során, Lipcse környéki szántóföldi területekről 40 talajmintát gyűjtöttünk. Ezeket három fizikai állapotban készítettük elő: szárított kezeletlen, szárított örölt és szárított szitált (16. ábra).



**16. ábra. A talajok kísérleti előkészítése a diffúz reflektív spektrális mérések előtt  
(balról jobbra: kezeletlen, szitált és örölt)**

A hagyományos talajspektroszkópia elemzési módszerei (Mouazen et al. 2007, Viscarra Rossel & Behrens, 2010, Vohland et al. 2014, Bellon-Maurel & McBratney, 2011) alapvetően a 400 és 2500 nm közötti tartományban helyezkednek el. Ezért elsődleges kérdésként merült fel, hogy az általunk vizsgált 400 és 1000 nm közötti tartomány kielégítőnek tekinthető-e a talajparaméterek meghatározásához. Továbbá elemeztük, hogy a hiperspektrális kamera reflexiós spektrumai összehasonlíthatók-e egy standard pont- (nem képalkotó) spektrométer (ASD FieldSpec) mérési eredményeivel, mindhárom feldolgozási szint esetében. Ez látható a 17. ábrán.



**17. ábra. A kezeletlen, szitált és az őrölt talajminták spektrumainak összehasonlító vizsgálata képpalkotó- (UHD 285) és nem-képpalkotó spektroszkópiai mérések alapján**

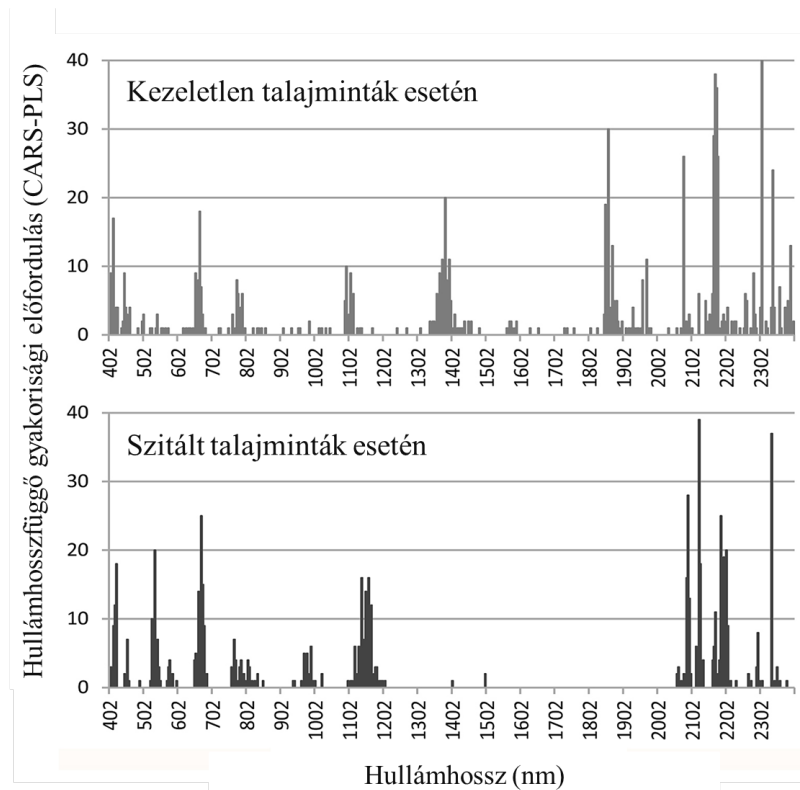
Két különböző technikával működő mérőeszköz esetében a fenti egyezőség (17. ábra), a görbék lefutási karaktere alapján, kielégítőnek tekinthető és a két görbesereg közötti átszámíthatóság és összehasonlítási műveletek megoldhatók. Ebben a munkában a képi spektrumokat átlagolással pontspektrumokká alakítottuk át.

Többszörös statisztikai eljárásokat (Wold et al. 2001) és azok hullámhossz-szelekciós változatát (Li et al., 2009) alkalmaztuk. Az első lényegében egy hagyományos PLSR (Partial Least Squares Regression), amely az egész spektrumot vizsgálja. A második a lényeges hullámhosszok kiválasztása után hajt végre egy PLS regressziót. Esetünkben a hullámhossz-szelekciós PLSR eredményesebbnek bizonyult, mint az általános PLSR. Példaként a talaj szerves széntartalmának (organic carbon) meghatározási eredményeit mutatom be részletesebben.

A kutatási eredményeink szerint a következő hullámhossztartományok jelentős szerepet játszanak a talaj szerves széntartalmának spektroszkópikus meghatározásában, amennyiben a 400 és 1000 nm közötti tartományban dolgozunk: 406-418 nm, 662-674 nm (őrölt és szitált talajmintáknál még 526-538 nm is).

Amennyiben lehetőség van az 1000 nm feletti tartomány bevonására, akkor jelentős minőségi javulás várható a következő tartományok figyelembe vételével: 1374-1394 nm (kezeletlen és őrölt mintáknál), 1850-1902 nm (kezeletlen és őrölt mintáknál), 2078-2194 nm (minden minta). 2030 nm felett a következő hullámhosszak bizonyultak jelentősnek: 2306 nm, 2334/2338 nm. A hullámhossz-szelekciós eljárás eredményeit szemléletesen a 18. ábra mutatja be.





**18. ábra. A szerves széntartalom meghatározásában releváns hullámhossztartományok kezeletlen és szitált talajminták esetén. (Minél magasabb a frekvencia, annál fontosabb a tartomány.)**

Eredményeink hasznosítása a képalkotó spektrométerek terjedésével várható. Ennek technikai és minőségi feltételei vannak. Ha a képtartalom mellett a spektrális felbontás és érzékenység is az eddigi ütemben halad, akkor a kamerák számos területen átveszik a pontspektrométerek szerepét. Különösen érinti ez a terepi adatgyűjtést és a műholdmérések földi hitelesítését, amiben eddigi eredményeink is hasznosíthatók lesznek.

Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Precision Agriculture, Smart Farming

### 3. Tématerület III: A képkalkotó és terepi spektroszkópia alkalmazhatósága a növény- és talajvizsgálatokban

A tématerülethez kapcsolódó fontosabb saját tudományos eredmények:

- **(Q3, MTA: A) Jung, A.,** Kardevan, P., Tőkei, L. 2006: Hyperspectral Technology in Vegetation Analysis. *Progress in Agricultural Engineering Sciences (ISSN 1786-335X)*, 2(1), 93-115. **(5. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- **(Q3) Jung, A.** Tőkei, L., Kardeván, P. 2007: Application of airborne hyperspectral and thermal images to analyse urban microclimate. *Applied Ecology and Environmental Research (ISSN 1589-1623)*, 5(1), 165-175. **(5. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- Götze, C., **Jung, A.**, Merbach, I., Wennrich, R., Gläßer, C. 2010: Spectrometric analyses in comparison to the physiological condition of heavy metal stressed floodplain vegetation in a standardised experiment. *Central European Journal of Geosciences (ISSN 2081-9900)*, 2(2), 132-137. **(5. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- **(Q2) Götze C, Gläßer C, Jung A.** 2016: Detecting heavy metal pollution of floodplain vegetation in a pot experiment using reflectance spectroscopy. *International Journal of River Basin Management (ISSN 1571-5124)* 14 (4) 499-507. **(5. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- **(Q3) Götze, C., Gerstmann, H., Gläßer, C., Jung, A.** 2017: An approach for the classification of pioneer vegetation based on species-specific phenological patterns using laboratory spectrometric measurements *Physical Geography (ISSN 0272-3646)* 1, 1-17. **(5. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- **(Q1) Jung, A.,** Vohland, M., Thiele-Bruhn, S. 2015: Use of a Portable Camera for Proximal Soil Sensing with Hyperspectral Image Data, *Remote Sensing (ISSN 2072-4292)*, 7(9), 11434-11448. **(6. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**
- **(Q1) Vohland, M., Jung, A.** 2020: Hyperspectral Imaging for Fine to Medium Scale Applications in Environmental Sciences. *Remote Sensing (ISSN 2072-4292)*, 12(18), 2962. **(6. TÉZIS-hez kapcsolódó cikk)**

A hiperspektrális spektroszkópia mezőgazdasági, terepi növényélettani vizsgálatait igen szerteágazóak és sokszínűek (Schaepman et al. 2009, Tan et al. 2020). Az utóbbi években a hazai kutatások is bekapcsolódtak ebbe a folyamatba és jelentős eredményeket értek el (Tamás és Lénart 2006; Firtha et al. 2008; Milics et al. 2008; Mucsi et al, 2008; Pék et al. 2014; Szalay és Fenyvesi, 2010; Kozma-Bognár és Berke, 2010; Tamás et al. 2014). Kezdeti kutatásainkban a növények (kultúr és természetes) azon tulajdonságait vizsgáltam, amelyek a növényi párologtatás következtében létrejövő felszíni hőveszteség és növényi aktivitás spektrális kifejeződéseit jelzik. Németországi tudományos tevékenységem alatt behatóan foglalkoztam a növényi stresszfaktorok spektrális tulajdonságaival, ill. a mezőgazdasági talajok gyors és roncsolásmentes spektrális diagnosztikájával is.

### 3.1 5. Tézis: A növényi stresszfaktorok (hőmérséklet és nehézfém), vegetációs indexek és a “vörös-él” tartomány statisztikai kapcsolatának feltárása

#### *A Hysens 2002 hiperspektrális kísérlet*

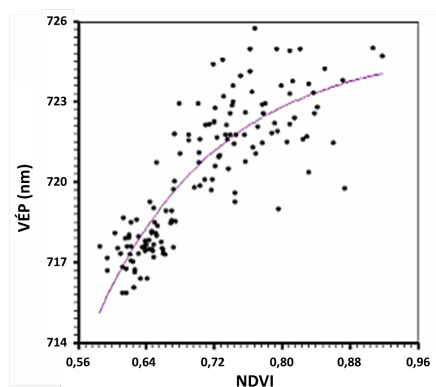
A növények párologtatási képessége erősen befolyásolja a növényi felszín sugárzási hőmérsékletét. Ezt a hőmérsékleti formát képesek vagyunk a távérzékelés eszközeivel is meghatározni és összefüggéseiben értelmezni. Magasabb léghőmérséklet esetén a növényi felszín lehülése jól mérhető, ill. a növényi zöldtömeg növekedésének hatására a lehülés tovább erősödik. Ezt az összefüggést bizonyítottuk vegetációs indexek alkalmazásával. A vörös-él pozíció meghatározásával mérsékeljük a vegetációs indexek telítődési problémáit, ami nagyobb zöldtömeg-dinamika esetén tapasztalható (Wang et al. 2005). Továbbá kifejlesztettünk egy indexet, a vízstressz, tápanyagstressz és a nehézfémstressz különválasztására.

Meghatároztuk a görbeértékelésen alapuló és egy szélessávú vegetációs index (NDVI) statisztikus kapcsolatát (19.ábra), és az azt leíró belső egyenletet. A korreláció 95%-os szignifikancia szinten megbízhatónak bizonyult.

A görbeértékelésen alapuló vegetációs index (VÉP) vizsgálataink szerint exponenciális kapcsolatban van az általunk meghatározott szélessávú vegetációs index (NDVI) értékeivel. A vörös-él-pozíció és a hagyományos vegetációs index között a következő összefüggést találtuk ( $R^2=0,73$ ).

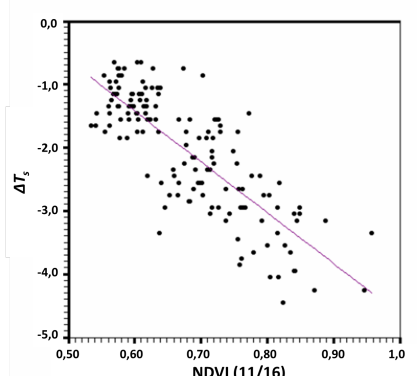
$$VÉP = A + B \cdot EXP(-C \cdot NDVI), \text{ (nm)} \quad (2)$$

ahol VÉP= vörös él pozíció,  
A = 725,008, B = -593,062, C = 6,999,  
NDVI = NDVI széles tartományon értelmezve.



19. ábra. Az NDVI és a vörös-él pozíció (VÉP) statisztikai kapcsolata

Az általunk meghatározott keskenysávú vegetációs index (NDVI(11/16)) 95%-os megbízhatósági szinten negatív lineáris kapcsolatban volt a növényzet felszínhőmérsékleti változásával ( $R^2=0,65$ ). Ezt az összefüggést mutatja be a 10.ábra és az azt követő (3) egyenlet.

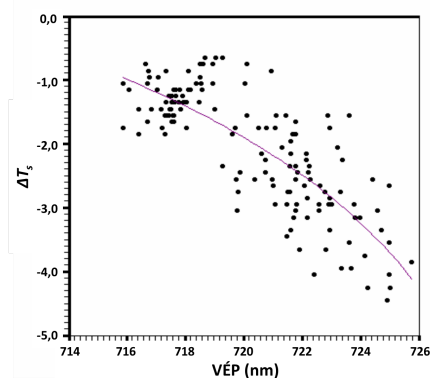


**20.ábra. Az NDVI (11/16) és a vegetációs hőmérséklet statisztikai kapcsolata**

$$\Delta T_s = A \cdot \text{NDVI} (11/16) + B, \text{ (Kelvin)} \quad (3)$$

ahol  $\Delta T_s$  = felszínhőmérsékleti változás referencia-területhez viszonyítva,  
 $A = -8,036$ ,  $B = 3,400$ ,  
 NDVI(11/16) = a 11 és 16-os DAIS csatornákból

Az általunk kifejlesztett görbeértékelésen alapuló vegetációs index (VÉP) 95%-os megbízhatósági szinten logaritmikus kapcsolatban volt (21.ábra) a növényzet felszínhőmérsékletének változásával ( $R^2=0,65$ ).



**21.ábra. A „vörös-él pozíció” és a növényi felszínhőmérséklet statisztikai kapcsolata**

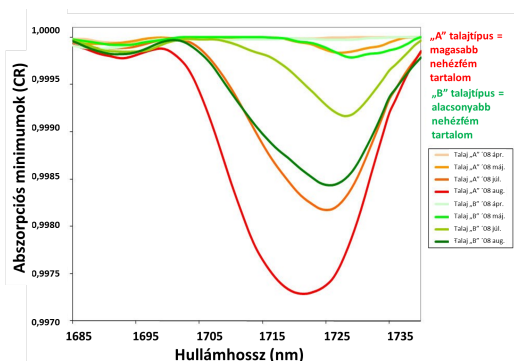
$$\Delta T_s = A + B \cdot \ln((C - \text{VÉP})/D), \text{ (Kelvin)} \quad (4)$$

ahol  $\Delta T_s$  = felszínhőmérsékleti változás a referencia-területhez képest,  
 $A = -2,559$ ,  $B = 2,861$ ,  $C = 730,706$ ,  $D = 8,500$ ,  
 VÉP = a vörös-él pozíció.

A fenti összehasonlítások bemutatásával feltártuk a vegetációs indexek és növényi felszín-hőmérsékleti mutatók közötti parametrikus összefüggéseket és kidolgoztuk azok átszámíthatóságát.

#### *A bad-lauchstädt-i üvegházi kísérlet*

Egy három éves üvegházi tartamkísérlet során vizsgáltuk három növényfaj (*Urtica dioica*, *Phalaris arundinacea*, *Alopecurus pratensis*) spektrális válaszait különböző nehézfémterhelés mellett: 3 növényfaj, 3 ismétlésben, 3 terhelési szinttel (A: 56 mg kg<sup>-1</sup> arzén, 7 mg kg<sup>-1</sup> kadmium, 152 mg kg<sup>-1</sup> ólom; B: 28 mg kg<sup>-1</sup> arzén, 1 mg kg<sup>-1</sup> kadmium, 60 mg kg<sup>-1</sup> ólom; C: 48 mg kg<sup>-1</sup> arzén, 4 mg kg<sup>-1</sup> kadmium, 187 mg kg<sup>-1</sup> ólom). Összesen 27 beállított edényes növényrel (3x3x3) dolgoztunk, amelyekről 400 spektrumot gyűjtöttünk össze. A növények mellett, a talajok nehézfém-terheltségre adott spektrális válaszait szezonálisan is vizsgáltuk (22. ábra).



**22. ábra. A talaj nehézfém-szennyezettségének és a görbék 1715-1730 nm körüli mélységének összefüggései (piros görbe=nagyobb terhelés, zöld görbék=kisebb terhelés)**

A kísérlet során 16 vegetációs indexet teszteltünk, ezek közül a szórástényezők és a kémiai vizsgálatok alapján négyet választottunk ki (NPCI=Normalized Pigment Chlorophyll Index, PRI=Photochemical Reflectance Index, REP=Red Edge Position (first derivation) és CR1730=Continuum removal analysis at 1730 nm), amelyek élettani szempontból a legalkalmasabbnak bizonyultak. Ezek között a legeredményesebb a CR1730 volt. A nehézfémek a lignin- és fehérjeszintézis során zavart okoznak, aminek következtében az 1730 nm körüli abszorpciós minimumok tovább csökkennek, amennyiben más stresszfaktorok kizárhatók, a nehézfémek hatása spektrálisan lokalizálható. Egy külszíni bányavidék revitalizációja igen lassú folyamat, a vegetáció nem hagyományos módon hódítja vissza a területet, a pionír társulások lassabban alakulnak, torzulnak és szukcessziós folyamatok elhúzódnak. A pionír társulások eredményesebb térképezése és detektálása céljából állítottunk be egy kísérletet 2008-ban a Halle-Wittenbergi Martin-Luther Tudományegyetemen. Kilenc növény fenológiai változásait követtük nagy időbeli felbontásban (1-2 heti) két éven keresztül egy terepi spektrométer (ASD FieldSpec) felhasználásával. Az egyik legnagyobb tanulság volt, hogy különböző növényfajok igen hasonló spektrális mintákat adhatnak eltérő fenológiai állapotokban. A hasonlósági szinteket, „döntési fa” algoritmus alkalmazásával vizsgáltuk.

Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Precision Agriculture, Smart Farming

### 3.1. 6. Tézis: Gyors és roncsolásmentes talajdiagnosztikai módszer kidolgozása kemometriai módszerek alkalmazásával

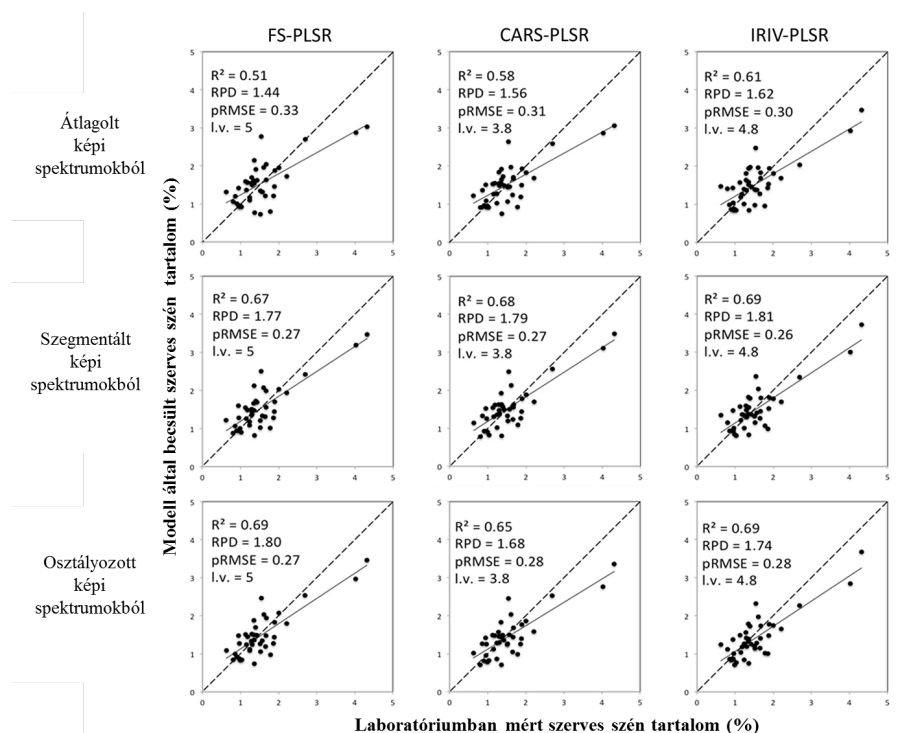
A terepi spektroszkópiában még ritkán alkalmazunk hordozható képalkotó spektrométert. Annak ellenére, hogy a képi információ jelentős hozzáadott értéket jelenthet és javíthatja az adatelemzési eljárás eredményességét. Ezen feltevés bizonyítására 40 talajmintát vizsgáltunk meg egy képalkotó spektrométer alkalmazásával. A kiértékelés során, három adatfeldolgozottsági szintet különítettünk el: képi adat átlaga, képi adat 25 kisképre bontva és a képi adat 25 osztályozási klaszterre bontva. Valamennyi esetben elvégeztük az adatok egész spektrumra vonatkoztatott PLSR vizsgálatát (FS-PLSR), valamint a szelektált hullámhosszakra vonatkoztatott PLSR számításokat (1. CARS-PLSR, Li et al. 2009, 2. IRIV-PLSR, Yun et al. 2014). Az IRIV-PLSR kemometriai módszer távérzékelési alkalmazása ebben a tanulmányban történt meg először. A PLSR-hez szükséges talajparamétereket kémiai vizsgálattal állapítottuk meg, amely kiterjedt a szerves széntartalomra (OC, %), forróvíz-oldható szerves szén (HWE-C,  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ), nitrogén (N, %) és agyag tartalomra (Clay, %). A 2. táblázat alapján összeállítható, hogy melyik talajparaméter, melyik módszer és képfeldolgozási szint mellett határozható meg legbiztosabban, ami döntéstámogató eszközként is alkalmazható. Az  $R^2$  és RPD (residual prediction deviation) értékek biztosítják a szükséges becslési szempontokat. Az RPD értékeket Saeys et al. 2005 szerint értelmeztük, amely alapján 1,5 felett az előrejelzés jónak tekinthető.

A szerves széntartalom meghatározására a következő összefüggések szolgáltak, amelyek iránymutatásukban megegyeznek a 2. táblázattal, ábrázolásukra viszont a vizuális formát választottuk, az összefüggések alternatív megjelenítése érdekében (23. ábra).

**2. táblázat. A talajparaméterek, statisztikai modellek és képfeldolgozási szintek összefoglalása**

Képfeldolgozási szint	Modell	Nitrogén (%)				HWE-C ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )				Agyagtartalom (%)			
		l.v. <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>	RPD	pRMSE	l.v. <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>	RPD	pRMSE	l.v. <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>	RPD	pRMSE
Átlagolt képi spektrum	FS-PLSR <sub>cv</sub>	5	0.48	1.40	0.05	6	0.48	1.38	191.6	5	0.49	1.41	4.17
	CARS-PLSR <sub>cv</sub>	3.7	0.59	1.59	0.044	3.0	0.54	1.49	178.4	4.2	0.65	1.72	3.42
	IRIV-PLSR <sub>cv</sub>	4.5	<b>0.62</b>	<b>1.63</b>	<b>0.043</b>	4.8	<b>0.58</b>	<b>1.56</b>	<b>170.5</b>	4.8	<b>0.70</b>	<b>1.85</b>	<b>3.18</b>
Szegegmentált képi spektrum	FS-PLSR	5	0.63	1.65	0.042	5	0.62	1.64	162.1	5	0.64	1.44	4.09
	CARS-PLSR	3.7	0.63	1.66	0.042	3.0	0.58	1.55	171.3	4.2	0.66	1.50	3.92
	IRIV-PLSR	4.5	<b>0.66</b>	<b>1.72</b>	<b>0.041</b>	4.8	<b>0.63</b>	<b>1.64</b>	<b>161.9</b>	4.8	<b>0.71</b>	<b>1.68</b>	<b>3.49</b>
Osztályozott képi spektrum	FS-PLSR	5	<b>0.65</b>	<b>1.65</b>	<b>0.042</b>	6	<b>0.70</b>	<b>1.85</b>	<b>145.1</b>	5	0.71	<b>1.51</b>	<b>3.88</b>
	CARS-PLSR	3.7	0.63	1.62	0.043	3.0	0.58	1.55	170.7	4.2	0.70	1.39	4.22
	IRIV-PLSR	4.5	0.58	1.51	0.046	4.8	0.63	1.66	159.6	4.8	0.72	1.49	3.95

<sup>a</sup>30 modellfuttatásból átlagolva CARS-PLSR-nél és IRIV-PLSR-nél



**23. ábra. A szerves széntartalom (OC, %) terepi spektroszkópikus meghatározási módjai különböző PLSR és képfeldolgozási módszerek szerint**

A legeredményesebb az agyagtartalom ( $R^2=0,7$ ;  $RPD=1,85$ ) meghatározása volt, amennyiben az IRIV-PLSR módszert választjuk és a hiperspektrális képtartalmat a képi átlagspektrumból számítottuk ki. Hasonlóan eredményes volt a szerves széntartalom meghatározása is ( $R^2=0,69$ ;  $RPD=1,81$ ), amennyiben a hiperspektrális képtartalmat az azonos kvadrátok (esetünkben 25) átlagspektrumaiból építjük fel.

Ebben a fejezetben két növény- és egy talajspektroszkópiai alkalmazást mutattunk be. Amennyiben több mint négy csatorna áll rendelkezésre a 650 és 750 nm közötti tartományban célszerű a vörös-él-pozíció meghatározása, mert több spektrális tulajdonságot képes figyelembe venni és nem telítődik nagyobb zöldtömeg esetén. Bizonyítottuk a VÉP és vegetációs indexek kapcsolatát, javaslatunk szerint a VÉP gyakorlati alkalmazásokban átveheti a vegetációs indexek szerepét. A nehézfém-szennyezettség spektrális ujjlenyomatai nem stabilak a 400 és 2500 nm közötti tartományban, ezért indirekt paraméterek figyelembevételével és más stresszfaktorok kizárásával mégis bizonyítani tudtuk a nehézfémstressz jelenlétét, amely felhasználható a roncsolásmentes terepi analitikus módszerekben. Gyors és térben lokalizálható talajtulajdonságok kamerás meghatározása a terepi adatgyűjtés során új lehetőséget kínál a reprezentatív mintavételezésre, melynek technikai és módszertani feltételei ma már adóttak. Továbbá rámutattunk az újraéledő növénytársulások spektroszkópiai kihívásaira.

Agrárinformatikai kapcsolódási pont: Precision Agriculture, Smart Farming

## Új tudományos eredmények

1. **TÉZIS: Spektrális könyvtárak összehasonlíthatóságának javítása fehér referencia alapú posztkorrekciós eljárás kidolgozásával.** Eljárást dolgoztam ki különböző spektrométerekkel készített mérési eredmények, ismert referencia-spektrumokra alapozott összehasonlíthatóságára és utólagos korrekciójára.
2. **TÉZIS: Nem-képalkotó terepi spektrométerek méréstechnikai hibáinak feltárása, empirikus értékelése nemzetközi összehasonlításban.** Kidolgoztam és kiértékeltem egy nemzetközi spektrális méréstechnikai kísérletet, amely bebizonyította a munkacsoportok heterogenitását és a mérési standardok fontosságát a spektrális könyvtárak kompatibilitásában.
3. **TÉZIS: Hordozható valós idejű képalkotó spektrométer kifejlesztése légi és vízalatti adatgyűjtésre.** Részt vettem az első német „snap-shot” képalkotó spektrométer kifejlesztésében, szabadalmának kidolgozásában és irányítottam a terepi spektroszkópia céljaira történő adaptálását légi és vízi környezetben.
4. **TÉZIS: A „snap-shot” hiperspektrális kamera alkalmazhatóságának vizsgálata a precíziós növénytermesztési kutatásban.** Olyan eljárást dolgoztam ki, amivel igazolható, hogy egy „snap-shot” képalkotó spektrométer alkalmas növénytermesztési kutatásokra.
5. **TÉZIS: A növényi stresszfaktorok (hőmérséklet és nehézfém), vegetációs indexek és a “vörös-él” tartomány statisztikai kapcsolatának feltárása.** Hiperspektrális és termális felvételek alapján igazoltam, hogy a növényfelszíni hőmérséklet-változás és stresszválaszok spektrális mutatókkal is előrejelezhetők.
6. **TÉZIS: Gyors és roncsolásmentes talajdiagnosztikai módszer kidolgozása kemometriai módszerek alkalmazásával.** Kidolgoztam egy döntéstámogató eljárást, mely képi hiperspektrális adatok (400-1000 nm) alapján a talaj nitrogén, szerves szén és agyag tartalmának gyors meghatározását teszi lehetővé.



## A tézisekhez kapcsolódó fontosabb saját publikációk összefoglalása

### Tudományos közlemények nemzetközi folyóiratokban

1. **(Q1) Jung, A.,** Vohland, M., Thiele-Bruhn, S. 2015: Use of a Portable Camera for Proximal Soil Sensing with Hyperspectral Image Data, *Remote Sensing* (ISSN 2072-4292), 7(9), 11434-11448.
2. **(Q1) Seidel, M.,** Hutengs, Ch., Oertel, F., Schwefel, D., **Jung, A.,** Vohland, M. 2020: Underwater Use of a Hyperspectral Camera to Estimate Optically Active Substances in the Water Column of Freshwater Lakes. *Remote Sensing* (ISSN 2072-4292), 12(11), 1745
3. **(Q1) Vohland, M., Jung, A.** 2020: Hyperspectral Imaging for Fine to Medium Scale Applications in Environmental Sciences. *Remote Sensing* (ISSN 2072-4292), 12(18), 2962.
4. **(Q2) Jung, A.,** Götze, C., Gläßer, C. 2010: White-reference Based Post-correction Method for Multi-source Spectral Libraries. *PFG* (ISSN 1432-8364) 5, 361-368.
5. **(Q2) Jung, A.,** Götze, C., Gläßer, C. 2012: Overview of Experimental Setups in Spectroscopic Laboratory Measurements – the SpecTour Project. *PFG*(ISSN 1432-8364) 4, 0433-0442.
6. **(Q2) Jung, A.,** Vohland, M. 2014: Snapshot Hyperspectral Imaging for Soil Diagnostics – Results of a Case Study in the Spectral Laboratory, *PFG* (ISSN 1432-8364), 6, 0511-0522.
7. **(Q2) Bareth, G.,** Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M. L., Bolten, A., **Jung, A.,** Michels, R., Soukkamäki, J. 2015: Low-weight and UAV-based Hyperspectral Full-frame Cameras for Monitoring Crops: Spectral Comparison with Portable Spectroradiometer Measurements, *PFG* (ISSN 1432-8364), 1, 69-79.
8. **(Q2) Götze C, Gläßer C, Jung A.** 2016: Detecting heavy metal pollution of floodplain vegetation in a pot experiment using reflectance spectroscopy. *International Journal of River Basin Management* (ISSN 1571-5124) 14 (4) 499-507.
9. **(Q2) Hutengs, C.,** Ludwig, B., **Jung, A.,** Eisele, A. and Vohland, M., 2018: Comparison of Portable and Bench-Top Spectrometers for Mid-Infrared Diffuse Reflectance Measurements of Soils. *Sensors* (ISSN 1424-8220), 18(4), p. 993.
10. Götze, C., **Jung, A.,** Merbach, I., Wennrich, R., Gläßer, C. 2010: Spectrometric analyses in comparison to the physiological condition of heavy metal stressed floodplain vegetation in a standardised experiment. *Central European Journal of Geosciences* (ISSN 2081-9900), 2(2), 132-137.
11. **Jung, A.,** Michels, R., Graser, R. 2013: Non-scanning hyperspectral imaging camera for UAS platforms (Nichtscannende hyperspektrale Kamera für UAS Plattformen). *Bornimer Agrartechnische Berichte* (ISSN 0947-7314), 81,141-147.
12. Bareth, G., Aasen, H., Bendig, J., Gnyp, M. L., Bolten, A., **Jung, A.,** Michels, R., Soukkamäki, J. (2014): Spectral comparison of low-weight and UAV-based hyperspectral

frame cameras with portable spectroradiometer measurements. *Kölner Geographische Arbeiten (ISSN 0454-1294)* 94, 1-6.

13. (Q3) Götze, C., Gerstmann, H., Gläßer, C., Jung, A. 2017: An approach for the classification of pioneer vegetation based on species-specific phenological patterns using laboratory spectrometric measurements *Physical Geography* (ISSN 0272-3646) 1, 1-17.

**Tudományos közlemények hazai idegennyelvű folyóiratban**

14. (Q3, MTA: A) Jung, A., Kardevan, P., Tőkei, L. 2006: Hyperspectral Technology in Vegetation Analysis. *Progress in Agricultural Engineering Sciences (ISSN 1786-335X)*, 2(1), 93-115.
15. (Q3) Jung, A. Tőkei, L., Kardeván, P. 2007: Application of airborne hyperspectral and thermal images to analyse urban microclimate. *Applied Ecology and Environmental Research (ISSN 1589-1623)*, 5(1), 165-175.

## Irodalmi hivatkozások

1. Alexandratos, N. and Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. <https://www.fao.org/3/ap106e/ap106e.pdf> Utolsó elérés: 2021.11.13
2. Bacco, M., Berton, A., Ferro, E., Gennaro, C., Gotta, A., Matteoli, S., Paonessa, F., Ruggeri, M., Virone, G., Zanella, A. 2018: Smart farming: Opportunities, challenges and technology enablers. In 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany) (pp. 1-6). IEEE.
3. Bhargavi, P., and Jyothi, S. 2019: Big Data and Internet of Things for Analysing and Designing Systems Based on Hyperspectral Images. In Environmental Information Systems: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications (pp. 621-641). IGI Global.
4. Bellon-Maurel, V., McBratney, A. 2011: Nearinfrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils – Critical review and research perspectives. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(7): 1398–1410.
5. Ben Dor E, Ong C, Lau IC. 2015: Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and protocols. *Geoderma*, 245-246: 112–124.
6. Caballero, D., Calvini, R., and Amigo, J. M. 2020: Hyperspectral imaging in crop fields: Precision agriculture. In Data handling in science and technology (Vol. 32, pp. 453-473). Elsevier.
7. Castro-Esau, K. L., G. A. Sanchez-Azofeifa, B. Rivard. 2006: Comparison of spectral indices obtained using multiple spectroradiometers. *Remote Sensing of Environment*, 103(3): 276–288.
8. DAS 2019: Digitális Jólét Program Magyarország Digitális Agrár Stratégiája 2019-2022. <https://digitalisjoletprogram.hu/files/24/2e/242e263bd2b441f6f30cf400e06e1e4a.pdf>. Utolsó elérés: 2021.11.13
9. Firtha, F., Fekete, A., Kaszab, T., Gillay, B., Nogula-Nagy, M., Kovács, Z., Kantor, D. B. 2008: Methods for improving image quality and reducing data load of NIR hyperspectral images. *Sensors*, 8(5): 3287–3298.
10. GIL. 2021: Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft (GIL). <https://gil-net.de/> Utolsó elérés: 2021.11.13
11. Goetz, A.F.H. 2009: Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113: 5–16.
12. Gutiérrez, S., Wendel, A. and Underwood, J. 2019: Ground based hyperspectral imaging for extensive mango yield estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 126-135.
13. Hagen, N.; Kester, R.T.; Gao, L., Tkaczyk, T.S. 2012: Snapshot advantage: A review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems. *Opt. Eng.*, 51: 111702–1.
14. Jiménez M, González M, Amaro A., Fernández-Renau A. 2014: Field Spectroscopy Metadata System Based on ISO and OGC Standards. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(3): 1003–1022.
15. Jung, A., Locherer, M., Heine, R. 2020: Video spectroscopy and high-speed hyperspectral imaging. In Hyperspectral Imaging and Applications (Vol. 11576, p. 115760F). International Society for Optics and Photonics.

16. Kozma-Bognár, V., Berke, J. 2010: New Evaluation Techniques of Hyperspectral Data. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*, 8(5): 49–53.
17. Li, H., Liang, Y., Xu, Q., Cao, D. 2009: Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration. *Anal. Chim. Acta*, 648: 77–84.
18. Lausch, A., Borg, E., Bumberger, J., Dietrich, P., Heurich, M., Huth, A., Jung, A., Klenke, R., Knapp, S., Mollenhauer, H. and Paasche, H., 2018: Understanding forest health with remote sensing, part III: requirements for a scalable multi source forest health monitoring network based on data science approaches. *Remote sensing*, 10(7), p.1120.
19. Milics, G., Csiba, M., Burai, P., Lénárt, Cs., Tamás, J., Neményi, M. 2008: Szemtermés minőségi paramétereinek előrejelzése és térképzése hiperspektrális légfelvételezéssel és betakarítás során mért adatok alapján. In: Tóth L , Magó L (szerk.) Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományok Osztálya Agrárműszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás Nr. 32 . pp. 134-138. (ISBN:978-963-611-451-0; 978-963-611-449-7)
20. Milton, E. J. 1987: Review article principles of field spectroscopy. *Remote Sensing*, 8(12): 1807–1827.
21. Milton, E. J., M. E. Schaepman, K. Anderson, M. Kneubühler, N. Fox. 2009: Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, 113: 92–109.
22. Mouazen, A.M., Maleki, M.R., De Baerdemaeker, J., Ramon, H., 2007: On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil and Tillage Research*, 93(1): 13–27.
23. Mucsi, L., Tobak, Z., Leeuwen, B., Szatmári, J., Kovács, F. 2008: Analyses of spatial and temporal changes of the urban environment using multi- and hyperspectral data In: Carsten Jürgens (szerk.) *Remote sensing - New Challenges of High Resolution: proceedings of the EARSeL Joint Workshop* . Konferencia helye, ideje: Bochum , Németország , 2008.03.05 2008.03.07. Bochum: Geographisches Institut der Ruhr-Universität, 2008. pp. 275-286. (ISBN:978-3-925143-79-3)
24. Pacheco-Labrador J, Martin MP. 2014: Nonlinear Response in a Field Portable Spectroradiometer: Characterization and Effects on Output Reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 920–928.
25. Pék, Z., Daood, H., Lugasi, A., Fenyvesi, L., Helyes, L. 2014: Visible reflectance and content of isomeric ratio of lycopene in commercial and elevated lycopene tomato varieties by different technological traits, *Acta Alimentaria* 43: (1) pp. 105-112.
26. Rasaiah BA, Jones SD, Bellman C, Malthus TJ, Hueni A. 2015: Assessing Field Spectroscopy Metadata Quality. *Remote Sensing*, 7(4): 4499–4526.
27. Rouse, J. W., Haas, R. H. 1973: Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS. Third ERTS Symposium, vol. 1 ( pp. 309–317). Washington, DC: NASA
28. Saeys, W., Mouazen, A.M., Ramon, H. 2005: Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 91(4): 393–402.

29. Schaepman, M. E., Ustin, S. L., Plaza, A. J., Painter, T. H., Verrelst, J., Liang, S. 2009: Earth system science related imaging spectroscopy—An assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113: 123–137.
30. Sipos, L., Boros, I. F., Csambalik, L., Székely, G., Jung, A., & Balázs, L. 2020: Horticultural lighting system optimalization: A review. *Scientia Horticulturae*, 273, 109631.
31. Szalay, K. D., Fenyvesi, L. 2010: Spectral separation of different nutrient levels in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at characteristic wavelengths. *Mechanical Engineering Letters*, 4: 220–229.
32. Tamás, J., Lehoczky, É., Fehér, J., Fórián, T., Nagy, A., Bozsik, É., Gálya, B., Riczu, P. 2014: Airborne hyperspectral and LiDAR data integration for weed detection. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 16: 12562.
33. Tamás, J., Lénárt, C. 2006: Analysis of a small agricultural watershed using remote sensing techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 27(17): 3727–3738.
34. Tan, K., Wang, H., Chen, L., Du, Q., Du, P., Pan, C. 2020: Estimation of the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest. *Journal of hazardous materials*, 382, 120987.
35. Valin, H., 2019: Future Food Demand Drivers and Pathways Towards Sustainability Background Note. [https://www.un.org/en/development/desa/population/events/pdf/expert/30/papers/Background\\_Note\\_Valin.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/events/pdf/expert/30/papers/Background_Note_Valin.pdf) Utolsó elérés: 2021.11.13
36. StartUs Insights, 2020: AgriTech Innovation Map Reveals Rising Technologies & Startups. <https://www.startus-insights.com/innovators-guide/agritech-innovation-map-reveals-rising-technologies-startups/> Utolsó elérés: 2021.11.13
37. Tian, X., Engel, B. A., Qian, H., Hua, E., Sun, S., & Wang, Y., 2021: Will reaching the maximum achievable yield potential meet future global food demand?. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126285.
38. Viscarra Rossel, E. A., Behrens, T., 2010: Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158 (1–2): 46–54.
39. Vohland, M., Ludwig, M., Thiele-Bruhn, S., Ludwig, B., 2014: Determination of soil properties with visible to near- and mid-infrared spectroscopy effects of spectral variable selection. *Geoderma*, 223–225: 88–96.
40. Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., Granier, A. 2005: On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, 94(2): 244–255.
41. Wold, S., Sjöström, M., Eriksson, I., 2001: PLS regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 58(2): 109–130.
42. Yun, Y.-H.; Wang, W.-T.; Tan, M.-L.; Liang, Y.-Z.; Li, H.-D.; Cao, D.-S.; Lu, H.-M.; Xu, Q.-S. 2014: A strategy that iteratively retains informative variables for selecting optimal variable subset in multivariate calibration. *Anal. Chim. Acta*, 807: 36–43