

WHITE PAPER



MAGYARORSZÁG
KORMÁNYA

Európai Unió
Európai Regionális
Fejlesztési Alap



BEFEKTETÉS A JÖVŐBE

SZÉCHENYI



Az AgroMo megközelítés: integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer kialakítása a hazai agroklimatológiai környezetben – modellfejlesztés és megfigyelőrendszer kapcsolata és együttműködése

Szerkesztette: Barcza Zoltán és Fodor Nándor

Szerzők: Árendás Tamás, Árvai Mátyás, Barcza Zoltán, Bartholy Judit, Cseresnyés Imre, Fodor Nándor, Gell Gyöngyvér, Gelybó Györgyi, Haszpra László, Hidy Dóra, Horváth Ferenc, Ittzés Dóra, Koós Sándor, Laborczi Annamária, Marton A. Tibor, Mészáros János, Nagy Zoltán, Papp Gábor, Pásztor László, Pintér Krisztina, Pokovai Klára, Pongrácz Rita, Rada Mátyás, Salma Imre, Sándor Renáta, Szatmári Gábor, Takács Katalin, Takács Tünde



Martonvásár
2018

ELŐSZÓ

Az Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont (MTA ATK) és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar (ELTE TTK) által létrehozott konzorcium 2016 decemberében nyerte el az „Interdiszciplináris Kutatóműhely Létrehozása a Klímaadaptív és Fenntartható Mezőgazdaságért” című GINOP pályázatot. A projekt a hazai mezőgazdaság fenntartható és klímabarát fejlesztéséhez kíván hozzájárulni egy igen komoly, interdiszciplináris kísérleti környezet kiépítésével, és egy ún. Integrált Modellrendszer szoftver létrehozásával, amely képes számszerűsíteni a hazai mezőgazdasági termelés jövőbeli alakulását a klímaváltozási és agrárközgazdasági forgatókönyvek függvényében. Jelen dokumentum a projekt filozófiáját, felépítését és a tervezett szoftver komponenseit mutatja be részletesen. A dokumentum egyik kimondott célja, hogy ösztönözze a hasonló kezdeményezéseket, valamint bemutassa a kutatás tudományos hátterét. Jelen anyag a projekt megvalósításának előtanulmánya, ami azt jelenti, hogy a létrehozott rendszer ettől némiképp eltérhet. Mindenesetre bízunk abban, hogy az olvasó számára közérthetően és világosan közöljük a munkánk alapjait, és azt az egységes rendszert, amit az AgroMo megközelítés jelent.

Martonvásár, 2018. január 30.

Fodor Nándor
projektvezető (MTA ATK)

Barcza Zoltán
szakmai vezető az ELTE részéről

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezető – Globális és regionális kihívások az agroklimatológia problémakörében	4
2. A projekt filozófiája	5
3. Biome-BGCMuSo 4.0: az alapmodell bemutatása, szerepe az AgroMo-ban	8
3.1. A Biome-BGCMuSo modell története	8
3.2. A legfontosabb modellfejlesztések.....	11
4. Az AgroMo mérőrendszer bemutatása	15
4.1. Kísérleti környezetek.....	16
4.1.1. Szabadföldi szén-dioxid dúsítás (FACE)	16
4.1.2. Liziméteres kísérleti környezet	17
4.1.3. Tartamkísérletek az ATK területén	18
4.1.4. Nagytáblás szántóföldi kísérleti környezetek Martonvásár közelében	19
4.1.5. Klímakamrás kísérleti környezet (Fitotron)	20
4.1.6. Kísérleti környezetek Magyarország egyéb helyszínein	20
4.2. A mérések bemutatása.....	22
4.2.1. Levélfelület index és levélmorfológiai mérések	23
4.2.2. Allergén fehérjék nyomonkövetése.....	30
4.2.3. Az AM gombák szerepének vizsgálata a talaj–AM gomba–növény rendszer szénkörforgalmában	39
4.2.4. Eddy-kovariancia mérések	48
4.2.5. Hagyományos mérések a tartamkísérletekben	58
4.2.6. Gyökérzet vízfelvételi aktivitásának nyomon követése a gyökér–talaj rendszer elektromos kapacitásának mérésével.....	63
4.2.7. CO ₂ koncentráció eloszlás mérése a szabadföldi szén-dioxid dúsítás kísérlet (FACE) területén	66
4.2.8. Szabadföldi szén-dioxid dúsításban (FACE) termesztett kukorica légköri emissziójának hatása a levegőkémiaira és az éghajlatra	68
4.2.9. A talaj üvegházhatású gáz forgalma.....	73
4.2.10. Levélszintű fotoszintézis mérés	78
4.2.11. <i>In-situ</i> roncsolásmentes gyökérnövekedés monitoring	80
4.2.12. Hiperspektrális távérzékelés.....	82
4.2.13. Talaj hidraulikus vezetőképesség, vízbeszivárgás és víztaszítás meghatározása. 90	
4.2.14. Légköri üvegházhatású gázok háttérkoncentrációjának mérése Hegyhátsálon ...	97
4.3. Műholdas megfigyelések lehetséges szerepe	100
5. Az Integrált Modellrendszer bemutatása.....	114
5.1. Az AgroMo integrált modellrendszer tervezett logikája.....	114
5.2. Klímaadatok bemutatása, az eredmények és modelligények összehangolása	116
5.3. Adatbányászat technológiák.....	122
5.4. Tudományos célú informatikai környezet kialakítása, a BBGCDB szerepe	125
5.5. Az Integrált Modellrendszer talajtani adatigényeinek kielégítése az eredmények térbeli kiterjeszhetőségének figyelembevételével	128
6. Agrárközgazdasági vonatkozások	140
Irodalomjegyzék.....	144

1. Bevezető – Globális és regionális kihívások az agroklimatológia problémakörében

A Föld egészét tekintve az egyre növekvő népesség élelmiszer-ellátása érdekében az elkövetkező 50 évben több terményt és takarmányt kell előállítani, mint az ezt megelőző 10 000 évben összesen, ráadásul egyre szélsőségesebb környezeti feltételek mellett. Ezen két fő kihívás kapcsán a G7 országok agrárminisztereinek legutóbbi csúcstalálkozóján (NIIGATA, 2016) kiemelt feladatnak nyilvánították a fenntartható mezőgazdasági termelés és termelékenység fejlesztését. Állásfoglalásuk szerint ehhez többek között interdiszciplináris és gyakorlat-orientált kutatási és technológiai fejlesztések támogatására van szükség, továbbá megbízható és szabadon hozzáférhető adatok gyűjtésére és széles körű alkalmazására. Ez a felismerés óriási kihívás elé állítja mind a kutatókat, mind a gazdákat, mind a döntéshozókat.

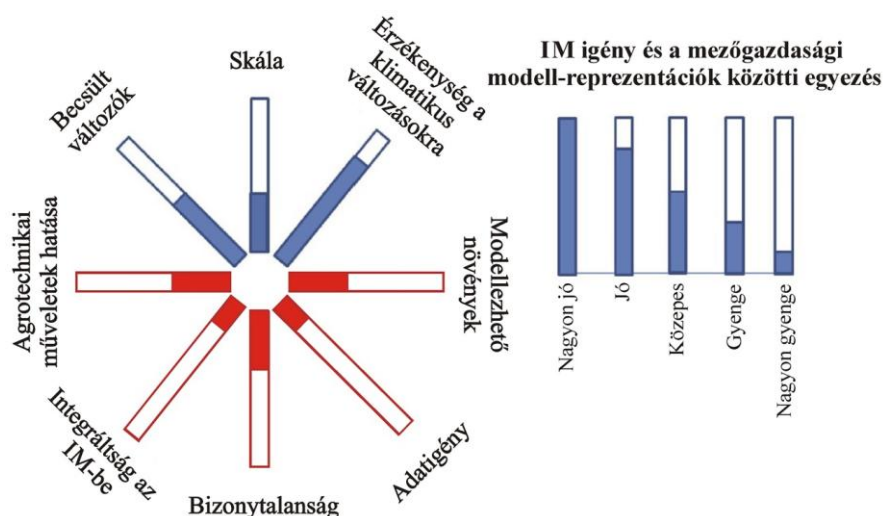
Magyarország területének 85 százaléka (beleértve a gyepek- és erdőgazdálkodást is) mezőgazdasági művelés alatt áll. Az agrárszektorból származó jövedelem sok százezer család megélhetését biztosítja idehaza (KSH, 2015), amely ugyanakkor növekvő bizonytalansággal terhelt az egyre gyakrabban jelentkező szélsőséges környezeti feltételek (aszályok, hőhullámok, belvíz, stb.) miatt. Lovász László, a Magyar Tudományos Akadémia jelenlegi elnöke 2016-os beszédében az agrárszektor kapcsán megemlítette: „Azt sem kell sokat bizonygatni, hogy [a szektort] nagy kihívások érik: a klímaváltozás, a környezeti károsodások...” (Lovász, 2016). A mezőgazdaság fenntartható fejlődése kiemelt fontosságú feladat, aminek megoldásához több tudományterület szakértőinek összefogására, és világszínvonalú kutatási (kísérletes és szellemi) műhelyek létrehozására van szükség. Az „Interdiszciplináris Kutatóműhely Létrehozása a Klímaadaptív és Fenntartható Mezőgazdaságért” című GINOP projekt a fent vázolt kihívásokra próbál megoldást találni.

2. A projekt filozófiája

A korszerű, nemzetközileg is elfogadott szemléletmód szerint az agro-ökoszisztémák változó környezeti feltételekre adott válaszai és visszahatásai kizárólag ún. Integrált Modellrendszerek (IM) segítségével értékelhetők (Ewert et al., 2015). Ezek olyan számítógépes (virtuális) környezetek, amelyek a mezőgazdasági rendszer lehető legnagyobb szegmensének működését igyekeznek szimulálni, beleértve a rendszer biogeokémiai, agrotechnikai és közgazdasági összetevőit, folyamatait és azok kölcsönhatásait. Segítségükkel megválaszolhatók olyan kérdések (a teljesség igénye nélkül) mint: Mi lesz a hőmérséklet emelkedésének, a nyári csapadékmennyiség csökkenésének és a légköri CO₂ koncentráció emelkedésének eredő hatása az egyes haszonnövények terméshozamára? Hol vannak az országon belül azok a területek, ahol megtérülő befektetés lehet az öntözéses gazdálkodás fejlesztése? Milyen földhasználati mintázat esetén éri el a maximumát a mezőgazdaság jövedelmezősége? IM-ek felhasználásával gyorsan és hatékonyan tesztelhetők a fenntartható fejlődés biztosítását célzó stratégia javaslatok ('Mi lenne ha...?' típusú virtuális kísérletek), amelyek valós körülmények között történő tesztelése vagy eleve nem, vagy csak igen hosszú távon, esetleg csak aránytalanul nagy összegek befektetésével lenne lehetséges.

Természetesen az IM eredményeiben csak akkor bízhatunk, ha minőségi adatok segítségével a lehető legtöbb szempont szerint ellenőriztük és igazoltuk, hogy a modellszámítások megfelelő pontossággal írják le a valóságot. Más szavakkal, egy modell csak annyira lehet megbízható, amennyire a bemenő adatai megbízhatók. Ezért a projektben a tervek szerint egy világszínvonalú kísérletes platform biztosítja a szükséges adatokat, amelynek révén az alkalmazott modell működése beállítható és ellenőrizhető, illetve amelynek révén szántóföldi körülmények között már a jelenben elő tudjuk állítani azokat a meteorológiai és talaj állapotokat, amelyek a megváltozó éghajlat miatt várhatóan csak 30-80 év távlatában fognak bekövetkezni.

Bár az Integrált Modellrendszerek egyes vonatkozásai már jól kidolgozottak, jelenleg csak néhány, esettanulmányba ágyazott, konkrét problémára szabott rendszer működik világszerte, amelyek számos fejlesztésre szoruló komponenssel rendelkeznek (Ewert et al., 2015; 2.1. ábra). A főbb problémák: 1) kevés növényfajt képesek modellezni; 2) kevés agrotechnikai beavatkozás hatását képesek kezelni; 3) alulbecsülik, vagy nem veszik figyelembe a szélsőséges környezeti körülmények (aszály, belvíz, stb.) hatását; 4) a termés minőségére nem szolgáltatnak adatot.



2.1. ábra. Az Intergrált Modellrendszerek igényei és rendelkezésre álló szimulációs modellek képességeinek viszonya.

A klímaváltozás és a folyamatosan változó közgazdasági helyzet komoly kihívás elé állítja a magyar agrárszektor. *A fenntartható fejlődés biztosítása érdekében jelen projekt az agrárszektorhoz kapcsolódó tudományterületek szakértőinek összefogását hivatott megvalósítani.* Munkatársaink közreműködésével olyan hazai fejlesztésű Integrált Modellrendszer (tervezett neve: *AgroMo*) megalkotása a cél, amely a lehető legtöbb szempontból túlmutat a tudományterület jelenlegi határain, és konkrét klímaadaptációs forogatókönyveket szolgáltat az agrárszektor résztvevői számára: a gazdától a döntéshozóig.

A projekt megvalósításának főbb lépései:

1. Multidiszciplináris kutatóműhely kialakítása, amely a következő tudományterületek hazai kutatócsoportok formájában már működő elméleti és gyakorlati (kísérletezős) szakértőit foglalja magába: klimatológia, növényélettan, növénytermesztés, mikrobiológia, ökológia, agrometeorológia, biogeokémia, levegőkémia, talajtan, térinformatika, távérzékelés, és közgazdaságtan.

2. Holisztikus rendszerértelmezési szemléleten alapuló agro–pedo–klimatológiai kísérleti platform létrehozása Martonvásáron, amely ötvözi a nagy múltú tartamkísérletek hagyományait, illetve a klímakamrás stresszkutatások tapasztalatait a legmodernebb mérési és infokommunikációs technológiák által kínált lehetőségekkel. A platform segítségével minden jelenkori és jövőbeli éghajlati helyzet (beleértve a megemelkedett légköri CO₂ koncentrációt is) és talajállapot előállítható szántóföldi körülmények között. Számos komplex, terepi megfigyelőrendszer és laboratóriumi eszköz, illetve módszer segítségével folyamatosan nyomon követjük a talajban, a növényben illetve a légkör felszínközeli rétegében lezajló energia és anyag átalakulási és áramlási folyamatokat (részletesen lásd a 4. fejezetet). A platform összefogja a hasonló célú, már működő megfigyelő állomásokat is: dupla eddy-kovariancia torony (Hegyhátsál); legelő fölött működő eddy-kovariancia mérések (Bugac); szántóföldi környezetben működő eddy-kovariancia mérés (Kartal).

3. Korszerű éghajlati projekciók készítése, amelyek segítségével megbízhatóbb képet alkothatunk a mezőgazdasági termelés jövőbeli alakulására vonatkozóan. Az ELTE illetve az Országos Meteorológiai Szolgálat szuperszámítógépei segítségével az RCP4,5 és RCP8,5 klímaváltozási forogatókönyvek alapján két eltérő regionális klímamodell felhasználásával kb. 10 km-es felbontású, napi léptékű, hiba-korrigált klimatikus adatbázist készítünk az 2021-2100 időszakra.

4. Korszerű, egyesített biogeokémiai és crop modell létrehozása és továbbfejlesztése. Az AgroMo rendszer központi eleme a hazai fejlesztésű BBGC-MAg légkör–talaj–növény rendszermodell lesz, melynek fejlesztését a Biome-BGCMuSo (Hidy et al., 2012; Hidy et al., 2016) és a 4M (Fodor et al., 2014) modellek integrációjával és új modulok hozzáadásával valósítjuk meg. A hibrid modell minden növénytípus (egynyári, évelő, fásszárú, C3-as és C4-es stb.) szimulációjára képes lesz, amely a mezőgazdasági termelésben előfordul.

5. Rugalmasan adaptálható (moduláris, nyílt forráskódú) integrált modellrendszer (AgroMo) kialakítása, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben: parcella, farm, regionális és nemzetgazdasági szinten is. A kísérleti rendszer segítségével gyűjtött adatok alapján paraméterezzük, kalibráljuk és validáljuk a BBGC-MAg modellt, és mint számítási modult (back-end modul) beágyazzuk egy olyan keretrendszerbe (front-end), amelynek négy további fő komponense van: 1) GIS modul, amely térben explicit alapadatokat (pl. talajra, földhasználatra) biztosít a számítási

modul számára és a modelleredményeket térben explicit módon (pl. térkép) teszi elérhetővé; 2) többretegű grafikus felhasználói felület (GUI), amely a felhasználás módja (tesztelés, oktatás, kutatás, szaktanácsadás, stb.) szerint biztosít hozzáférést a modell paramétereire és tesz elérhetővé bizonyos funkciókat azért, hogy a rendszer maximálisan „felhasználóbarát” legyen; 3) kommunikációs modul, amely a felhasználó által megfogalmazott kérdéseket lefordítja a modell számára értelmezhető utasításokra, illetve a modell eredményeket közérthető formában jeleníti meg; 4) adatbázis modul, amely a már meglévő (DOSoReMI.hu – talaj, FORESEE – klimatikus, FADN, KSH, stb.) és a projekt során keletkező adatokat tartalmazza.

6. Stratégiák kidolgozása a mezőgazdasági termelékenység fenntartható növelésére és a mezőgazdasági eredetű környezeti károk enyhítésére a felhalmozott adatok és a kiépített modellrendszer felhasználásával. Olyan klímaadaptációs forgatókönyveket dolgozunk ki az agrárszektor szereplői számára, amelyek segítségével a gazdák és a jogszabályalkotók is hatékonyabban készülhetnek fel a klímaváltozás okozta negatív hatások csökkentésére.

Az alábbi fejezetekben részletesen bemutatjuk az AgroMo központi elemét, azaz a Biome-BGCMuSo modellt (ebből fejlesztjük ki a BBGC-MAg modellt), majd részletesen bemutatjuk a kísérletes platform tervezett felépítését. Ezt követően az AgroMo rendszerrel kapcsolatos terveket mutatjuk be, és az azt kiszolgáló adatbázisokat illetve informatikai rendszereket (klímaadatok, GIS adatok, Biome-BGC Projects Database and Management System, adatbányászati lehetőségek). A dokumentumot az agrárközgazdasági vonatkozások bemutatásával zárjuk.

3. Biome-BGCMuSo 4.0: az alapmodell bemutatása, szerepe az AgroMo-ban

3.1. A Biome-BGCMuSo modell története

A szárazföldi növényzet működésének leírására különböző összetettségű és logikájú matematikai modelleket használunk. Ezek a modellek számítógépeken futó szoftverek, amelyek a talaj-növény rendszerben zajló folyamatokat (növekedés, párologtatás, tápanyagfelvétel, a levélzet gázcsereje, a termés növekedése, a talajban zajló mikrobiális folyamatok stb.) matematikai egyenletek formájában számszerűsítik. Bár a modellek mindig csak a valóság egyszerűsített képét tudják leírni, szerepük mégis óriási, és a tudományos kutatás munkafolyamatának ma már nélkülözhetetlenek összetevői. A modellek alkalmazása természetesen túlmutat a növényzet működésének, illetve az agro-ökológia témakörén, mivel a mai civilizált világ nem létezhetne a modellek nélkül. Emiatt bátran kijelenthetjük, hogy a modellek használata a tudományos szemléletmód egyik alappillére, de emellett forradalmasította a gazdasági-társadalmi folyamatokat is, és használatuk óriási értéket képvisel.

Az alábbiakban az AgroMo projektben használt modell történetét mutatjuk be, kitérve a nemzetközi és hazai előzményekre. Nem célunk átfogó képet adni az agro-ökológiai modellezésről (ezzel kapcsolatban lásd Jones et al., 2017 munkáját); itt kizárólag az AgroMo megközelítés bemutatására összpontosítunk, amelynek talán a legfontosabb összetevője (központi eleme) a Biome-BGCMuSo modell.

Már az 1970-es években születtek az ökológiai rendszerek működését leíró modellek, mint például az erdők leírására specializált H₂OTRANS modell (Waring and Running, 1976). A H₂OTRANS még csak vízforgalmat kezelt, amelyből többszöri módosítások során fejlesztették ki a Forest-BGC modellt lombhullató erdők élettani folyamatainak leírására (Running et al. 1987; Running and Coughlan, 1988; Running and Gower 1991). A kutatás előrehaladtával a modellt kiterjesztették többféle vegetációtípus működésének szimulálására is (Running and Hunt, 1993), így született meg a Biome-BGC. A Biome-BGC szimulálja a három legfontosabb anyag, a szén-, a nitrogén- és a víz ökológiai rendszeren belüli áramlását, biogeokémiai ciklusát. A modell szerkezete tározókból (állapotváltozók) és az azokat összekötő fluxusokból (áramlásokból) áll. Az állapotváltozókat és az áramlásokat a modell – a meteorológiai és ökofiziológiai bemeneti adatok alapján – napi léptékben számolja.

A Biome-BGC kis térskálájú modell. A modell szerkezetének fontos jellemzője, hogy a vizsgált terület horizontális mérete nem megszabott, az egyetlen feltétel, hogy a szimulált ökológiai rendszer homogén legyen. A modell csak vertikális irányban kezel anyagáramokat, így a számítások gyakorlatilag egydimenziósak (Churkina et al. 2003).

A Biome-BGC modellnek két futási fázisa van. Az ún. spinup, avagy “felpörgetési” (vagy egyensúlyi, más szóval ön-inicializációs) módban hosszútávú meteorológiai adatsorok felhasználásával a modell szimulálja az ökológiai rendszer fejlődését az egyensúlyi állapot elérésig. A spinup futtatás által generált, a vizsgált életközösségre vonatkozó kezdeti nitrogén- és széntározókat a második, normál futási fázis használja fel az ökológiai rendszer működésének napi léptékű modellezéséhez. A spinup egy opcionális futtatási fázis, azaz ha megfelelő mennyiségű információval rendelkezünk a szimulálni kívánt terület talajának szén- és nitrogéntartalmáról, nem szükséges spinup futtatást használnunk.

A Biome-BGC modell nagy előnye, hogy jól dokumentált, illetve más ökológiai modellekkel szemben a szénkörforgalom modellezésére specializáltak, így arra nagy megbízhatósággal használható. Ennek köszönhetően széles körben használták és használják a mai napig különböző ökológia vizsgálatokhoz (Vitousek et al. 1988; Korol et al. 1996;

Kimball et al. 1997; Thornton et al. 2002; Churkina et al. 2003; Bond-Lamberty et al. 2005; Vetter et al. 2005; Schmid et al. 2006; Barcza et al., 2011).

Hidy Dóra és Barcza Zoltán 2005-ben adaptálta és kezdte el alkalmazni a Biome-BGC akkoriban legfrissebbnek számító, 4.1.1-es verzióját egy magyarországi fűállomány szénforgalmának vizsgálatára (Hegyhátsál, lásd alább; Barcza et al., 2003). Az első kutatási eredményeikkel Hidy Dóra 1. helyezést ért el az Országos Tudományos Diákköri Konferencián 2006-ban. Ugyanebben az évben, Barcza Zoltán témavezetésével a diplomamunkáját is a témában írta *A Biome-BGC modell alkalmazása fűállomány szénháztartásának szimulálására* címmel. 2006 és 2009 között Hidy Dóra doktoranduszként folytatta a munkáját a Szent István Egyetemen, ahol a témája az ökológiai modellezés volt. Ezekben az években a szimulációt már több mérési helyre is kiterjesztették (Bugac, Szurdokpüspöki – mindkettő gyepes mérőhely). A szimulációs eredmények és a mért adatok összevetésekor szisztematikus modellhibákra derült fény. Ezeket az emberi tevékenység szimulációjának hiánya, a vegetációs periódus (fenológia) becslésének pontatlansága, a talajnedvesség-tartalom túlbecslése egy-egy nagy csapadék után, illetve a talajkiszáradás növényi működésre gyakorolt hatásának hiánya okozta. A tapasztalt hibákat a modell forráskódjának továbbfejlesztésével korrigálták: módosították a Biome-BGC fenológiai, illetve a talaj vízforgalmát szimuláló modulját, melynek eredményeképpen kiküszöbölték a fent említett hibákat. Ezt követően a módosított modellt alkalmassá tették kaszált és legeltetett gyepek szén- és vízháztartásának szimulációjára, és előkészítették a mezőgazdasági területek művelési módjainak szimulációját (aratás, vetés, szántás, műtrágyázás modellbe építése). A kaszálás és a legeltetés szimulációját alkalmuk nyílt közvetlen mérési adatokkal (eddy-kovariancia mérésekkel) validálni, ugyanis mind Hegyhátsálon, mind Bugacon zajlanak eddy-kovariancia mérések, és a hegyhátsáli gyepet évente kétszer kaszálják, a bugaci gyepen pedig extenzív legeltetés folyik. Ezen kutatási eredményekre alapozva Hidy Dóra 2010-ben védte meg doktori disszertációját, melynek címe *Agroökológiai rendszerek szén- és vízháztartásának modellezése* volt (témavezetők: Barcza Zoltán és Nagy Zoltán).

2011-ben jelent meg a Springer Kiadó gondozásában, Haszpra László szerkesztésével az *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* című angol nyelvű könyv, melyben többek között országos szinten számoltak szénmérleget a Biome-BGC továbbfejlesztett változata segítségével (Barcza et al. 2011; Hidy et al. 2011; Somogyi et al. 2011).

2012 és 2016 között Hidy Dóra az MTA Növényökológiai Kutatócsoportjának kötelékében tovább folytatta modellfejlesztő munkáját. Ennek keretében részt vettek több nemzetközi pályázatban. Az Európai Unió Animal Change programjában Hidy Dóra mint modellezési szakértő vett részt, feladata a bugaci legelő üvegházgáz-mérlegének számítása és modellezése volt. Az EU 7-es BioVeL projekt keretében olyan interaktív webes alkalmazással kiegészített modellkörnyezetet hoztak létre, amely a kutatói közösség számára fontos és hasznos eszközt jelenthet a környezeti változások vizsgálatában (jelen dokumentum későbbi szakaszában erről részletesen is szó esik). A MACSUR projekt keretében részt vettek egy gyepekre optimalizált modellek működését összehasonlító projektben, ahol a továbbfejlesztett Biome-BGC modell jól szerepelt.

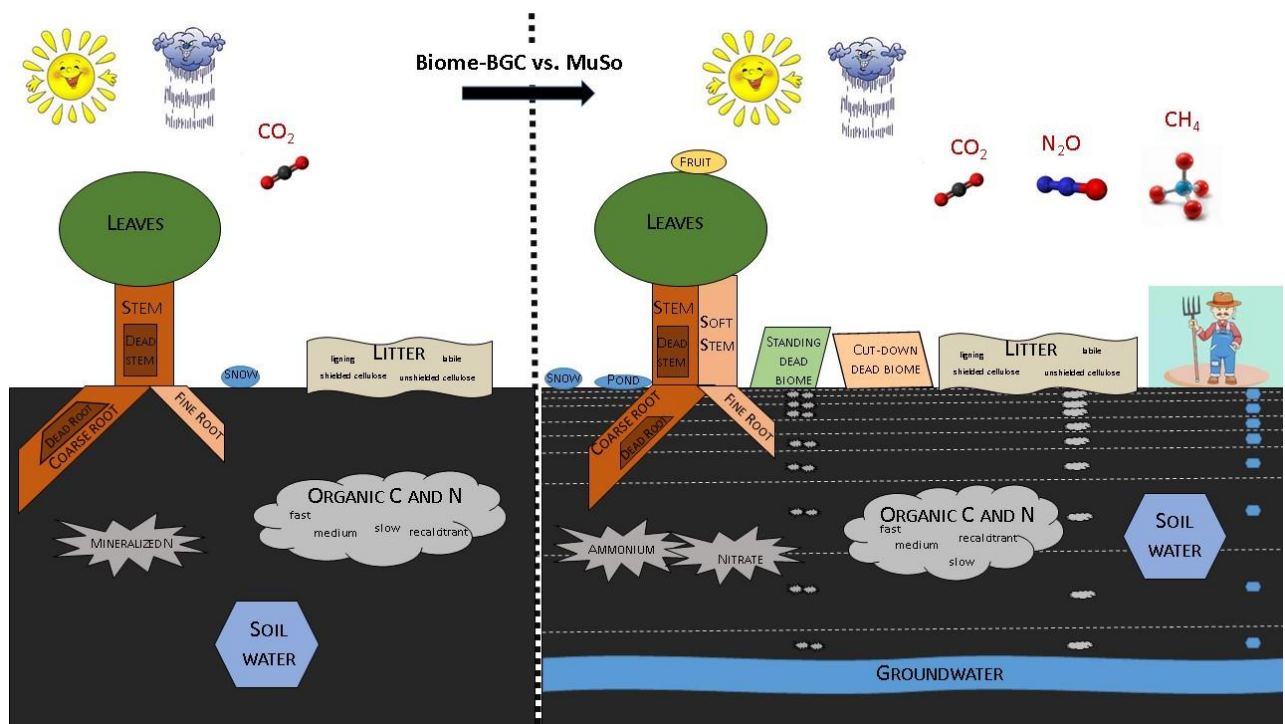
2013-ban Hidy Dóra elnyert egy MTA Posztdoktori Pályázatot, melynek kitűzött célja a Biome-BGC modell továbbfejlesztése, kalibrációja, egyéb ökológiai modellekkel való összevetése volt. A Posztdoktori Pályázat eredményeképpen 2014-ben megszületett a már újnak tekinthető modellverzió, a Biome-BGCMuSo, mellyel a szén-dioxid forgalom mellett a másik két legfontosabb üvegházhatású gáz (a dinitrogén-oxid és a metán) forgalmának modellezése, a talajban lejátszó dekompozíciós folyamatok pontosabb leírása, illetve a különböző művelési módok hatásának vizsgálata is megvalósítható lett. Így az ökológiai rendszerek éghajlat-módosító visszacsatolási mechanizmusai, illetve ezen keresztül az ember

földhasználathoz kapcsolódó szokásai is sok szempontra kiterjedően modellezhetővé váltak. Ebben az időben kezdődött az együttműködés az MTA ATK-val, aminek apropója az volt, hogy Barcza Zoltán azóta végzett doktorandusza (Dobor Laura) párhuzamosan kezdte használni a Biome-BGCMuSo és a Fodor Nándor által fejlesztett 4M mezőgazdasági modellt. Az együttműködés keretében Fodor Nándor a modellfejlesztő csapat szerves része lett. Ekkor történtek az első lépések abban az irányba, amelyet az AgroMo projektben teljesedik ki, és a Fodor Nándor által fejlesztett 4M modell egyes moduljainak az implementálását jelenti a Biome-BGCMuSo (a későbbi BBGC-MAG) modellben.

A fejlesztés eredményeit rangos tudományos folyóiratokban publikálták, legutóbb a Geoscientific Model Development open access folyóiratban (Hidy et al. 2016). A modellfejlesztést illetően döntő lépés volt, hogy tudományos eredményeiket közzétették a kutatói közösség számára: készült egy minden tekintetben teljesnek mondható, angol nyelvű felhasználói kézikönyv (angolul User's Guide; http://nimbus.elte.hu/bbgc/files/Manual_BBGC_MuSo_v4.1.pdf). Ezen kívül a modell teljes forráskódját bárki számára elérhetővé tették a saját készítésű és üzemeltetésű honlapon (<http://nimbus.elte.hu/bbgc>). A honlap jelenleg az ELTE Meteorológiai Tanszékének webszerverén üzemel.

A tervek szerint a fent bemutatott IM rendszernek a központi eleme a BBGCMag modell lesz, mely a Biome-BGCMuSo modell továbbfejlesztésével és a 4M modell további fontosabb, haszonnövényekre vonatkozó moduljainak a beolvasztásával jön létre. A munka során Hidy Dóra a központi modellfejlesztő szerepét tölti be, aki centralizáltan fejleszti a modellt C++ programozási nyelven.

Jelen dokumentáció készítésekor a legutolsó publikált modellverzió a Biome-BGCMuSo 4.1 (<http://nimbus.elte.hu/bbgc/download.html>), de már a Biome-BGCMuSo v5.0 is fejlesztés alatt van (3.1. ábra).



3.1. ábra. A Biome-BGC v4.1.1 és a Biome-BGCMuSo v5.0 összehasonlítása. Bal oldalon az eredeti modell sematikus felépítése látható, míg jobb oldalon a Biome-BGCMuSo folyamatait ábrázoltuk.

3.2. A legfontosabb modellfejlesztések

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk azokat a főbb komponenseket, amelyek implementálása révén a Biome-BGCMuSo lényegében egy teljesen új, hazai fejlesztésű modellé fejlődött az évek során.

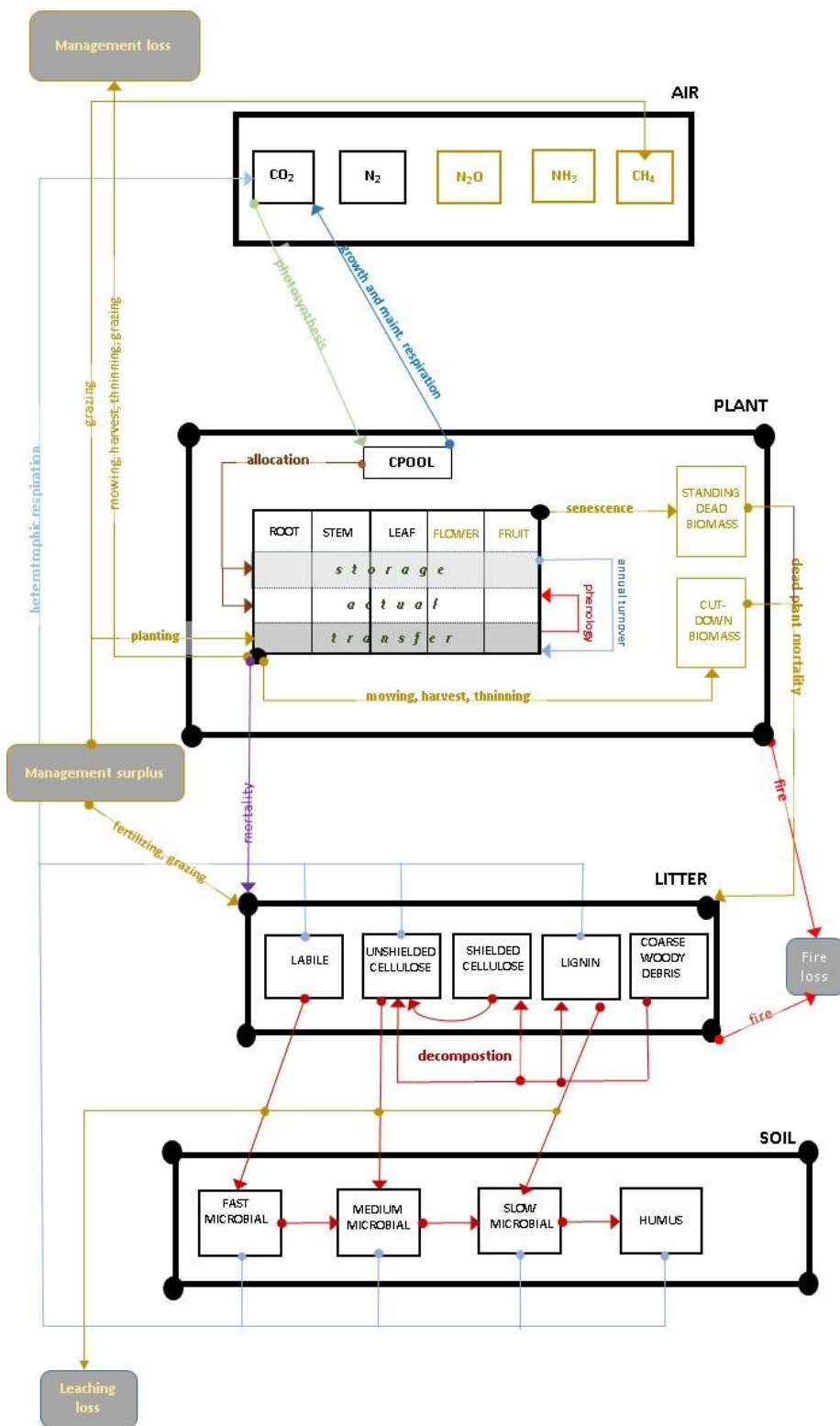
- Az egyrétegű talajmodul többretegűvé alakítása (amely magában foglalta a talaj termodinamikájának, hidrológiájának, szén- és nitrogénforgalmának fejlesztését).
- A növényi irreverzibilis (visszafordíthatatlan) hervadás (növényi szövetek pusztulása) szimulációjának továbbfejlesztése.
- A különböző művelési módok szimulációjának beépítése.
- A vízgőz és a szén-dioxid mellett a további legfontosabb üvegházhatású gázok kibocsátásának szimulációjának beépítése (metán és a dinitrogén-oxid).
- A növényi modul kiegészítése újabb növényi részekkel (lágyszár, termés, lábon álló elhalt biomassza, levágott biomassza).
- A respiráció akklimációjának szimulációja.
- A növényi sztómaellenállás szimulációjának továbbfejlesztése.

A 3.2.-3.4. ábrán mutatjuk be a Biome-BGCMuSo modell szén- (3.2. ábra), nitrogén- (3.3. ábra) és vízforgalmának (3.4. ábra) folyamatábráját. Barnás színnel jelöltük azokat a folyamatokat, illetve tározókat, melyek csak a Biome-BGCMuSo-ban szerepelnek.

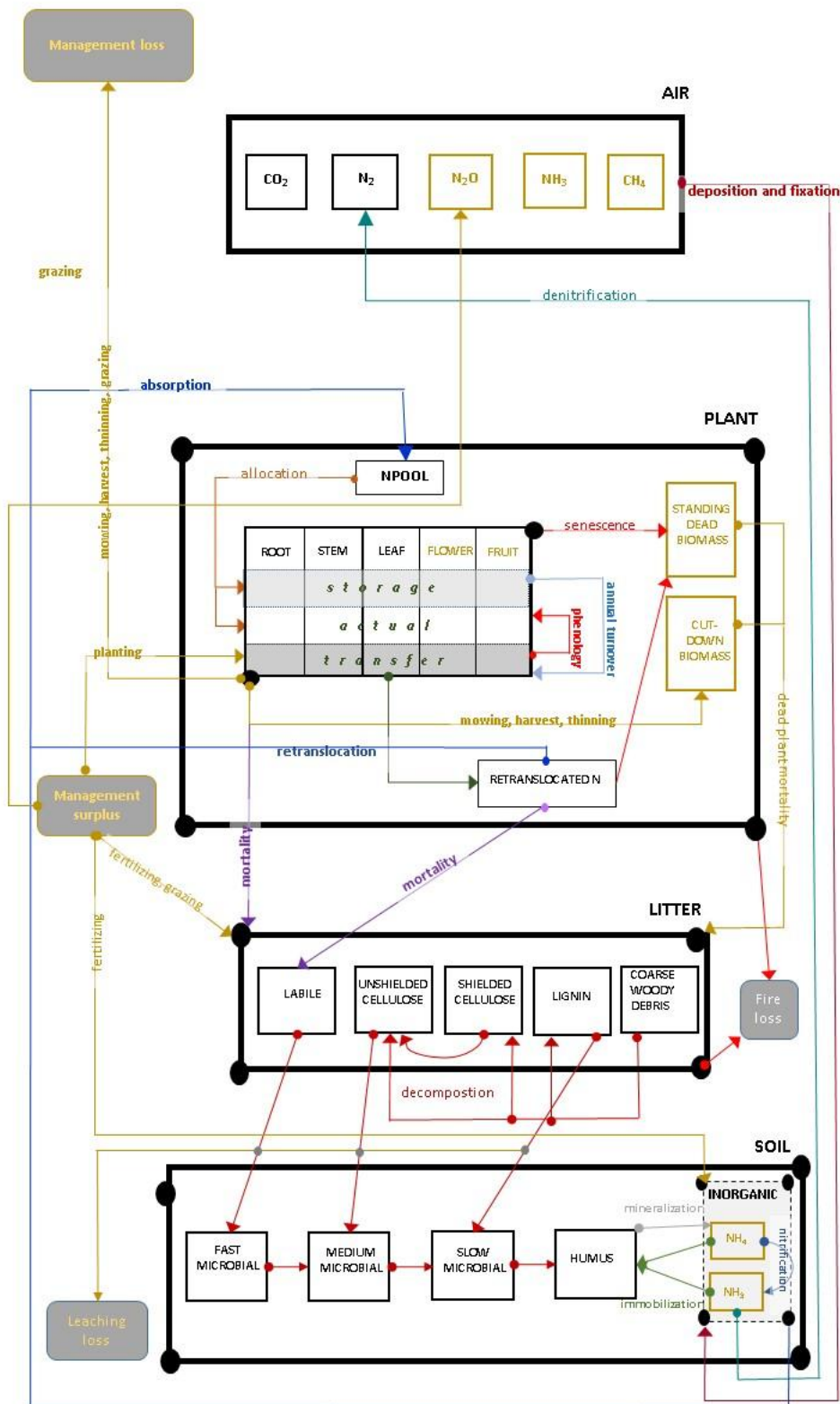
A növény fejlődését és növekedését jellemző folyamatokon túl a tervezett hibrid modell a talajban, illetve a talaj-légkör határán lezajló anyag- és energia-átalakulási, valamint anyagáramokat (víz, szén, nitrogén, foszfor, illetve a fontosabb üvegházhatású gázok) is szimulálja majd, továbbra is napi léptékben. A modellfejlesztés során kiemelten foglalkozunk azokkal a témákkal, amelyek a szakterület jelen állása szerint (Ewert et al., 2015) gyenge pontjai a növénytermesztési modelleknek. Olyan modulokat fejlesztünk, amelyek segítségével a BBGC-MAG képes lesz kezelni az alábbi gyakorlati problémákat:

- Szélsőséges időjárási események hatása a produkcóra, különös tekintettel a virágzáskori stressz hatására
- Fenofázistól függő allokáció
- Fotoszintézis akklimációja a változó hőmérsékleti feltételekhez
- Gyökernövekedés környezeti feltételektől való függése
- A talaj szervesanyag tartalom változásának nyomon követése
- Talajművelés (köztük az értékmegőrző talajművelés) hatása a termésre, illetve üvegházhatású gázok teljes mérlegére

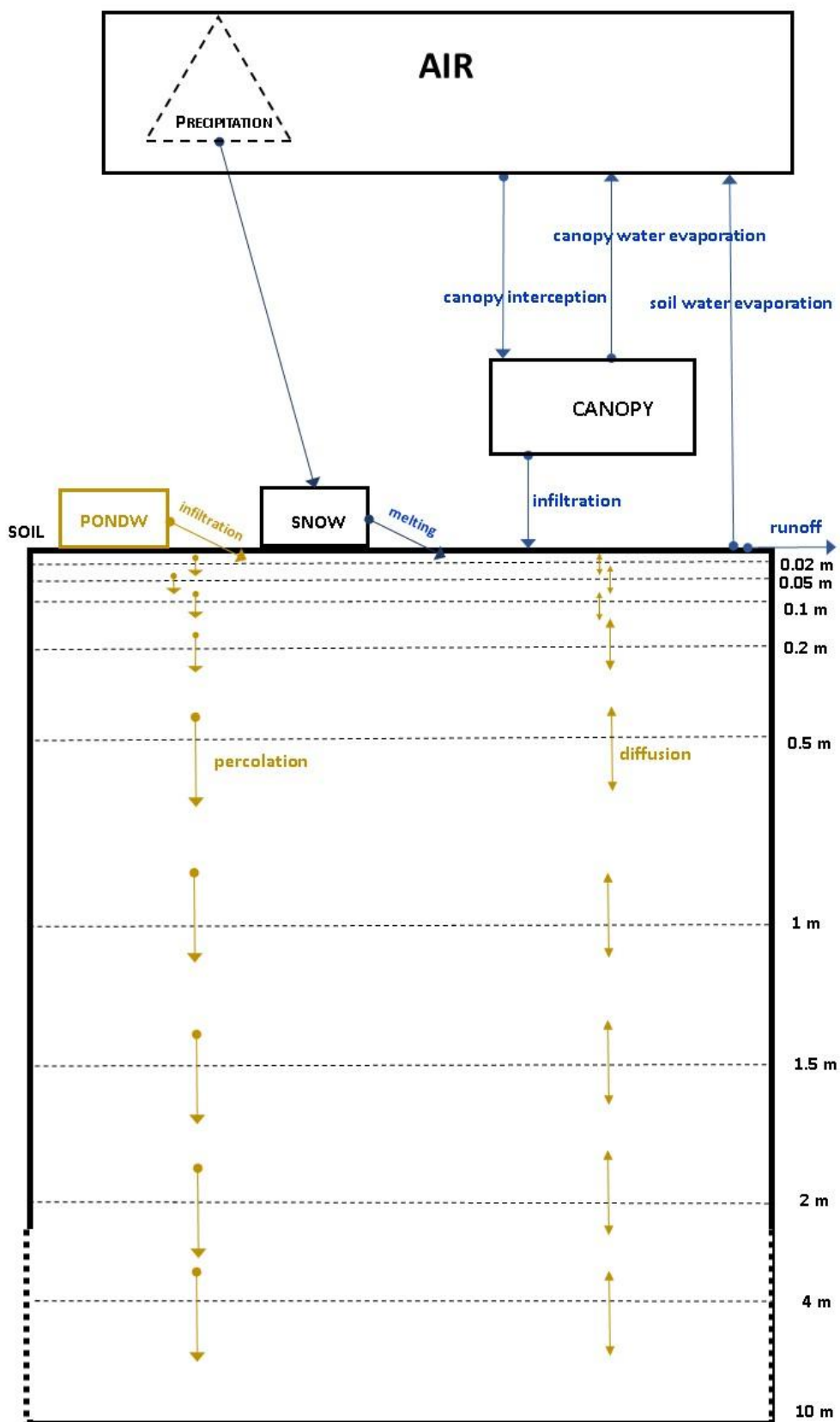
Külön megemlítenénk két kiemelkedő fontosságú fejlesztést. A BBGC-MAG egyesített modell képes lesz számítani a talaj-növény rendszer irányából a légkör irányába történő anyagáram (visszacsatolás) intenzitását, így segítségével megválaszolható az a kiemelten fontos kérdés, hogy a vizsgált agroökoszisztéma nettó szénforrás (CO₂ és CH₄) vagy szénnyelő lesz a jövőben. A szabadföldi és a fitotroni stresszkísérletekből származó termésminták minőségi (pl. allergén fehérje tartalom; lásd később) jellemzői és a kísérletek során rögzített környezeti stresszindikátorok között számszerű összefüggést keresve új termésmínőség modellező komponenst fejlesztünk, így a BBGC-MAG képes lesz a termésmínőség esetleges jövőbeli változásának a becslésére is.



3.2. ábra. A modell szénmérlegre vonatkozó folyamatábrája.



3.3. ábra. A modell nitrogénmérlegre vonatkozó folyamatábrája.



3.4. ábra. A modell vízmérlegre vonatkozó folyamatábrája.

4. Az AgroMo mérőrendszer bemutatása

A kísérleti platform lehetőséget kínál az agro-ökoszisztéma fizikai, kémiai és biológiai folyamatainak rendszerszemléletű vizsgálatára jelenkori, illetve tudatosan manipulált környezeti feltételek (pl. stressz-helyzetek, emelt légköri szén-dioxid szint) mellett. Egyedi lehetőséget nyújt a légkör, a talaj és a növényzet kölcsönhatás-rendszerének több szerveződési szinten átívelő mechanisztikus és dinamikus modellezéséhez szükséges paraméterek és változók mérésekkel történő meghatározására, illetve monitorozására. A létrejövő egyedülállóan komplex adatbázis lehetővé teszi egy Integrált Modellrendszer fejlesztését és tesztelését.

Az AgroMo mérőrendszer több komponensből épül fel, és a mikroszkopikus skálájú vizsgálatoktól (pl. gyökér–gomba kapcsolatrendszer, levél szintű fotoszintézis) a teljes növény (elsősorban kukorica és búza), illetve mezőgazdasági parcellát vizsgáló méréseken keresztül (eddy-kovariancia mérések, szabadföldi szén-dioxid dúsítás) egészen az országos szintű vizsgálatokig terjed (egyéb hazai mérőhelyek, műholdas távérzékelésen alapuló vizsgálatok).

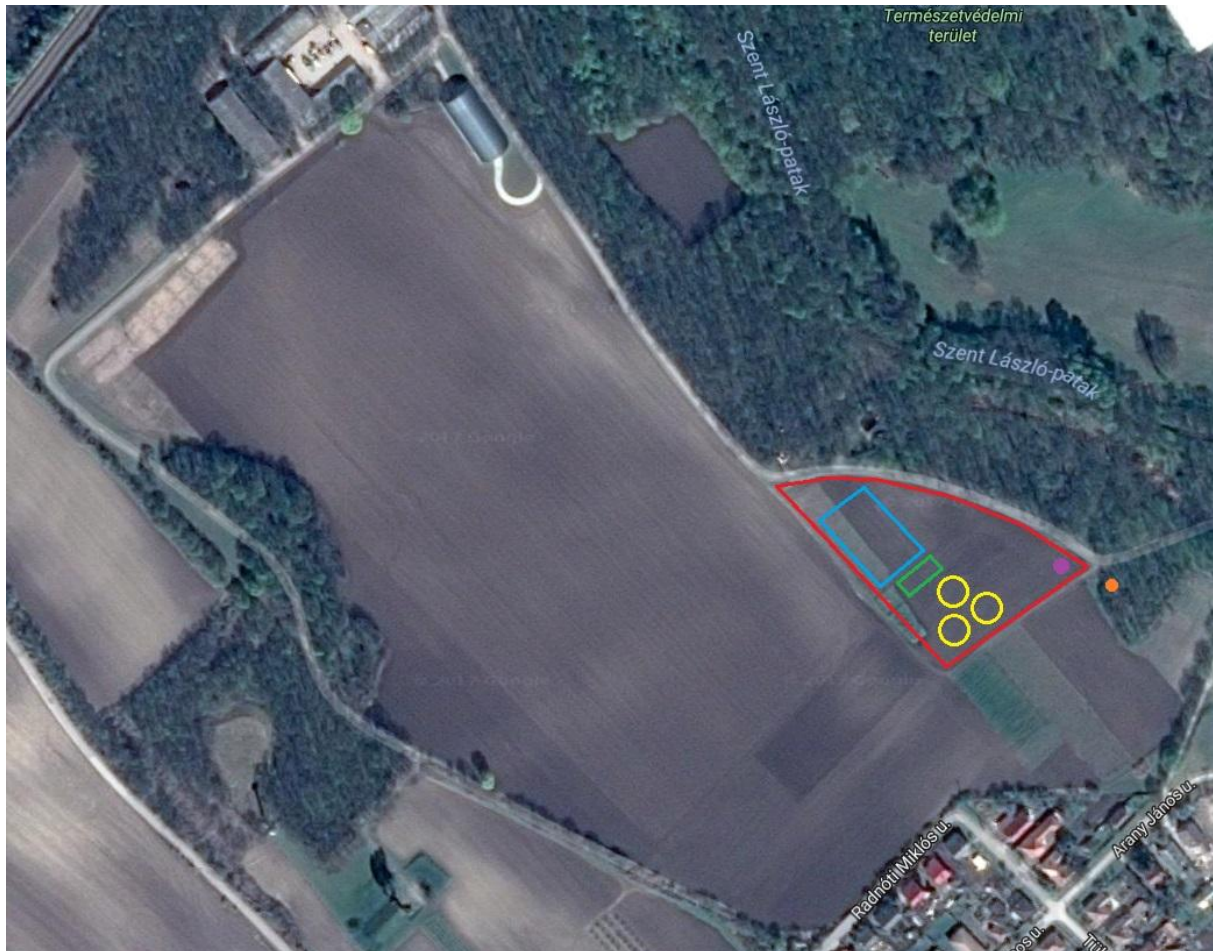
Szeretnénk hangsúlyozni, hogy bár a mérések túlnyomó része Martonvásáron valósul meg, a projekt nagyban épít más olyan mérésekre is, amelyek Magyarország különböző helyszínein zajlanak (Hegyhátsál, Bugac, Kartal, Csólyospálos, Fülöpháza, Budapest). Erre amiatt van szükség, mert a BBGC-MAg modell számára, illetve az AgroMo rendszer számára bizonyos hazai mérések pótolhatatlan adatokat szolgáltatnak, amelyek vagy nem helyspecifikusak (regionálisan reprezentatívak), vagy pontosan a térbeli változékonyságot hivatottak reprezentálni (az eltérő talajviszonyokat, művelési módokat illetve klimatikus körülményeket). Ezért, bár a beszerzés alatt álló műszeregyüttes és kísérleti platform Martonvásáron kerül felállításra, *stratégiai célunk volt, hogy a kutatócsoportban dolgozó kollégák révén hozzáférjünk a sok éve zajló egyéb mérési adatokhoz is* (beleértve ebbe a projekt időtartama alatt a résztvevők által gyűjtött mérési adatokat is). Ezen adatok nagyban hozzájárulnak a BBGC-MAg modell kalibrálásához, validálásához, paraméterezéséhez, illetve a modell input adatigényének a kielégítéséhez. Az alábbiakban bemutatásra kerülő mérési programok esetén bemutatjuk, hogy hol zajlottak már korábban hasonló mérések (ha van ilyen), és bemutatjuk az adatok jellegét a korábbi mérési programok alapján.

A mérőrendszer két alapvető komponensből épül fel. Az első komponens a keretrendszer, vagyis a *kísérleti környezetek* (angolul ‘experimental facility’-k) együttese, amelyek lehetőséget biztosítanak a növényeket és a talajt érintő megfigyelések részére. A második komponens a keretrendszeren belül zajló tevékenységet jelenti. Ennek részeként a kísérleti környezeteken belül zajlanak a konkrét mérések és megfigyelések a beszerzésre kerülő *eszközök és műszeregyüttesek* segítségével. Az alábbiakban először a kísérleti környezeteket mutatjuk be, majd a tervezett mérések illetve vizsgálatok leírása következik. A mérések esetén bemutatjuk, hogy mely kísérleti környezetben, milyen protokoll alapján fog történni a vizsgálat.

4.1. Kísérleti környezetek

4.1.1. Szabadföldi szén-dioxid dúsítás (FACE)

A jelenlegi tervek szerint 2018 tavaszán fog indulni egy fontos, hazánkban előzmény nélküli klímamanipulációs kísérlet Martonvásáron, az MTA ATK területén elhelyezkedő “Tükrös” nevű szántóföldön (4.1. ábra).



4.1. ábra. A Tükrös, és az ott elhelyezendő FACE kísérlet helyszíne (sárga körök). A kontrollgyűrűk (szintén 3 db) elhelyezkedése nincs feltüntetve.

A leendő martonvásári szabadföldi szén-dioxid dúsítás (angolul “Free-Air CO₂ Enrichment”, rövidítve FACE) kísérlet az egyre növekvő légköri szén-dioxid szint hatását vizsgálja majd mezőgazdasági haszonnövények (elsősorban kukorica) termésmennyiségére, növekedésére, vízgazdálkodására, termelési költségére és szénmérlegére. A FACE kísérlet lényege, hogy egy kisebb területen (15-17 m átmérőjű, közel kör alakú gyűrűn belül) egy szén-dioxid tartály felhasználásával, gázkibocsátó szerelvények segítségével, szabadföldi körülmények között megemeljük a légköri szén-dioxid koncentrációját az állományon belül (4.2. ábra). Az emelt szint állandóan tartását komplex vezérlőegységek biztosítják. A jelenlegi CO₂ szint (kb. 400 ppm, azaz 400 milliomod térfogatrészt) helyett a tervek szerint kb. 600 ppm-re növeljük (dúsítjuk) a CO₂ szintet a szántóföldön. Jelenlegi tudásunk, illetve a külföldön zajló hasonló kísérletek tapasztalataiból tudjuk, hogy a növények reagálnak az emelt CO₂ szintre, és megváltozik a termelésük, a termésmennyiség, adott esetben a termés minősége, és a

vízgazdálkodásuk is. A változás mértékét a kontrollterületeken (azaz jelenlegi CO₂ szinten) termesztett növények segítségével lehet számszerűsíteni, párhuzamos mérések segítségével. Martonvásáron 3 FACE gyűrű, és 3 kontroll gyűrű lesz telepítve. A 3 ismétlés elegendő adatot szolgáltat a kísérleti eredmények megbízható elemzéséhez.

A FACE kísérlet egyik alapkérdése az, hogy az emelt CO₂ szint statisztikai értelemben szignifikánsan hat-e a növényi folyamatokra? Ezen felül a FACE területén végzett mérések eredményei olyan adatot szolgáltatnak a modell részére (a növény reakcióját emelt CO₂ esetén), ami semmilyen más módon nem állítható elő. A modellt úgy fogjuk beállítani, hogy a megfigyeléseket minél pontosabban visszaadja. Ez biztosítja, hogy a jövőre vonatkozó vizsgálatok/projekciók reálisak legyenek.



4.2. ábra. Szántóföldi FACE kísérlet külföldön. Ehhez hasonló rendszer kerül kiépítésre Martonvásáron. (Fotó: IBIMET).

4.1.2. Liziméteres kísérleti környezet

A tervezett liziméter állomás szintén a Tükrös területén lesz telepítve. Az állomás 12 darab, egyenként 1 m² területű és 2,0 m magasságú talajoszlopot tartalmaz (4.3. ábra). A talajoszlopok tömegét mérleg méri, melynek segítségével akár 1 mm víz elpárolgása is regisztrálható. Az oszlopok fűthetők, több mélységben nedvességmérőt és hőmérőt tartalmaznak, illetve az aljukon kifolyó drénvíz mennyisége és vegyi összetétele is rögzítésre kerül. Az oszlopokra 2 m magas, felülről zárható plexi henger helyezhető, amely a csapadék kitakarására is alkalmas, ill. a beépített oxigén-koncentrációt mérő érzékelők segítségével a fotoszintézis intenzitásának mérésére is alkalmas. Segítségével egyedülálló pontossággal vizsgálhatók a talajban lezajló energia- és anyagátalakulási, ill. -áramlási folyamatok, szabályozható peremfeltételek állíthatók be a talaj alsó és felső határán.



4.3. ábra. Liziméteres kísérlet telepítése (Fotó: Meter Group, Germany).

4.1.3. Tartamkísérletek az ATK területén

A martonvásári nagy múltú tartamkísérletekben végzett szabadföldi kutatások a két legfontosabb magyarországi szántóföldi kultúra, a kukorica és az őszi búza termesztés fenntarthatósági kritériumainak elemzését szolgálják (4.4. ábra).



4.4. ábra. Szabadföldi kisparcellás tartamkísérletek az MTA ATK László pusztai kísérleti terén.

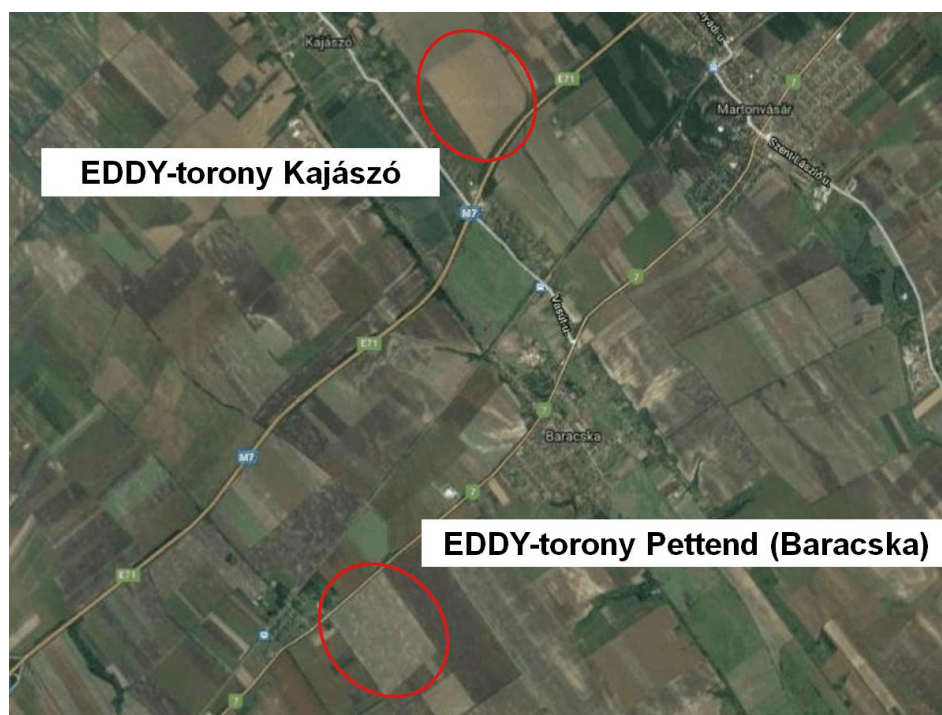
Az 1958-ban elindított 15 egy-, két- és többtenyezős tartamkísérlet a különböző növénytermesztési faktorok időben változó és környezeti feltételektől függő dominanciájának meghatározására ad lehetőséget (4.1. táblázat). Az ezekből származó eredmények elengedhetetlenek az agrártermelés stabilitásának növeléséhez, a fenntarthatósághoz, az egyre kiterjedtebben alkalmazott precíziós műszaki megoldások okszerű használatához (Árendás et al. 2016; Árendás 2017). Az eredmények modellekben történő felhasználása támogatja a jövőbeni környezeti változások predikcióját, valamint az azokhoz történő adaptációk optimalizálását (Micskei et al. 2016). Ezek a hazai agrárium nemzetközi versenyképességének növeléséhez, és a társadalmi élettér minőségének javításához egyaránt hozzájárulnak.

4.1. táblázat. Az MTA ATK Mezőgazdasági Intézet szabadföldi kisparcellás tartamkísérletei

Kísérlet neve	Kezdet	Fő növény	Elrendezés	Kezelés	Ismétlés
2.14. kísérlet	1958	Kukorica-búza dikultúra	Latin négyzet	10	5
2.11. kísérlet	1959	Kukorica-búza dikultúra	Latin tégl	12	4
1.5 kísérlet	1958/1974	Kukorica-búza dikultúra	Kéttényezős véletlen blokk	16	4
1.6 kísérlet	1955/1975	Kukorica-búza dikultúra	Osztott parcellás	24	4
Búza N-műtrágyázási kísérlet	1980/1994	Négyes-forgó (olajretek-búza-kukorica-árpa)	Osztott parcellás	120	4
Kukorica N-műtrágyázási kísérlet	1980/1994	Négyes-forgó (olajretek-búza-kukorica-árpa)	Osztott parcellás	72	4
Nitrogén műtrágyázási kísérlet	1958	Kukorica monokultúra	Osztott parcellás	52	4
N-műtrágyázási és vetésidő kísérlet	1980/1992	Kukorica monokultúra	Kétszeresen osztott parc.	100	4
I. Trágyatartam	1958	Kukorica-búza dikultúra	Latin négyzet	6	6
II. Trágyatartam	1959	Kukorica monokultúra	Latin négyzet	7	7
Kukoricaszáras	1958	Kukorica monokultúra	Latin négyzet	6	6
III. Trágyatartam	1967	Kukorica monokultúra	Véletlen blokk	21	4
Komplex I.	1960	Kukorica monokultúra	Véletlen blokk	7	4
IV. Trágyatartam	1961	Kukorica monokultúra	Kétszeresen osztott parc.	80	4
Vetésforgó	1961	Kukorica és búza vetésforgó	Osztott parcellás	35	4

4.1.4. Nagytáblás szántóföldi kísérleti környezetek Martonvásár közelében

A tervezett szabadföldi ún. eddy-kovariancia alapú mérések létrehozásához nem áll rendelkezésre megfelelő nagyságú szántóföld az MTA ATK területén. Emiatt Martonvásár környezetében kerestünk sík terepen elhelyezkedő, nagyméretű (legalább 1 km x 1 km nagyságú) parcellákat. A lehetőségek felmérése után, illetve terepszemlék alapján két tábla került kiválasztásra, amelyek alkalmasak a mérés befogadására. A szántóföldek elhelyezkedését az 4.5. ábra mutatja.



4.5. ábra. A két kiválasztott nagyparcellás szántóföldi kísérleti környezet Kajászó és Pettend környezetében. A térkép jobb felső sarkában látható Martonvásár.

A kiválasztott szántóföldek magántulajdonban vannak, és a tulajdonos gazda szokásos, vetésforgó alapú, korszerű agrotechnikát használó művelése alatt állnak. Ilyen értelemben a mérések tárgya reprezentatív lesz az ország nagyobb térségére.

4.1.5. Klímakamrás kísérleti környezet (Fitotron)

Az 1972-ben létesült martonvásári fitotron 50 darab Conviron növénynevelő klímakamrájában a külső időjárási viszonyoktól függetlenül szabályozhatók a növények növekedéséhez és fejlődéséhez szükséges főbb környezeti tényezők: a levegő hőmérséklete, páratartalma és CO₂ koncentrációja, a megvilágítás intenzitása és hossza, illetve a talajnedvesség (4.6. ábra). A fitotroni klímakamrák alkalmazásával elemeire bonthatók a klimatikus tényezők hatásai, amelyek a természetben nehezen és csak tartamkísérletekben értelmezhetők. A szabályozott környezet metodikailag láncszemet alkot a komplex növény-környezet kapcsolat egészének feltárása, a résztörvények és ezek újraépítésének megismerési folyamatában.



4.6. ábra. A fitotron kamrák laboratóriuma (balra), valamint a kamrák belseje (jobbra).

A projekt keretén belül a klímakamrás kísérleteket elsősorban arra használjuk majd, hogy adatokat gyűjtsünk az eltérő fejlődési fázisban jelentkező hőség- és vízhiány-stresszek búza allergénfehérje tartalmára gyakorolt hatásáról. Az összegyűjtött adatok alapján olyan termésminőség modult készíthetünk az integrált rendszermodellünk számára, amely egyedülálló a világon.

4.1.6. Kísérleti környezetek Magyarország egyéb helyszínein

Ahogy korábban említettük, a projekt stratégiai célja, hogy összefogja azokat a hazai mérési programokat, amelyek az AgroMo rendszer alapját képező Biome-BGCMuSo részére nélkülözhetetlen adatokat szolgáltatnak. Ennek megfelelően az utolsó kísérleti környezet valójában több, térben szeparált helyszínt jelent.

Az egyik ilyen kísérleti környezet a Dorozsma-Majsai Homokhát meszes homokterülete, Csólyospálos külterületén, ahol vízbeszivárgás és víztaszítás mérések zajlanak. A terület 90% fölötti homok tartalmú, pH tartományát tekintve semleges és enyhén lúgos közötti. A terület mezőgazdasági művelés alatt áll az 1900-as évek eleje óta, ahol különböző szántóföldi kultúrák (burgonya, kukorica, gabona félék és zöldségfélék) mellett legelők, kaszálók és parlag területek is találhatóak, melyek lehetőséget nyújtanak az infiltrációs vizsgálatok kivitelezésére különböző felszínborítottságok alatt. A csólyospálosi

kísérleti terület előnye a jelen projekt számára, hogy a víztaszítás és vízbeszivárgási kísérletek folyamatosan rögzítettek 2012 óta, párhuzamosan a növénytakasulások adatainak a felvételével, így egy konkrét esettanulmányon át követhetjük egy felhagyott terület növénytakasulási és vízgazdálkodási változásait, mely összehangolása még nem megoldott a modellszimulációs gyakorlatokban.

A másik fontos kísérleti környezet Hegyhátsál (Vas megye), ahol 1997 óta működik egy eddy-kovariancia mérés 82 m magasságban, ami egy vegyes mezőgazdasági terület szén- és vízmérlegéről, valamint a terület dinitrogén-oxid (N_2O) emissziójáról ad információt. Ez utóbbi mérés jelenleg az egyetlen olyan N_2O kibocsátás adatsor, amellyel a Biome-BGCMuSo modell nitrogén almodulja kalibrálható vagy validálható.

Ezen kívül Bugacpuszta is kiemelt fontosságú kísérleti környezet, ahol 2002 óta egy eddy-kovariancia mérőrendszer működik egy nagy kiterjedésű, több mint 40 éve legelőként használt gyepterület felett, ahol legeltetéses szarvasmarhatartás zajlik. Ezt a gyepterületet nagy kiterjedése (~2x3 km) kis felbontású (~km-es pixelek) távérzékelési vizsgálatokra is alkalmassá teszi. A bugaci legelőn működő mérőrendszer alapvető fontosságú információt nyújt a Biome-BGCMuSo modell részére a hazai gyepek szén- és vízháztartása vonatkozásában.

2017 ősztől működik a Kartal közelében elhelyezkedő termékeny szántóterületre telepített eddy-kovariancia mérőállomás. A táblán 2017-ben „Farinelli” őszi búzát vetettek. Az állomáson az eddy-kovariancia mérésen túl a szabványos mikro-meteorológiai változók (talajnedvesség tartalom, csapadékmennyiség és intenzitás, sugárzás, léghőmérséklet és nedvességtartalom stb.) mérése is folyik, illetve alapul szolgál táv- és proximális (köztes adat bevonásával készülő) érzékelési vizsgálatoknak is.

A Budapest Aeroszol Kutató és Oktató Platform (BpART, <http://salma.web.elte.hu/BpArt/>, Salma et al., 2016) kísérleti környezet az ELTE Lágymányosi Kampuszában egy külső teraszon helyezkedik el (4.7. ábra). A mérőállomás előnye a jelen projekt számára, hogy párhuzamos, rendszeres kalibrációs és kiegészítő levegőkémiai mérések együttes megvalósítása teszi lehetővé a felhőkondenzációs magyszámláló (CCNc) mérőrendszer folyamatos működtetése részére szigorú klimatizációs és belső tisztasági előírások mellett. A CCNc rendszer egy meglévő differenciális mozgékony analízátorral (DMPS, differential mobility particle sizer, Salma et al., 2011) együtt fog működni. Ennek köszönhetően háttér adatokat mérünk a CCN számával és arányával kapcsolatban, illetve meghatározzuk a FACE gyűrűn belülről gyűjtött levegő minták higroszkopicitási tulajdonságát túltelítettségi körülmények között. A CCNc mérőrendszer meglehetősen bonyolult, ezért megbízható és megfelelő színvonalon történő működtetése több hónap szakmai tapasztalat után várható.

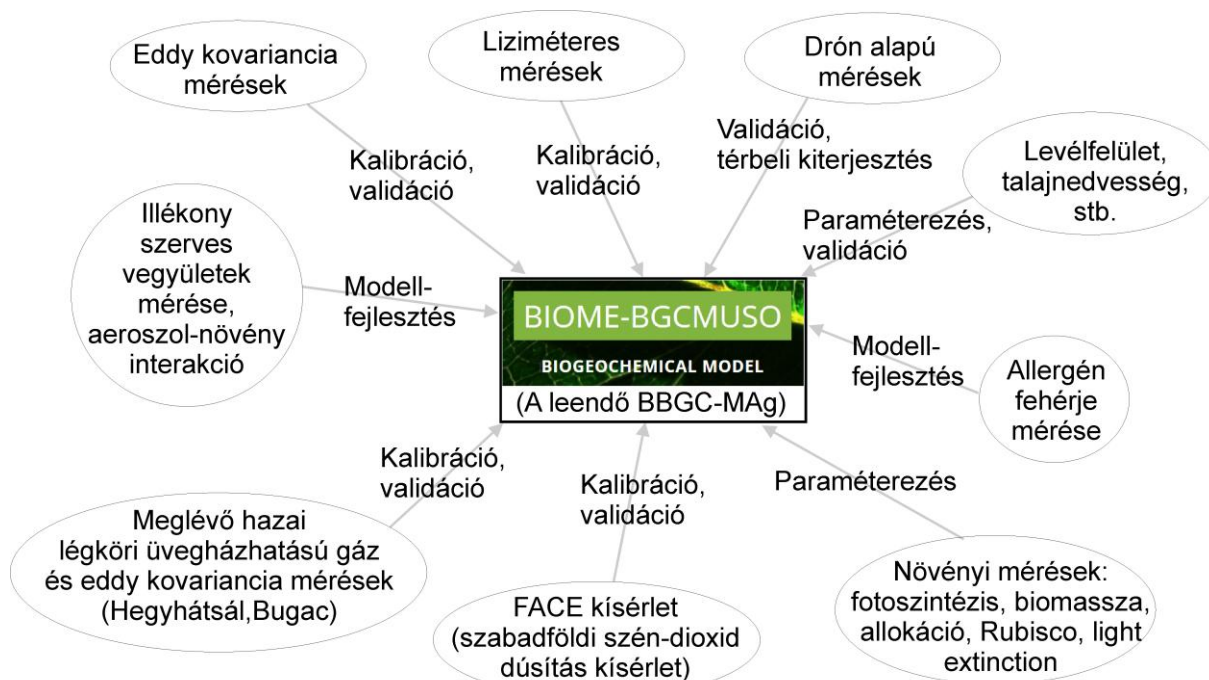


4.7. ábra. A BpART mérőállomás látképe.

4.2. A mérések bemutatása

Az alábbiakban az AgroMo mérőrendszer komponenseit mutatjuk be részletesen. A mérőrendszer igen sokféle kísérleti megközelítést foglal egységes keretbe. Közös jellemző, hogy minden mérés a mezőgazdasági haszonnövények bizonyos tulajdonságát vizsgálja. A mérések az egészen kis skálától (arbuszkuláris mikorrhiza gombák) a teljes parcellát átfogó térskáláig (eddy-kovariancia, drón mérések) terjednek.

A mérési eredményeket a Biome-BGCMuSo modell kapcsán használjuk fel közvetlenül. Az eredmények segítik a modell fejlesztését, paraméterezését, a modell validációját, kalibrációját (más szóval optimalizálását), és térbeli kiterjesztését. A mérések és a modell közti komplex kapcsolatrendszer az 4.8. ábra mutatja. Az alábbiakban az ábrán szereplő mérések kapcsán bemutatjuk az adott vizsgálat jelentőségét, térskáláját, valamint a mérési protokollt. Ahol lehet, példákat mutatunk már létező hasonló mérések kapcsán, mértékegységekkel. A már zajló vizsgálatok esetén martonvásári kísérleti eredményeket is közlünk. Az egyéb kísérleti környezetekben zajló vizsgálatok eredményei között több hosszú idősort mutatunk be, ami óriási értéket képvisel, mivel segítségükkel számszerűsíthető a folyamatok évek közötti, időjárásfüggő változékonysága. A mérési adatok alapján készülő megfigyelési adatbázis felbecsülhetetlen értéket fog képviselni, és európai viszonylatban is egyedülálló lesz.



4.8. ábra. A modell és az AgroMo megfigyelőrendszer kapcsolata.

4.2.1. Levélfelület index és levélmorfológiai mérések

Kísérleti környezet: FACE, tartamkísérletek, liziméter, eddy kovariancia mérések, Méretskála: növényegyed és állomány A vizsgálat tárgya: a növényzet levelei



Az agro-ökoszisztémák működése során a növények asszimilációs felületének nagysága a produkciót befolyásoló tényezők közül a legfontosabb. Az asszimilációs felület egy mérőszáma az ún. levélfelületi index (leaf area index, rövidítve LAI; $m^2 m^{-2}$), azaz levélfelület talajfelszínre vetített értéke. Ennek döntő szerepe van a sugárzáselnyelés mértékében, illetve a párologtatás nagyságának is fontos befolyásoló tényezője. Mivel a LAI központi szerepet játszik a szén-, nitrogén és vízforgalmi kutatások, modellezési munkák során, minél pontosabb mérése kívánatos.

A Biome-BGCMuSo modell központi paramétere az ún. specifikus levélfelületi index, azaz az egységnyi szénmennyiségre jutó levélfelület [SLA; $m^2 kgC^{-1}$]. A LAI értékét a modell a levélszéntartalom [$kg C m^{-2}$] és az SLA szorzataként határozza meg napi léptékben. A LAI értékét a modell használja mind a fotoszintézissel kapcsolatos számításoknál, mind a párologtatás (transzspiráció) meghatározásához. Az SLA értéke tehát egy fontos bemeneti paramétere, míg a LAI egy fontos kimeneti változója a modellnek, így mindkét változóra vonatkozó pontos és részletes mérés nagy segítség a modell parametrizációjához, illetve validálásához.

A mérési protokoll bemutatása

Növények száma négyzetméterenként

A vetéskori tőszám egy adott agrotechnikai paraméter. A kelési százalékot, illetve a ténylegesen kikelt négyzetméterenkénti tőszámot a fejlődés kezdetén rögzítjük. Méréseinket a továbbiakban az átlagosnak és tőszám szempontjából homogénnek mondható kísérleti térben igyekszünk lebonyolítani.

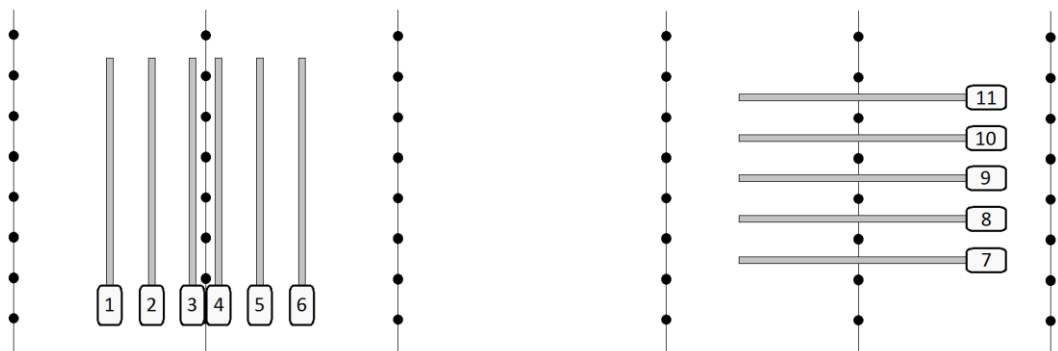
Levélfelület index (LAI)

A földfelszín egy négyzetméterére eső *növényi lombzat felületének* meghatározását *non-destruktív* LAI-2200C (LI-COR) és LP-80 ceptometer (DECAGON) készülékekkel a FACE, a LIZIMÉTER, az EDDY és további martonvásári tartamkísérleti helyszíneken legalább heti 1 alkalommal tervezzük. A méréseket a tenyészidőszak alatt végig, illetve virágzás után a levélzet teljes száradásáig, a zöld/száraz levélfelület nagyságának változásig

végezzük. A tenyésztési időszak elején a lombzat záródását megelőzően *destruktív* mintából gyűjtünk adatot a *növény levélfelületéről*, amit Li-3100C levélszkennerrel határozzunk meg (LI-COR).

A **ceptométerrel** gyűjtött levélfelület adatokat nyáron destruktív mintavétellel validáltuk. A validálás tanulsága szerint a **mérés időpontját** a Nap deleléséhez célszerű legjobban közelíteni, de a Nap deleléséhez viszonyított +/- másfél, két óra időintervallumban még alacsony hiba százalékkal végezhető a mérések.

A mérést **helyileg** az állományra jellemző átlagos térrészben célszerű megvalósítani. A mérés **pozíciója** kukoricánál a mérésre kiválasztott lehetőleg töhiány nélküli sortól mindkét irányba, balra és jobbra a sorral párhuzamosan történhet a sorok között fél távnál, negyed távnál és konkrétan a sor tövében, illetőleg több sorra merőleges mérést szükséges végezni úgy, hogy az érzékelőkar közepe a sorban legyen. A szenzorral minden pozícióban több leolvasást végeztünk, majd valamennyi pozíció és leolvasás értékét átlagoltuk a műszerrel és annotációval elmentettük. Célunk a több pozíció, irány és ismételt mérések során az volt, hogy a kísérleti terület egy négyzetméterét teljesen végigpásztázzuk a ceptométerrel, ahogy az alábbi ábra (4.9. ábra) is mutatja. Az ábra bal és jobb oldalán látható mérési pozíciók a valóságban egyazon kiválasztott térrészen valósulnak meg, csak a jobb áttekinthetőség kedvéért mutatjuk így be.



4.9. ábra. Ceptométeres mérések pozíciója nagy sortávú soros vetésű növényeknél (pl.: kukorica).

A ceptométert minden esetben külső fotoszintetikusán aktív sugárzás (photosynthetically active radiation, rövidítve PAR) szenzorral használjuk, a szenzorok kalibrálása a mérések előtt történik. A szenzorok vízszintezését buborék szintező biztosítja.

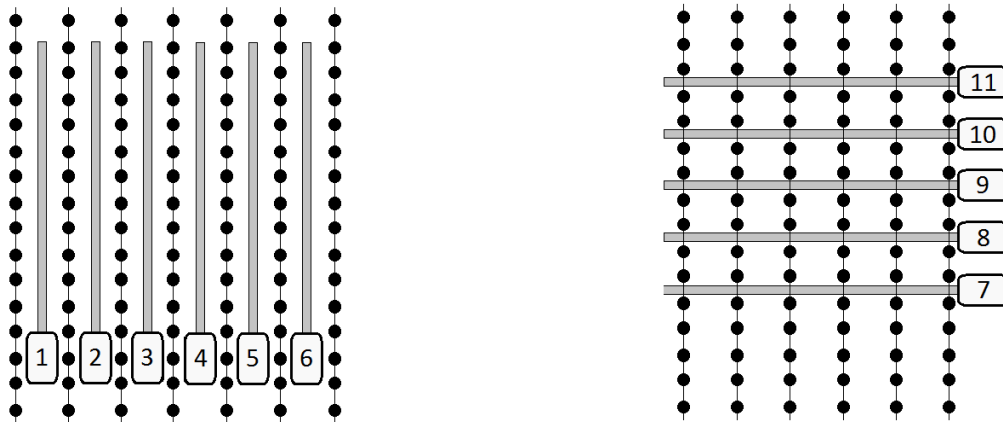
Az **időjárási körülményeket** is figyelembe vesszük a mérések során. Bár a műszer leírása alapján akár $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ külső (állomány feletti) PAR érték alatt is használható, a legmegbízhatóbbnak az $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PAR feletti értékek bizonyultak.

Törekedni érdemes arra is, hogy a mintavételek sorrendje időben random legyen, amennyiben különböző kísérleti kezelések levélfelületének összevetése a cél.

A **műszer beállításait** a növényzet fajtájához igazítjuk a növény specifikus paraméterek esetén (χ -érték). A mérés helyét, idejét szintén gondosan az UTC időzóna figyelembe vételével állítjuk be. A terepen elmentett értékeket a műszerről a hozzá tartozó szoftver (LP-80 Utility, <http://www.decagon.com/en/canopy/canopy-measurements/accupar-lp-80/#Support>) segítségével számítógépre letöltjük a mérési adatok további feldolgozásához.

A mérés protokollja a kukoricánál jóval kisebb sortávú pl.: kalászos gabonák esetén csak részben módosul. A műszerhasználathoz tartozó beállításokon nem szükséges változtatni, csak természetesen a növény-specifikus paraméter értékén. Az állomány korai záródása miatt a sorral párhuzamos mérést a sorok között csak féltávnál végeztük. A sorra merőleges leolvasás

során törekedünk arra, hogy az érzékelő kar a sor közepéből induljon, onnan érjen át a szomszédos sorokba (4.10. ábra).

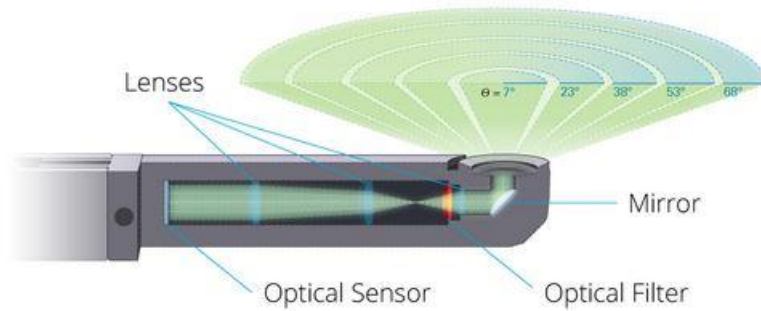


4.10. ábra. Ceptométeres mérések pozíciója kis sortávú soros vetésű növényeknél (pl. búza).

A ceptométeres mérésekkel egyidőben a vizsgálni kívánt növényállomány levélfelületét **LAI-2200C** készülékkel (4.11. ábra) is megmérjük. A LAI-2200C halszemoptikás fényérzékelője ugyanis különbözik a ceptométer sorban elhelyezett 8*10 pont érzékelőjétől. Előbbi egyszerre 5 zenitszögből méri a növényzet által átengedett fényt (4.12. ábra), ráadásul nem a teljes PAR spektrumban, csak 320-490 nm között, ebben a hullámhossz tartományban a legkisebb ugyanis a levélzetről szóródó fény mennyisége, ami torzíthatja a mérést. A párhuzamos mérések során, valamint a planimetriás validálás révén (lásd alább a destruktív vizsgálat) azt vizsgáljuk, melyik készülék képes tágabb időjárási spektrumban a vizsgálni kívánt növényállományokban megbízható mérési eredményekkel szolgálni a lombzat/levél felületéről.



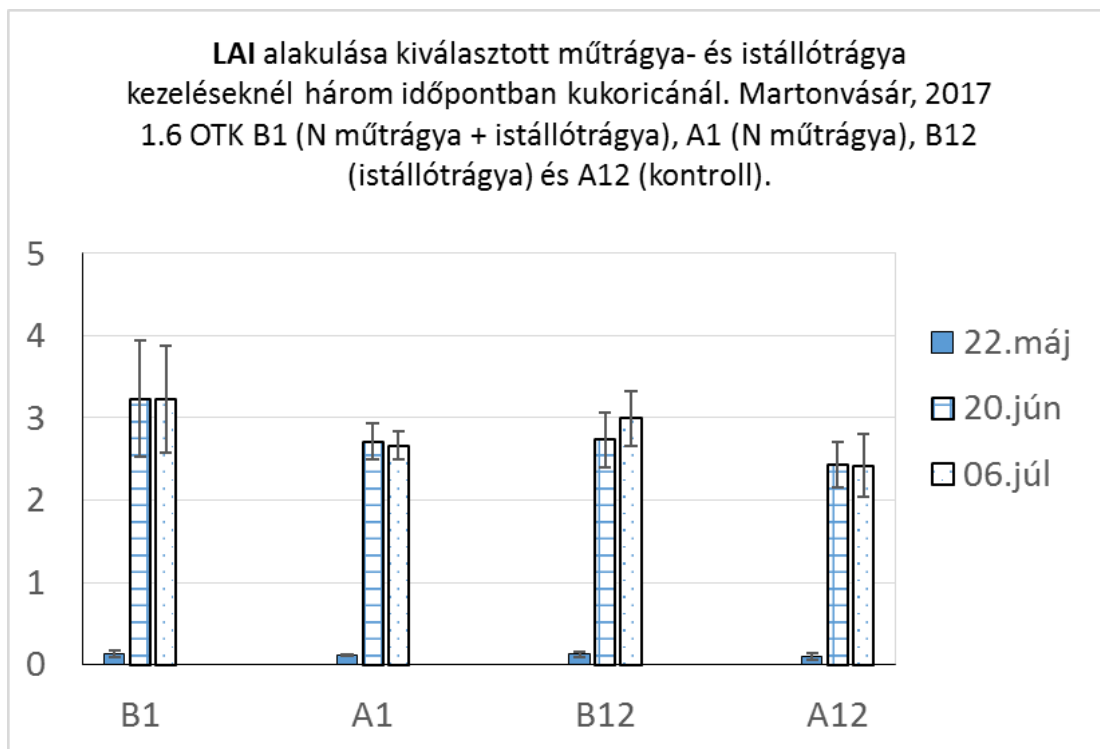
4.11. ábra. A teljes LAI-2200C készülék állomány feletti fényerősség mérése közben (forrás: LI-COR weboldal, <https://www.licor.com/documents/ny34xgfry9ewxma8p97y>).



4.12. ábra. A LAI-2200C készülék optikai szenzora, mely a megjelölt zenit irányokba egyidejűleg képes mérni a fényt (forrás: LI-COR weboldal, https://www.licor.com/env/products/leaf_area/LAI-2200C/optical-sensor.html).

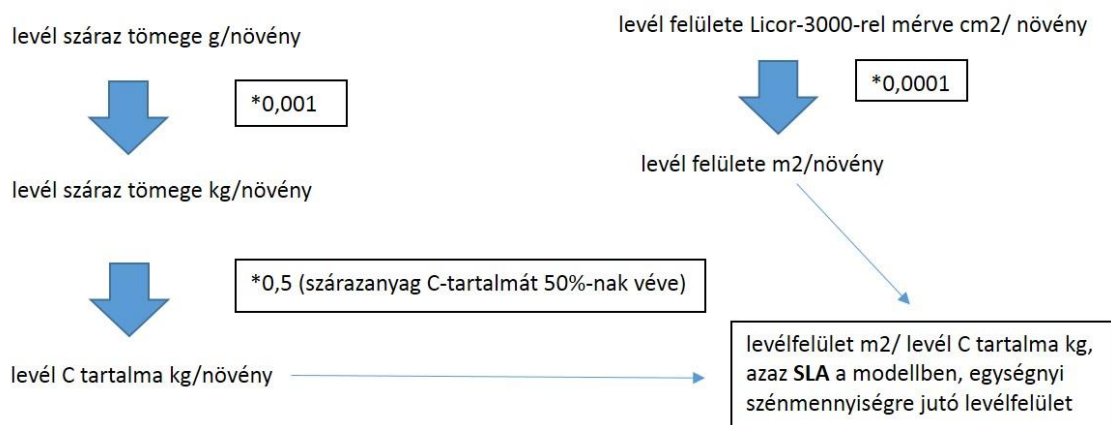
Az *egyedi növények levélfelületét destruktív* mintavételt követően **LI-3100C** (LI-COR) levélszkennerrel kéthetente tervezzük meghatározni. Ahol a növények korlátozott száma miatt erre nincs mód, ott 4-6 leveles korban és virágzás idején távolítunk el minimális számú növényt. A szkennelés előtt a levelek szárról való eltávolításakor az utolsó ligulával rendelkező levélig haladunk, valamint a száron attól felfelé lévő további két levélnek mérjük még meg a felületét. Amennyiben sárguló levelek is vannak, azokról feljegyezzük hány százalékban zöldek. A begyűjtött növények levél, szár, virág/termés friss- és légszáraz tömegét (g) megmérjük. A destruktív mintázással több célunk is van. Egyrészt ez a módszer alkalmas a lombozat záródása előtt is adatot szolgáltatni a levélzet nagyságáról. Másrészt az adott növényen végzett egyéb, a modellezési munkához szükséges más kutatók vizsgálati eredményeit kiegészíti. Harmadrészt a fejleszteni kívánt modellben a specifikus levélfelület kiszámításához is az egy adott növényhez tartozó levélfelület és levéltömeg mérése szükséges (ld. alább). Negyedrész ily módon szeretnénk a jelen pályázat során beszerzésre kerülő LAI-2200C készüléket is validálni.

A levélfelület destruktív mérését Li-3100C készülékkel idén is elvégeztük a tenyésztési időszak során 3 alkalommal kukoricán (MvTarján hibrid). A mért értékek alakulását az alábbi ábra (4.13. ábra) mutatja.



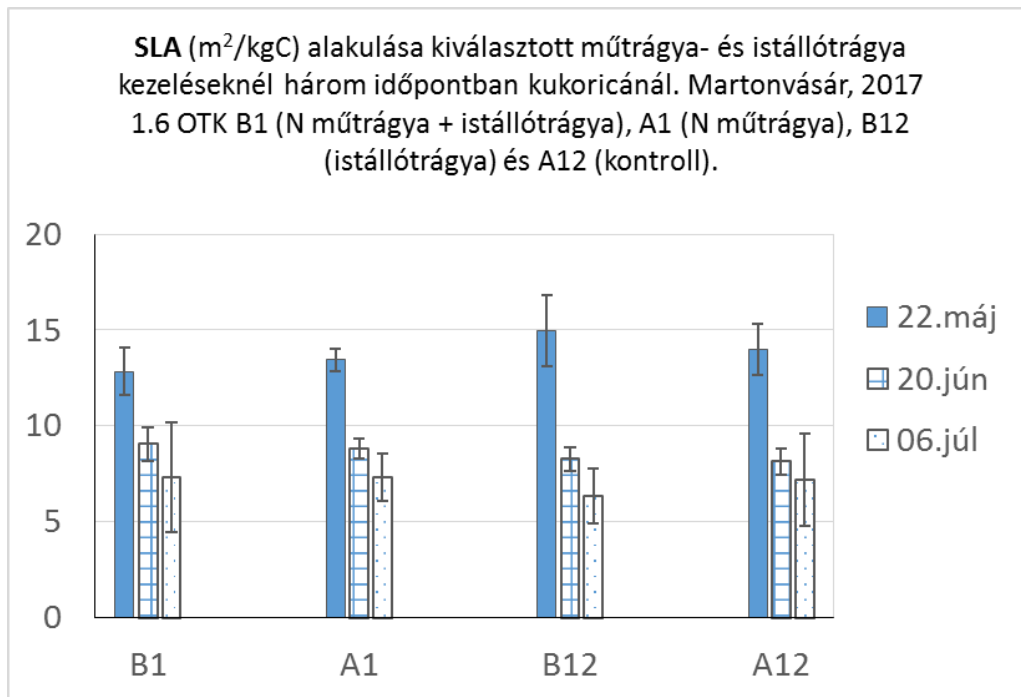
4.13. ábra. Levélfelület mérések eredményei (mértékegység: m^2/m^2). Martonvásár 1.6 Országos Műtrágyázási Tartamkísérlet 2017.

A destruktív mintavételt követően az alábbi folyamatábra alapján számítható ki a **specifikus levélfelület (SLA: egységnyi szénmennyiségre jutó levélfelület, m^2/kgC)** (4.14. ábra).



4.14. ábra. Specifikus levélfelület számítás folyamata a Biome-BGCMuSo modell számára.

Az SLA eredmények alakulását grafikonon ábrázoltuk (4.15. ábra). Az értékek 3 ismétlés átlagai a hozzá tartozó szórással. Jól látható, hogy az SLA értéke csökken a tenyészidőszak előrehaladtával.



4.15. ábra. Specifikus levélfelület számítások eredményei. Martonvásár 1.6 Országos Műtrágyázási Tartamkísérlet, 2017.

Szár- és levéltömeg négyzetméterenként

Destruktív mintavételnél a levélfelület és SLA meghatározásban implicit a szár, levél és termés friss és száraz tömegének rögzítése szerepel.

Fényelnyelő képesség az állományban

A jelenlegi és a fejleszteni kívánt modellben a fény elnyelési koefficiens (K) a növényzet által abszorbeált fény (PAR_i: intercepted solar radiation) számításához szükséges paraméter. A Beer törvény alapján (Thornley, 1976):

$$PAR_i = PAR * (1 - \exp(-K * LAI))$$

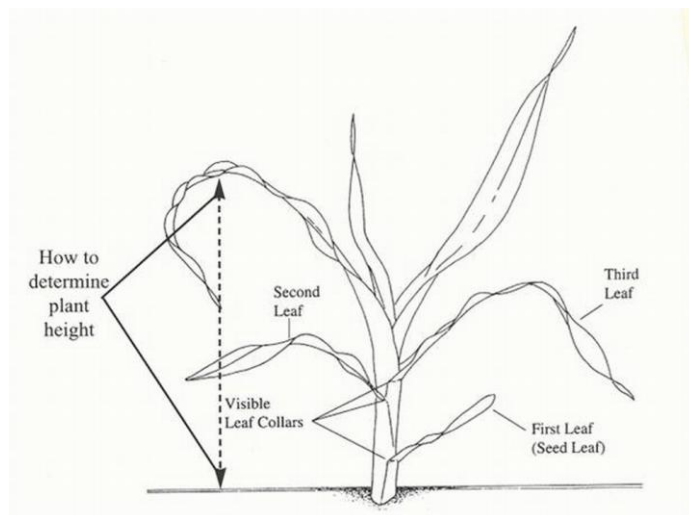
A K érték számításához a Biome-BGCMuSo modell számára az alábbi képlet alapján ismernünk kell a napállás szögét (θ), ami a mérés helyszínének földrajzi szélessége, hosszúsága és a mérés időpontja alapján számítható. Mérnünk kell a lombzat által átengedett (TPAR: transmitted photosynthetically active radiation) és a lombzatot érő teljes fotoszintetikusán aktív sugárzást (IPAR: incoming photosynthetically active radiation), valamint a levélfelületet (LAI).

$$K = (-\ln (TPAR / IPAR) \cos\theta) / LAI$$

A fotoszintetikusán aktív sugárzást a lombzat felett és alatt LP-80 ceptométerrel tervezzük mérni, a levélfelületet destruktívan határozzuk meg LI-3100C levélszkennerrel.

Állománymagasság - Elhalt növényi anyag

Az állománymagasságot kalászos gabonáknál magasságmérő rúd segítségével az állomány teljes magasságáig fogjuk leolvasni. Kukoricánál növényegyedenként virágzásig az utolsó levél magasságáig, amelynek csúcsa visszahajlik a föld felé (lásd 4.16. ábra). A címerezés idején rögzítjük a szár magasságát az utolsó ligulával rendelkező levélig, valamint a címercsúcsig is min. 5 növényen. A ligulával rendelkező levelek számát és az elhalt levelek számát is rögzítjük. Amennyiben a levélnek a fele, vagy több mint fele elszáradt, megsárgult, elhalt levélnek fogjuk számítani.



4.16. ábra. A kukorica magasságának mérése V3 fejlődési stádiumban (forrás: <https://www.gov.mb.ca/agriculture/crops/production/grain-corn/print,control-weeds-early-in-corn.html>).

4.2.2. Allergén fehérjék nyomkövetése



A gabonamagban található tartalékfehérjék kulcsfontosságú szereplőnek minősülnek a búzához köthető egészségügyi problémák kiváltásában. A tartalék- vagy raktározott fehérjék a gabonafélék magvainak endospermiumában találhatók, a növény életciklusa folyamán a megtermékenyüléstől kezdve folyamatosan termelődnek, majd az érett mag csírázása után energiát szolgáltatnak a mag fejlődéséhez. A tartalékfehérjék kapcsolatban vannak a cöliákiában szenvedő betegek autoimmun reakciójával, a búza allergia különböző típusaival, vagy a Crohn-betegséggel. Jelenlegi ismereteink alapján a cöliákiás megbetegedések kiváltó tényezői a glutén fehérjék továbbá kevésbé feltárt módon a prolamin szuperfamilia egyes további tagjai, mint a szerpinek, alfa-amiláz/tripszin inhibitorok (ATI) és a nem specifikus lipid transzfer fehérjék (nsLTP). Előzetes eredményeink alapján a betegséget kiváltó tartalékfehérjék összetétele jóval változatosabb, ezért a lisztérzékenységet kiváltó fehérjék részletes azonosítása és vizsgálata nagy jelentőségű. A gabonafélék sikerfehérjéinek közös tulajdonsága, hogy nagyon sok, 6-8 aminosavból álló ismétlődő fehérjedarabkát tartalmaznak, melyben a prolin és a glutamin aminosavak meglehetősen nagy számban fordulnak elő. Részben ezek az ismétlődések felelősek azért, hogy a búzalisztből rugalmas és egyben jól nyújtható tészta képződik. Ugyancsak a prolinnak és glutaminnak köszönhetően ezek a fehérjedarabkák olyan térszerkezetet, úgynevezett poliprolin-II-hélix struktúrát tudnak felvenni, ami elősegíti, hogy az immunrendszer megfelelő molekuláival egy stabil kölcsönhatást kialakítva végül gyulladáshoz vezetessenek. Az emésztőrendszeren keresztülhaladva ezek a fehérjék, köszönhetően annak, hogy az emésztőrendszer enzimeit a prolin és glutamin aminosavakra kevésbé specifikusak, akár több epitópot tartalmazó nagyobb fehérje darab formájában maradnak meg, és a vékonybélben, mint antigének az arra érzékenyek körében problémát okoznak.

Egyéb gabonafélékben szintén megtalálhatóak a prolaminok, melyek a gliadinokkal bizonyos mértékig megegyező fehérjeszekvenciákat tartalmaznak és ezáltal szintén immunválaszt váltanak ki az arra érzékenyekben. Ilyen fehérjék az árpában a hordein, illetve a rozsban a szekalin, melyek szigorúan kerülendők a gluténmentes diétában.

Az elmúlt években a búza és rokonfajok genomjainak szekvenálásában elért eredmények nagyban megkönnyítik a bioinformatikai vizsgálatokat, modellezéseket. Az egyre nagyobb számban hozzáférhető gabona genom adatok, illetve a gén- és fehérje szekvencia adatbázisok elősegítik, hogy megértsük az egyes glutén fehérje családok sokféleségét, azonosítani tudjuk jellegzetes tulajdonságaikat, azokat a bélyegeket melyek

alapján egymástól megkülönböztethetőek vagy épp azokat a tulajdonságaikat melyek hozzájárulnak toxikus voltuk kialakulásához.

Kenyérbúza esetében több tanulmány is alátámasztotta miszerint a környezeti stresszhatások eredményeként a különböző tartalékfehérje frakciók expressziós szintjében markáns változások következnek be. Ezeket a változásokat kontrollált fitotroni körülmények között precízen nyomon követhetjük, és az eredmények alapján előre modellezhetjük a klímaváltozás hatására bekövetkező minőségi változásokat illetve toxikus fehérjékre gyakorolt hatásukat. A klímaváltozási projekcióknak megfelelően olyan környezeti stresszfeltételeket teremtünk a klímakamrákban, amelyek az elmúlt évtizedek időjárási adatai alapján jellemzőek voltak és nagy valószínűséggel következnek be a jövőben a Kárpát medencében (pl.: kombinált hőség- és szárazság-stressz a virágzás idején) és amelyek előzetes tapasztalataink szerint összefüggésbe hozhatók a kalászos termékek allergén fehérje tartalmával (pl. lisztérzékenységet okozó gliadinok mennyisége). A kísérletben vizsgált több kalászos genotípus allergén fehérje tartalmának minőségi és mennyiségi változásait allergén fehérjékre specifikus antitest alapú ELISA (Enzyme Linked Immuno – sorbent Assay, vagyis enzimhez kötött ellenanyag vizsgálat) tesztekkel illetve HPLC-vel (*High Performance Liquid Chromatography* - nagy teljesítményű folyadékkromatográfia) vizsgáljuk. Az egyes allergének mennyiségében bekövetkező változások okozta immunreaktivitás változás hatását ELISA alapú anti-IgA tesztekkel elemezzük. A vizsgálat kiemelten fontos abból a szempontból, hogy a vizsgált búza genotípusok a változó környezeti feltételek mellett is megtartják-e kedvező fehérje tulajdonságaikat, ezáltal a jövőben is biztonsággal termesztethetőek és fogyaszthatóak lesznek-e az arra érzékeny populáció számára (dózishatás).

A vizsgálatok első körben kontrollált klímakamrákban zajlanak, ezekben pontosan szabályozható a hőmérséklet és a megvilágítás. Elengedhetetlen a talajnedvesség tartalom folyamatos monitorozása, és a stresszidőszakban a megfelelő nedvességtartalom beállítása. Terveink szerint a stresszidőszak a virágzás kezdetére és a virágzás utáni tizedik napra esik (10DPA), az ELISA alapú immunanalitikai vizsgálatok, illetve a HPLC technikával mért minőséggel összefüggésbe hozható paraméterek megállapítását érett magminták lisztjéből végezzük el. A tartalékfehérjék expressziója szövetspecifikus és a különböző fehérje frakciók expressziós szintje nagymértékben függ a stressztől és a talajviszonyoktól. A különböző egyedi- és kombinált stresszkezelések hatásait különböző időpontokban tartalékfehérjékre fókuszált ELISA analízissel vizsgáljuk, meghatározzuk a klímaváltozással összefüggésbe hozható legkritikusabb stresszösszetételt és fenofázist. Az elemzésből kiderül mely fejlődési stádiumban melyik típusú stressz érinti legérzékenyebben a növényeket, illetve ezek a változások milyen hatással vannak a magfejlődésre, a szemfehérje tartalomra, az allergén fehérjék mennyiségi változására, a tartalékfehérje frakciók egymáshoz viszonyított arányára, ezzel összefüggésbe hozhatóan a beltartalmi- és sütőipari minőségre.

Vizsgálatok módszertani háttere

Növényanyag és növénynevelés

Különböző szárazságtűrő és érzékeny, valamint hőtűrő és érzékeny búza genotípusok (Első évben: Mv Palotás, Mv Hombár, Mambó és Bánkúti 1201).

A kiválasztott genotípusok előcsíráztatása, majd hathetes jarovizációja után 100 °C-on sterilizált szántóföldről származó földbe ültetjük, majd tavaszi klímaprogramra állított fitotroni kamrákban (4.17. ábra) neveljük a virágzás kezdetéig. A virágzás kezdeti szárazság stresszhez a talajnedvesség napi szintű monitorozásával a talajt 10-15% nedvességtartalomig szárítjuk vissza, ezután visszaöntözzük a deszikkációs fázisig. A 10 DPA-s (day post anthesis,

azaz 10 nappal a virágzás kezdete után) fenofázis szárazság stressz körülményeit is e szerint állítjuk be. A hőstressz és a kombinált stresszkezeléseket elkülönített klímakamrában végezzük, melyhez az elmúlt aszályos években mért időjárási adatok alapján állítjuk össze a klímaprogramot (4.2. táblázat).

4.2. táblázat. A hőstressznek kitett búza genotípusok klímaprogramja.

Idő	Hőmérséklet [°C]	Pára [%]	Fény
0:00	22	70	0
1:00	21	74	0
2:00	20	77	0
3:00	20	79	0
4:00	20	80	0
5:00	20	79	1
6:00	21	77	2
7:00	22	74	3
8:00	23,5	70	3
9:00	25	65	4
10:00	27	60	4
11:00	29	55	4
12:00	30	50	4
13:00	32	46	4
14:00	33	43	4
15:00	34	41	4
16:00	34	40	4
17:00	34	41	3
18:00	33	43	2
19:00	32	46	1
20:00	30	50	1
21:00	29	55	0
22:00	27	60	0
23:00	25	65	0

A növényeket teljes fiziológiai érésig neveljük (minimum 42 DPA), majd a növényeket egyedileg aratjuk.

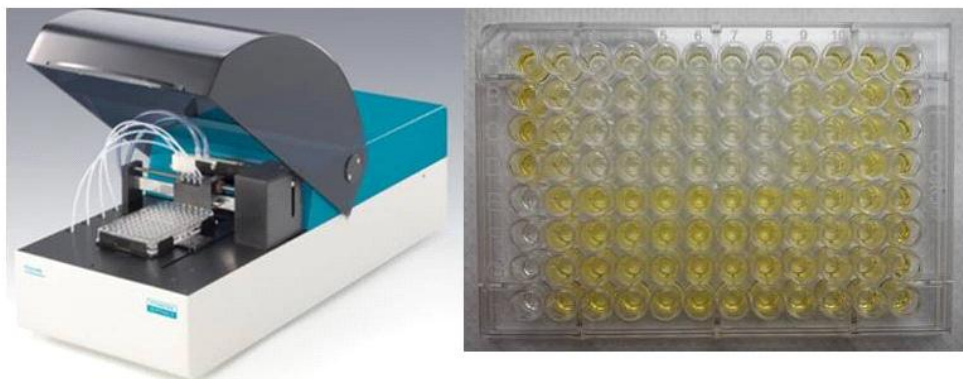
Mérjük a növénymagasságot, a teljes növény terméshozamát, a főkalász kalászkáinak számát, szemszámát, termés mennyiségét.



4.17. ábra. Klímakamra.

Allergén fehérjék mennyiségének mérése

Az allergén fehérjék mennyiségének változásait két kereskedelmi forgalomban kapható ELISA (Enzyme Linked Immuno – sorbent Assay, vagyis enzimhez kötött ellenanyag vizsgálat) teszttel követjük nyomon. Az ELISA nemzetközileg elfogadott kvantitatív módszer a gluténtartalom kimutatására, ellenőrzésére. Egy szilárd fázison lejátszódó színreakció, amellyel a búza tartalékfehérjék ellen termeltetett specifikus antitesttel kimutatható reakciókat egyszerűen, akár vizuálisan is értékelhetjük (4.18. ábra).

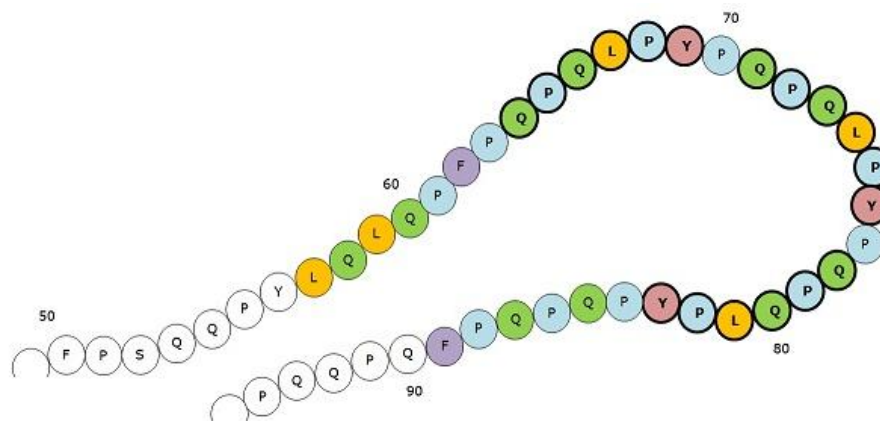


4.18. ábra. Az ELISA összeméréshez és a leolvasáshoz szükséges Crocodil miniWorkstation robot és egy előhívott ELISA mikrotiter lemez.

A lisztérzékenységben szenvedőknek szánt élelmiszerek összetételéről és címkézéséről szóló 2009. január 20-i 41/2009/EK rendelet van érvényben, mely a következő határértékeket szabja meg:

- „rendkívül kis gluténtartalmú”: egy kilogramm élelmiszerben legfeljebb 100 mg glutén lehet
- „gluténmentes”: a glutén aránya legfeljebb 20 mg/kg
- „zabbal készült”: a glutén aránya legfeljebb 20 mg/kg, és a zab nem érintkezett búzával, rozssal, árpával, vagy ezek hibridjeivel.

A vizsgálatokhoz a ROMER AgraQuant Gluten G12 ellenanyag alapú ELISA tesztjét használjuk, mely a 33-mer (α -2 gliadin 57-89 aminosav szekvenciája: LQLQFPQQLPYPQPQLPYPQPQLPYPQPQPF) egyik peptidrésze (QPQLPY) ellen termeltetett ellenanyaggal dolgozik (4.19. ábra). Ez a 33-mer peptidszakasz hat darab T-sejt epitópot tartalmaz. Hidrolizált, hőkezelt élelmiszerek mérésére is alkalmas.



4.19. ábra. A 33-mer peptidszakasz.

A vizsgálatainkhoz használt másik ELISA teszt az R-Biopharm RIDASCREEN gliadin R5, mely az ω -szekalin (rozs prolamin) antigén ellen termeltetett monoklonális R5 ellenanyaggal dolgozik. A teszt a búza, árpa és rozs prolaminok összes frakcióját egyforma mértékben ismeri fel a QQFPF pentapeptid és vele homológ szekvenciákon keresztül (QQQFP, LQFPF, QLFPF, ahol a Q: glutamin, P: prolin, F: fenilalanin, L: leucin). Ezek a peptidszakaszok hőrezisztensek, valamint ismétlődően fordulnak elő a prolaminokban, az α -típusú prolaminoknál gyakrabban γ -, ω - típusú prolaminokban. Ezzel a rendszerrel a glutén szintén kimutatható natív, illetve hőkezelt élelmiszerekből.

Mindkét ELISA tesztet mintánként négy technikai ismétlésben végezzük, a 405 nm-en leolvasott abszorbanciás értékek lineáris regressziója után kapott eredményekből számoljuk a szóráserőteket, valamint a mért összfehérjetartalom és a hígítási faktorokból számítjuk ki az vizsgált genotípus, adott kezelésének toxikus fehérje tartalmát ppm-ben (milliomod tömegarány, mg/kg).

Az ELISA összemérő és leolvasó robot olvasófejének mérési pontossága: $\pm 0.01\text{OD}$ vagy 2.5%, ahol az OD (Optical Density – optikai sűrűség) adott hullámhosszú (nm) fény abszorbanciájának és a hullámhossznak a hányadosa. Az ELISA robot diszpenzerének mérési pontossága: <5%. Az analitikai mérleg hibaszázaléka: 0.01 mg.

A tartalékfehérje alfrakcióinak pontos meghatározása - SE-HPLC, RP-HPLC, NIR

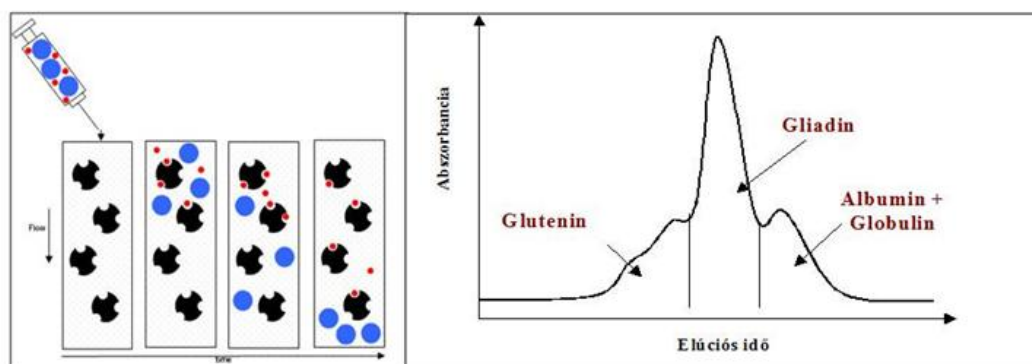
Méretkizárásos kromatográfia (SE-HPLC):

Módszer elve: a méretkizárásos kromatográfiával (SEC) az analitot (analitnak nevezzük a kromatográfia során elválasztandó anyagot, ahol a fehérjék mérethatára általában $M_w > 2000$ Da) hidrodinamikusan molekula-átmérőjük alapján választjuk el, nagy pórusátmérőjű tölteten. A töltettől függően, egy adott méretnél nagyobb molekulák kizáródnak a töltet belső térfogatából. A kisebbek ezzel szemben bejutnak a pórusokba és különböző ideig tartózkodnak ott, eltérő úthosszot járva be az elválasztás során. Fontos kritérium, hogy az

állófázis semmilyen kölcsönhatást ne tudjon kialakítani a vizsgált molekulákkal. Az ioncsere, az adszorpció, és a hidrofób kölcsönhatások mind nem kívánt, másodlagos folyamatnak számítanak. A SEC alkalmazása jellegzetesen a szintetikus műanyag polimerek illetve biopolimerek elválasztására, fehérjék vizsgálatára és tisztítására összpontosul.

Alkalmazása a gabonakémiában: a glutenin makropolimer fehérjét a polimer kötéseinek felbontása nélkül nem lehet oldatba vinni. Ennek oka, a fehérjék (polimer fehérjék) nagy mérete és hidrofób jellege. Az SE-HPLC-t használó tanulmányok a búzafehérjék oldható részének méreteloszlását vizsgálták eleinte (a leggyakrabban alkalmazott extraháló puffer: 0,1 molos (pH 6,9) Na-foszfát puffer + 2% SDS-sodium dodecil-sulphate/nátrium dodecil szulfát). Később az SDS-ben oldhatatlan nagy polimerizáltságú polipeptideket ultrahangos szonikálásnak vetették alá (15-50 mp, 10-12 watt; Branson 20kHz sonifier). A polimerek fizikai összetörésével a teljes fehérjetartalmat oldatba lehetett vinni (0,5 molos (pH 6,9) foszfátpufferben, amely tartalmazott 2% SDS-t). A kérdés az, hogy a szonikálással oldatba vitt – tehát nem eredeti méreteloszlású fehérjék – milyen méreteloszlási profilt adnak, és hogyan lehet elválasztani a monomer és polimer típusú fehérjéket. Az elemzés során három frakció (kromatográfiás csúcs) vált el: glutenin, gliadin és albumin/globulin fehérjék. Ezzel az eljárással lehetséges az abszolút és relatív glutenin polimerek mennyiségi értékének meghatározása a teljes fehérjetartalomhoz viszonyítva (4.20. ábra). Úgy találták, hogy a glutenin polimerek mennyisége (156 kDa-nal nagyobb molekulatömegű fehérjék mennyiségi értéket vettek számításba) erősen korrelált a tészta erősségével. Az SDS-ben oldhatatlan polimer fehérjék és a teljes fehérjetartalom aránya (UPP%) a tésztaerősséggel korrelált a legerősebben. Az UPP%-kal azoknak a nagy polimereknek a mennyiségét határozhatjuk meg, amelyek szonikálás nélkül nem extrahálhatók ki. Az így meghatározható UPP% több más analitikai és minőségi értékkel is jól korrelál: a sikér indexszel, az alveográf P és W értékével, több mixográfus paraméterrel, illetve kisebb mértékű negatív korrelációt állapítottak meg a HMW/LMW aránnyal összefüggésben. Többek között jól felhasználható az érési folyamatok nyomkövetésére is.

Legvégül kiemelnénk, hogy bár mérés által szolgáltatott eredményt sok nemesítési kísérletben alkalmaztak sikeresen, de a polimer/monomer elválasztás kiértékelése kérdéses, mivel az ω -gliadinok jóval nagyobbak, mint a rövid glutenin polipeptidek. Hasonlóan nem egyértelmű a gliadin és az albumin/globulin fehérjék elválasztása. Ezek a limitációk a módszer megkerülhetetlen alkalmazása mellett kiemelik a standardizálásnak szükségességét.

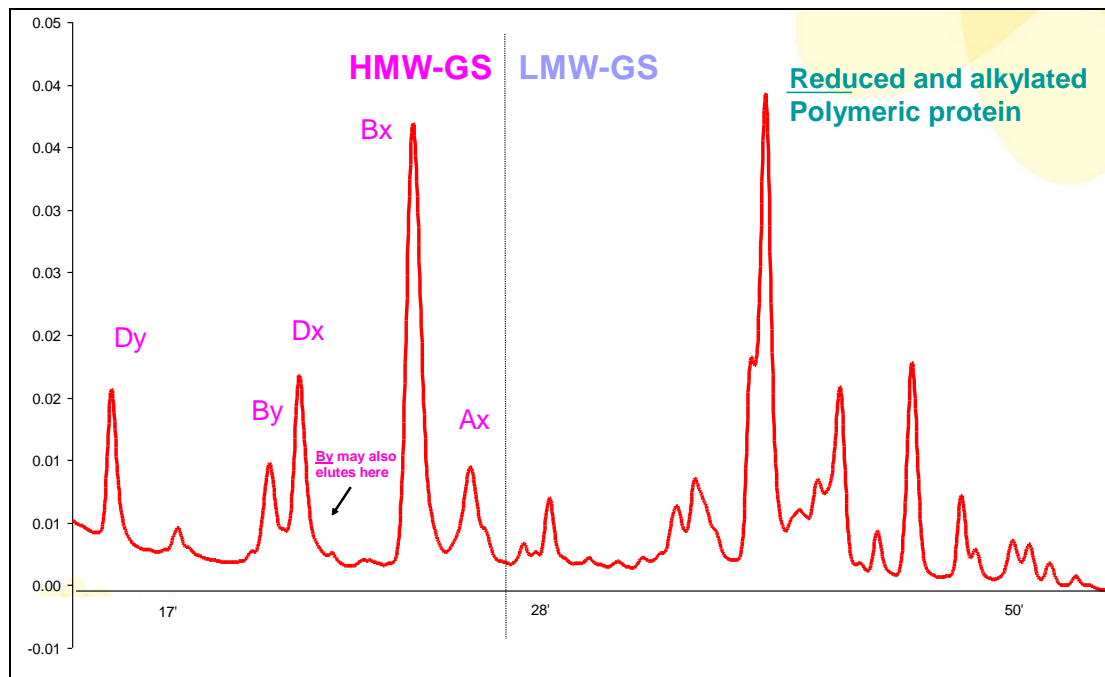


4.20. ábra SE-HPLC során elválasztott fehérjék, egy búzaminta SE-HPLC fehérje profilja. Sikérfehérjék mennyiségi arányának meghatározása: Glutenin /Gliadin arány, UPP% oldhatatlan polimer fehérje frakció, vízoldható Albumin+globulin frakció.

Fordított fázisú (RP)-HPLC:

Módszer elve: fordított fázisú kromatográfiánál az állófázis apolárisabb a mozgófázisnál. Az ionos (vagy ionizálható) molekulák visszatartása alacsony, ezért ionpároképző (például TFA – trifluoroacetic acid/trifluor ecetsav) hidrofób ion használata szükséges a mozgófázisban. Az ionpároképző koncentrációjával az ellentétes töltésű vegyület visszatartása így nő (de egy adott koncentráció felett állandó értéket érhet el, sőt csökkenhet is). Az analit és az ionpároképző vegyület közös szolvátburokba kerül, kifele semleges karakterű lesz, és kölcsönhatásba tud lépni az apoláris állófázissal. A hidrofób rész adszorbeálódik az állófázis felületen, poláris része fordul a mozgófázis felé, apoláris része pedig az állófázis alkil-láncaival lép kapcsolatba.

Alkalmazása a gabonakémiában: a gliadin polipeptid frakciókat fordított fázisú HPLC-s vizsgálat során (omega, alfa/beta és gamma) tipikusan 70%-os etanollal vagy 50%-os propanollal extrahálják ki a mintamátrixból. Az elválasztást általánosan C8-as vagy C18-as oszlopon 20-50%-os acetonitril (+ 0,1 % TFA) gradienssel végzik. A glutenin frakció polipeptid alegységeit hasonló körülmények között választják el. Először a HMW alegységek majd a kisebb LMW alegységek érkeznek le. Az alegységek megfelelő elválasztási ideje hosszú, 60 vagy akár 200 perces gradienst igényel. Az elválasztás idejének növelése azonban természetesen magában rejti a reprodukálhatóság csökkenését. Az analízis idejét kis pórúsátmérőjű oszlopokkal lehet csökkenteni, és újabban héjtöltetes oszlopokat is alkalmaznak erre a célra. Poroshell kolonnával sikerült 13 perces elválasztást elérni a HMW és LMW alegységekre, 0,7 ml/min áramlási sebesség mellett 65 °C-on, 23-44 %-os ACN gradienssel. Az elválasztás során azonban gondot okozhat az 5-7, illetve a 7-7* fehérjék retenciós idejének megegyezése mely gyakran teljesen megegyezik még hosszabb futtatásnál is. Bár a RP-HPLC felbontóképessége gyengébb, mint például a MALDI-TOF-é, ennek ellenére mégis a legelterjedtebb metodika napjainkban az egyes búza polipeptidek mennyiségének meghatározására. RP-HPLC alkalmazásával a gliadin frakció fehérjéi is elválaszthatók ω -, α/β , és γ - gliadinok elkülönítésével, de az egyes csúcsok sokszor átfednek, alapvonalig nem választhatóak el. A módszer alkalmas az egyes HMW glutenin alegységek azonosítására is elúciós sorrendjük alapján valamint lehetséges vele valamely HMW-GS-t túlexpresszázó fajtát azonosítani, illetve az x/y és HMW/LMW típusú fehérjék arányát meghatározni (4.21. ábra). További analitikai feladatot ad, hogy az LMW-GS polipeptidek egyes alléljeit a futtatásban átfedő csúcsok nagy száma miatt egyénileg azonosítani nem lehet, ezt inkább más analitikai eljárásokkal végzik. A RP-HPLC másik napjainkban egyre gyakrabban alkalmazott felhasználási területe a búzafehérjék proteolitikus emésztése során kapott peptidkeverékek elválasztása és tömegspektrométerrel történő azonosítása („fingerprinting”). Ez a metodika a jövőben általános módszer lehet a különféle élelmiszerek sükértartalmának meghatározására.



4.21. ábra. Sikérfehérjéken belül a glutenin frakció összetételének mennyiségi jellemzése: a HMW / LMW gluteninek aránya, Dy, By, Dx, Bx, Ax HMW glutenin alegységek mennyiségi aránya a totál gluteninhez képest (módszer: RP-HPLC).

Minőségi paraméterek becslése közeli infravörös spektroszkópiával (NIR) őrleményből:

Mérés elve

A közeli infravörös spektroszkópia az infravörös fény abszorpciójának vagy transzmittanciájának mérésén alapuló gyorsvizsgálati módszer. A készülék segítségével előkészítés nélkül, roncsolásmentesen megbecsülhető számos paraméter, melynek nagy jelentősége van különösen a nemesítés korai szakaszaiban, amikor még kis magmennyiség áll rendelkezésre. Gabonafélék esetén a legpontosabban, olyan beltartalmi paraméterek becsülhetők meg, mint a nedvesség vagy a fehérje tartalom, de készítenek kalibrációt a nedves-sikér, a liszt vízfelvétel vagy a sütőipari minőséget jellemző Zeleny szedimentáció meghatározása céljából is. A készülék kalibrációját készíthetik a helyi labor kémiai méréseire alapozva, de léteznek központilag elkészített nagy mintaszámra épülő globális kalibrációk is.

Mérés menete

Perten Inframatic 8611 készülék menüjében ki kell választani az analizálandó frakciót (liszt vagy őrlemény). A mintatartóba körülbelül 10-15 gramm alaposan összekevert liszt vagy őrlemény mintát kell bemérni. A készülékhez adott mintatömörítővel a minta tömörítése következik majd egy egyszerű gombnyomással megtörténik az analízist, mely után az eredmény megjelenik a kijelzőn.

Mért adatok

- Nedvesség tartalom %
- Fehérje tartalom %
- Sikér tartalom %
- Zeleny szedimentáció (ml) utal a várható kenyértérfogatra

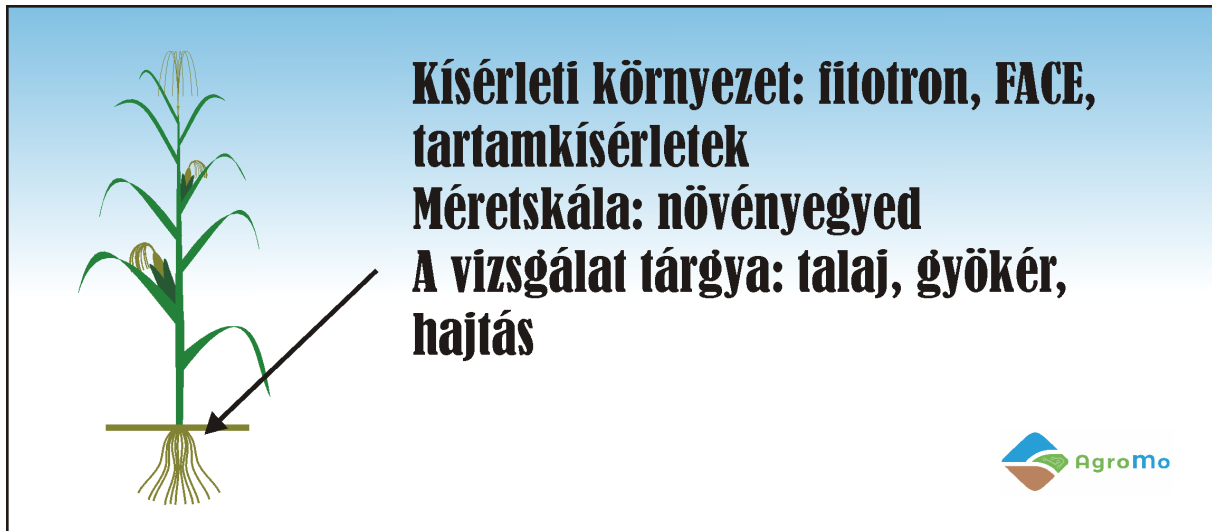
- Liszt vízfelvétel % utal a sütőipari minőségre, szemkeménységre, gazdaságos felhasználásra.

A forgalomban kapható Romer G12-es, illetve R-Biopharm R5 antitestet tartalmazó ELISA méréseket az MTA ATK Mezőgazdasági Intézet (MGI), Alkalmazott Genomikai Osztályán kerülnek kivitelezésre. A liszt nedvesség-, fehérje-, és sikértartalmat, Zeleny liszt vízfelvételi százalékot közeli infravörös spektroszkópiával (NIR) mérjük. A glutenin/gliadin, albumin/globulin arányokat méretkizárásos kromatográfiával (SE-HPLC), a sikefehérjéken belül a glutenin illetve a gliadin frakció összetételének mennyiségi jellemzésére fordított fázisú kromatográfiát (RP-HPLC) használunk az MTA ATK Mezőgazdasági Intézet (MGI) Kalászos Gabona Nemesítési Osztályán.

Várható eredmények

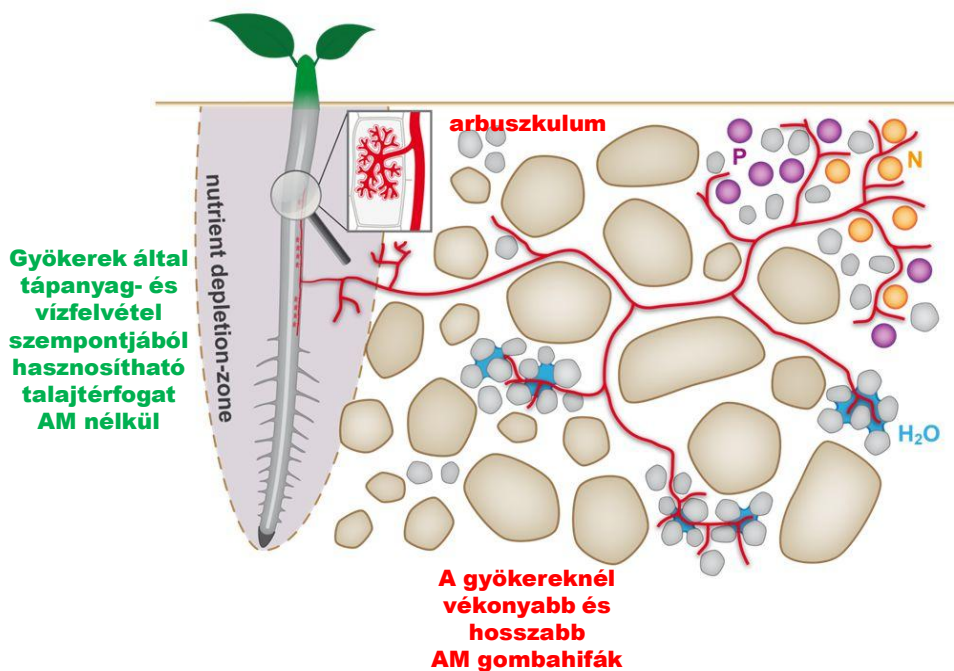
A vizsgált búza genotípusok stressztűrő képességének felderítése. A toxikus fehérje tartalomváltozásának tisztázása a különböző környezeti hatásokra, megtartják-e a gabonák káros epitóp tartalmukat a klímaváltozással összefüggő szélsőséges helyzetekben is vagy a jövőben ezen fehérjék emelkedésére kell számítanunk. Ezen fehérjék egymáshoz viszonyított mennyiségének eltolódása milyen hatással van a dagasztási tulajdonságokra, illetve a sütőipari minőségre? Emellett számos tulajdonság, mint a klímaváltozás hatása a különböző genetikai háttérű kenyérbúza fajták terméshozamára, beltartalmi összefüggő paraméterek változására is fény derül. A mért paraméterek használata az AgroMo modell rendszerben lehetővé teszi a jövőben annak meghatározását, hogy adott területen milyen búza genotípusok termesztethők biztonsággal.

4.2.3. Az AM gombák szerepének vizsgálata a talaj–AM gomba–növény rendszer szénkörforgalmában



A talajmikroorganizmusok funkcionális sokfélesége kulcsfontosságú a talajok termékenysége és a talajfunkciók megőrzése szempontjából. A talaj-mikroorganizmusok körében különleges helyet foglalnak el a szimbiota, gazdanövényeikkel szoros kölcsönhatásban élő szervezetek. A legtöbb szárazföldi növény, köztük mezőgazdasági növényeink döntő többsége (gabonafélék, zöldségfélék, gyümölcsök) kölcsönösen előnyös szimbiózist képez arbuszkuláris mikorrhiza (AM) gombákkal. Az AM a legősibb és legelterjedtebb mikorrhiza típus, az endomikorrhizák közé tartozik és jellemző struktúráit a gazdanövény gyökerében képezi.

Az AM gombák szerepe leginkább a talajt behálózó hifáikon keresztül megnövekedett tápanyagfelvő felületnek köszönhető, amely akár a gazdanövények többszörös foszforfelvételében mutatkozik meg, de az AM a víz és más tápelemek felvételét is fokozza (4.22. ábra). Viszonzásként a növények fotoszintetikus termékekkel látják el a gombát. A mikorrhiza-kapcsolat révén jobb tápanyagellátottságú növények ellenállóképessége is nagyobb az abiotikus stressztényezőkkel (szárazság, szikesedés, nehézfémek) és a kórokozókkal szemben. A gombák hifahálózata hatással van a talajszerkezetre, melynek következtében javul a talaj vízmegtartó képessége és a növények vízfelvételi lehetősége. A mikorrhiza-gombákkal kolonizált gyökerek környezete (mikorrhizoszféra) mikrobiális összetétele speciális, növénynövekedést serkentő mikroorganizmusokban gazdagabb, mint a nem mikorrhizásoké. A gazdanövényekre gyakorolt kedvező hatásából kifolyólag az AM gombák talajbeni gyakoriságát, működőképességüket a talajok egészsége és termékenysége szempontjából kulcsindikátornak tekintjük. Az AgroMo projekt keretében a globális felmelegedés és a légköri széndioxid feldúsulásának, mint abiotikus stressztényezőknek a hatását vizsgáljuk a talaj–talaj-mikroorganizmusok–AM gombák–növény szimbiotikus rendszer működésére, a rendszer elemeinek komplex vizsgálatán keresztül.



4.22. ábra. Az AM gombák szerepe a növények tápanyagellátásában (<http://www.symplanta.com/> alapján módosított ábra).

Mérési protokoll a gazdanövény-arbuskuláris mikorrhiza gomba szimbiotikus rendszer elemeinek vizsgálatára

A klímaváltozás okozta abiotikus stressztényezők (légköri CO₂ növekedés és ezáltal indukált, hőmérséklet növekedés és vízhiány) hatásának és mértékének meghatározása a gazdanövény-arbuskuláris mikorrhiza gomba szimbiotikus rendszer elemeinek funkcionalitására.

A szakirodalomra pontosító, kiegészítő és új eredményeket várunk a klímaváltozás hatásainak komplex értékelése révén: a talajkémiai, talajfizikai- és mikrobiológiai tulajdonságok, különös tekintettel a mikorrhizoszféra aktivitásában indukált változások összefüggései a növények tápelem- és vízhasznosításának változásaival, továbbá a talaj-mikrobióta-növény-légkör rendszer szénkörforgalmával.

A klímaváltozás gazdanövény-arbuskuláris mikorrhiza gomba szimbiotikus rendszer elemeinek funkcionalitására gyakorolt hatásának becslésére leginkább alkalmas mutatók meghatározása és mérése modell input számára.

Növényeken mért paraméterek:

in situ nem destruktív módszerek

Szárátmérő

Fotoszintetikus apparátus működésének vizsgálata (SPAD, klorofill fluorometer Fv/Fm)

destruktív módszerek alapján mért mutatók

AMF kolonizáció mérése

Enzimaktivitás mérés, anyagcseretermékek vizsgálata

Gyökérmorfológia vizsgálat

Rizoszféra talajból történő mérések

MicroResp™ mikrobiális közösség funkcionális diverzitásvizsgálata szubsztrátindukált respiráció mintázat alapján

Glomalin vizsgálat, AM gombák extrardikális hifahálózatának indirekt meghatározására

Szárátmérő: kukorica növény növekedésének monitorozására alkalmas egyszerűen mérhető paraméter. Különösen fiatal növényeknél informatívabb lehet a biomassza értéknél is. A szár keresztmetszetét digitális tolómérővel mérjük a legalsó levél alatt, maximum a talajtól 10 cm-re. A kukorica enyhén lapított szárán két értéket olvasunk le, a legszélesebb és legkeskenyebb átmérőt.

SPAD: A levelek roncsolása nélküli *in situ* klorofilltartalom meghatározásra alkalmas eszköz (4.23. ábra). A készülék a klorofill abszorbanciát méri egy egységnyi felszínen, két hullámhosszon (vörös és közeli infravörös tartományokban) és ebből képez egy SPAD értéket, ami egyenesen arányos a klorofilltartalommal. A klorofilltartalom szorosan összefügg a levelek tápanyagtartalmával és ezért jó indikátora a növények tápanyag ellátottságának, valamint élettani állapotának és így közvetve összefügg a mikorrhiza funkcionalitásával is. Kezelése gyors és egyszerű: a levélen kiválasztott szegmenshez illesztjük a mérőfejet, amelyen található a 2x3 mm-es mérési felület. A mérőfejet ezután a fogadóablakhoz nyomva kialakul a lesötétített mérési ablak, ahol rögtön megtörténik a mérés, amelynek eredménye a műszer kijelzőjén leolvasható. A mérést a legfiatalabb kifejtett levélen végezzük (kukorica esetén), a végső érték az adott levélen mért 10 egyedi mérés átlaga. A pályázat keretében CCM-200 plus Chlorophyll Meter (ADC BioScientific Ltd.) terepi klorofill-mérő készülék beszerzését tervezzük.



4.23. ábra. Kukorica levél klorofil-tartalmának mérése SPAD-dal

OS-30p+ hordozható klorofill fluorométer: A fotoszintézis fény szakaszának jellemzésére, roncsolásmentes mérésre alkalmas eszköz. Mért paraméter: F_v/F_m : a változó és maximális fluoreszcencia aránya. Az F_v/F_m érték a leggyakrabban alkalmazott és publikált klorofill fluoreszcencia paraméter. Értéke jellemzően összefügg a II. fotorendszerre ható stresszhatások mértékével és a szénasszimilációs rátával, ezért a növények stressz-állapotának általános jellemzésére alkalmas. Mérés előtt egy speciális csipesz segítségével a mérendő felületet pár percig sötétben adaptáljuk, majd a műszer mérőfejét beillesztve a csipesz

megfelelő nyílásába elvégezzük a mérést, amelynek során egy specifikus telítési fényintenzitás alkalmazásával rögzítjük a fluorszcencia változását és meghatározzuk annak paramétereit.

AMF kolonizáció: az arbuskuláris mikorrhiza-gombák a hajtásos növények nagy részével szimbiózist képeznek, és jelentős szerepük van a talaj-növény tápanyagforgalomban. A mérés során kezelésként 3 reprezentatív növény gyökérrendszeréből átlagmintát képezünk, a gyökereket megfestjük (Phillips és Hayman, 1970) és 30 db 1 cm-es gyökérszegmenseket mikroszkóp alatt megvizsgálunk (10-200X). A gyökérszegmenseket a kolonizáció mértéke és az arbuskulumok (növény-gomba interface a kétirányú transzportfolyamatok lebonyolítására alkalmas gombastruktúrák) mennyisége alapján kategóriákba soroljuk (4.24. ábra).

A szénhidrát anyagcsere jellemzése többféle enzim aktivitásának és anyagcseretermék mennyiségének vizsgálatával:

- Rubisco enzim mennyiségének meghatározása: RuBisCO ELISA Kit (OKCA00374, BIODASZTEL). Kit Reproducibility: Mean Intra-Assay Precision %CV: < 10% (n = 20) (Megjegyzés: a Rubisco enzim mennyisége a Biome-BGCMuSo modell paraméterezéséhez alapvető fontosságú)

- Natív és részlegesen hidrolizált keményítő mennyiségének enzimatis UV abszorpciós meghatározása: R-Biopharm Starch Assay (10207748035, R-Biopharm Hungary Kft.)

- Glükóz, fruktóz és szaharóz mennyiségének enzimatis UV abszorpciós meghatározása: R-Biopharm Sucrose/D-Glucose/ D-Fructose Assay (10716260035, R-Biopharm Hungary Kft.)

- Glikolsav-oxidáz enzim aktivitásának meghatározása spektrofotométerrel színreakcióval. A glikolsav-oxidáz a fénylégzés egyik kulcsenzime.

Talaj mikrobiális és gomba életközösségek jellemzése metabolikus mintázat alapján:

- Talajgomba közösség jellemzése a metabolikus mintázat alapján: Biolog FF MicroPlate (GEN II for Filamentous Fungi, Cat.No. 1006, Ferol Kft.)

- Mikrobiális közösségi szintű élettani profil: Biolog ECO MicroPlate (Cat.No. 1506, Ferol Kft.)

Gyökérmorfológiai vizsgálatokat (gyökérhossz, felület, átmérő) a projekt keretében beszerzésre kerülő WinRHIZO (Regent Instruments Inc.) a kimosott és megtisztított gyökerek szkennelését követően képanalizálás elven alapuló készülékkel tervezzük elvégezni (http://regent.qc.ca/assets/winrhizo_about.html).

A mikrorespirációs mérés eredménye egy, az adott talajmintára jellemző katabolikus ujjlenyomat, amely a mikrobiális közösség fiziológiai profiljáról ad információt. A módszer előnye, hogy direkt módon a talajból mérhető, viszonylag gyorsan, számos különböző szerves szubsztrát hasznosíthatósága. A szubsztrátok bontása során képződött CO₂ mennyisége utal az adott talajban élő mikrobiális közösség kondíciójára, aktivitására, a biomassza nagyságára. A módszer segítségével nyomon követhető, hogy a talaj milyen mértékben képes különböző stresszhatásokat tolerálni, pl. szennyezések, szárazság, tápanyaghiány stb.

A mikrorespirációs mérést szitált (kb. 2 mm szemcseméretű), a talaj víztartó képességének kb. 40%-ára beállított nedvességtartalmú talajmintákból végezzük el. A talajmintákból kb. 70-70 g-t adagoltunk ki egy-egy 96 lyukú, mélyített mikrotiter lemezbe (kb. 0.73 g talaj/lyuk), aerob gázteret biztosítva a lyukakban a talaj fölött. Egy hét inkubációt követően az egyes lyukakba 23 különböző szubsztrátot (pl. cukrok, aminosavak) adagolunk 4-4 ismétlésben, desztillált víz kontroll mellett. Az adott talajmintát tartalmazó lemezt ezt követően felül egy detektor mikrotiter lemezzel zárjuk le, amely agar gélben bikarbonát só és krezolvörös indikátort tartalmaz, és amelyet előzőleg CO₂ mentessé tettünk. A lezárt lemezeket 5 órán keresztül 25°C-on inkubáljuk, ezalatt a szubsztrátok lebontásából képződött CO₂ a detektor lemezben reagál a bikarbonát-ionnal, csökken a pH és így az indikátor színe rózsaszínről sárgára változik (4.25. ábra).

Glomalinfehérjék vizsgálata (Glomalin Related Soil Proteins=GRSP): A glomalin, illetve a glomalinhoz kapcsolódó fehérjéket (GRPS=Glomalin-Related Soil Proteins) az AMF extraradikális hifák bocsájtják ki a talajba. Ezek mennyiségét vizsgáljuk Bradford (1976) alapján. Ezen mérés szerint a Coomassie Brilliant Blue festék reagál a kivonatban található fehérjével és így abszorbanciájának maximuma eltolódik. A glomalinfehérjék könnyen kinyerhető frakciójának (Easily Extractable Glomalin=EEG) vizsgálatához homogenizált talajmintákból ~1-1 g-ot összekeverünk 8 ml 20 mM Na-citrát ($C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2 H_2O$) pufferrel (Wright and Upadhyaya, 1998). Autoklávozzuk fél órát 121 °C-on, majd centrifugáljuk 15 percig 5000 g-n és a felülúszót egy új csőben 4 °C-on tároljuk a mérésig. A méréshez adott mennyiségű, pl. 500 µl mintát egy 3-5 ml-es csőbe vagy osztott kémcsőbe mérünk és hozzáadunk szintén meghatározott mennyiségű, pl. 2,5 ml Bradford reagenst és vortexeljük. Öt perc inkubálás után megmérjük az abszorbanciát 595 nm-en.

Szárátmérő: a két szárátmérő adatból ovális szárkeresztmetszetet feltételezve számoljuk ki a szár keresztmetszetének felületét cm^2 -ben. A mérés pontatlansága jellemzően 0,5-1mm, ami a szárkeresztmetszet felületében átlagosan 5% hibát eredményezhet.

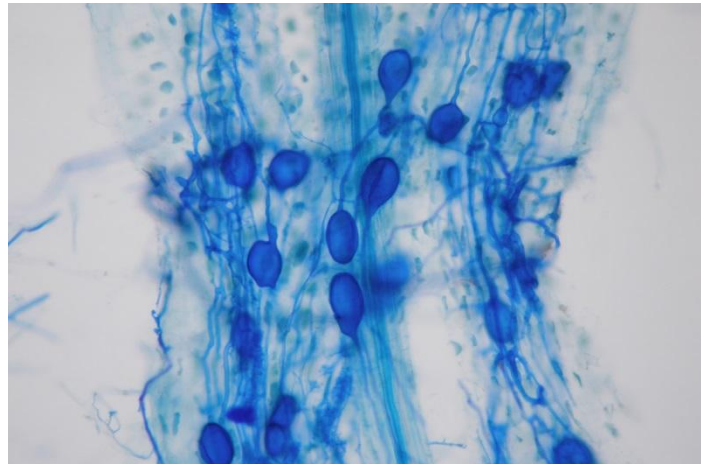
A SPAD értékek mértékegység nélküli értékek, amelyek egyenesen arányosak a levél felületegységre eső klorofilltartalmával (g/cm^2) és a legtöbbször annak megfelelően értékelik. Értéke normális hőmérséklet és páratartalom viszonyok között 0 és 50 között változik, a mérés gyártó által leírt megbízhatósága (accuracy) ± 1.0 SPAD érték. A mérés bizonytalansága nehezen becsülhető, a tervezett mérések során az adott növényfajra ez meghatározható lesz.

OS-30p+ hordozható klorofill fluorométer: Az Fv/Fm érték egy arányszám, így mértékegysége nincs. Értéke normál esetben, nem stresszelt növényenél 0,79-0,84 között található. A mérés bizonytalansága nehezen becsülhető, a tervezett mérések során az adott növényfajra ez meghatározható lesz.

AMF kolonizáció: a növényenként 30 gyökérszegmensre becsült értékek alapján állapítjuk meg a gyökérrendszer érintettségét, azaz a gyökérszegmens hányada kolonizált a mikroszimbionta gomba-partnerrel, illetve milyen mértékben tartalmaz transzport-folyamatokhoz elengedhetetlen arbuszkulum képleteket. Az eredményeket %-ba adjuk meg, azaz a gyökérrendszer hány %-a tartalmaz gombaképleteket-M% illetve arbuszkulumokat-A% is (Trouvelot et al., 1986) (4.24. ábra). A mikorrhizációs kolonizáció becslés módszertanának bizonytalansága számos forrásból eredhet:

- A gyökérrendszer mintázása
- A festett gyökérmintából a mikroszkópos vizsgálathoz a gyökérszegmensek kiválasztása
- A becslés (osztályokba sorolás) szubjektív és egyszerűsít
- „Más szem más lát” – a megfigyelők közötti különbségek

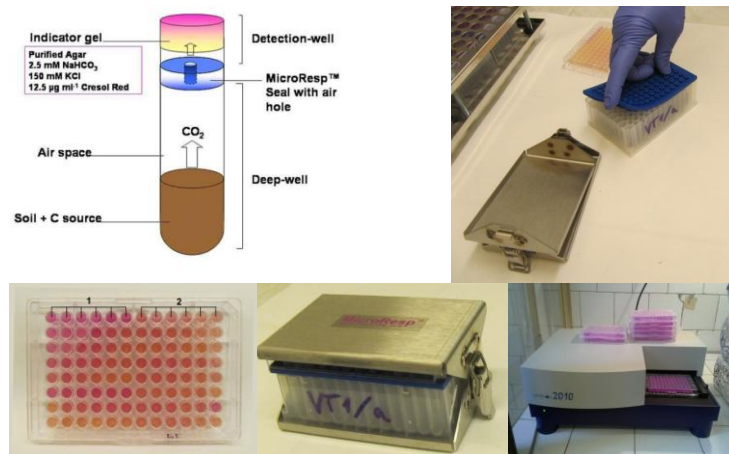
Ezek szórása rendszerint 5-15 százaléktértek között mozog (Füzy et al., 2015), összesítve pedig M% esetén 8-10 százaléktértekre, míg A% esetén átlagosan 10-12 százaléktértekre becsüljük.



4.24. ábra. AM gomba képletek (hifák, vezikulumok és arbuszkulumok) festett gyökérben.

Mérések elve és mért eredmények számítása a glomalin és MicroRespTM mérésekhez hasonlóan történik, a gyártó által megadott protokollok alapján.

Mikrorespirációs mérés kiértékelésekor a színváltozás mértékét detektáljuk: az inkubáció kezdetén és végén, 570 nm-en mért abszorbanca értékek különbsége adja az eredményt (4.25. ábra).



4.25. ábra. Mikrorespirációs mérés elméleti háttere és eszközei.

Glomalinfehérjék vizsgálata: ismert koncentrációjú BSA oldatokat Bradford reagenssel keverünk össze (standard sor). A BSA standardek abszorbancia-koncentráció adataira egyenest illesztünk és az egyenes egyenletéből számolunk vissza a minták koncentrációjára. A koncentrációból a kinyerés összterfogata és a kiindulási tömeg segítségével számoljuk ki a glomalin mennyiségét, amit µg/ml mértékegységben adunk meg. A mérés bizonytalanságára vonatkozó mérések folyamatban vannak.

MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

2017-ben a Martonvásáron az ún. 1.6-os tartamkísérletben (1955/1975; osztott parcellás klasszikus NPK hiánykísérlet istállótrágyával és anélkül) vizsgáltuk az Mv Tarján nevű középérésű (FAO 380) hibridkukorica fajtát. A tervek szerint a fent nevezett fajta kerül vetésre a további kísérleteinkben. Vizsgálatok célja az AMF gyökérkolonizáció alakulásának vizsgálata a növény fejlődésének 4 leveles, virágzási és termésérési fázisában és az AMF kolonizáció (intraradikális kolonizáció vizsgálata és extraradikális hifahálózat indirekt mérése talajból gomalintartalom alapján) alakulása talajok tápanyagtartalmától függően, továbbá egyes növényparamétereknek összefüggései a fentiekkel (SPAD, szárátmérő).

1.6-os tartamkísérlet kezelései

A = műtrágya (évente)

B = műtrágya (évente) + istállótrágya (4 évente 40 t/ha)

Istállótrágyázás:

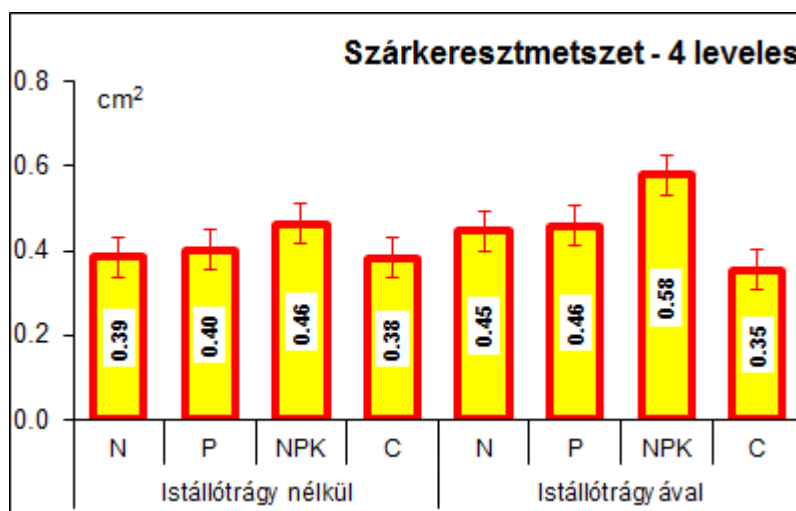
4 éves ciklusok első évének őszen, legutóbb 2015-ben.

4 éves ciklusok növényi sorrendje:

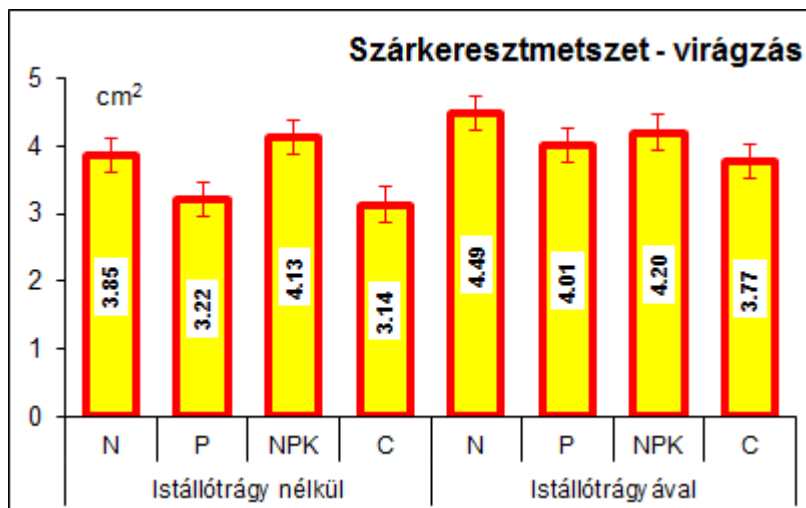
Kukorica – **kukorica** (2017) – búza – búza

Műtrágya kezelés	N kg/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	K ₂ O kg/ha
1. NITROGÉN	160	0	0
2. FOSZFOR	0	80	0
6. NITROGÉN-FOSZFOR-KÁLIUM	160	80	80
12. KONTROLL	0	0	0

Eredmények - szárkeresztmetszet: az ábrákon az 1.6-os trágyázási tartamkísérletből mért eredmények láthatók a kukorica növény 4 leveles állapotában és virágzáskor mérve (4.26-27. ábra): a korábbi fejlődési stádiumban elsősorban az NPK műtrágya pozitív hatása látható, míg a virágzáskori állapotnál a nitrogén műtrágyák mellett az istállótrágya hatása is megmutatkozik.

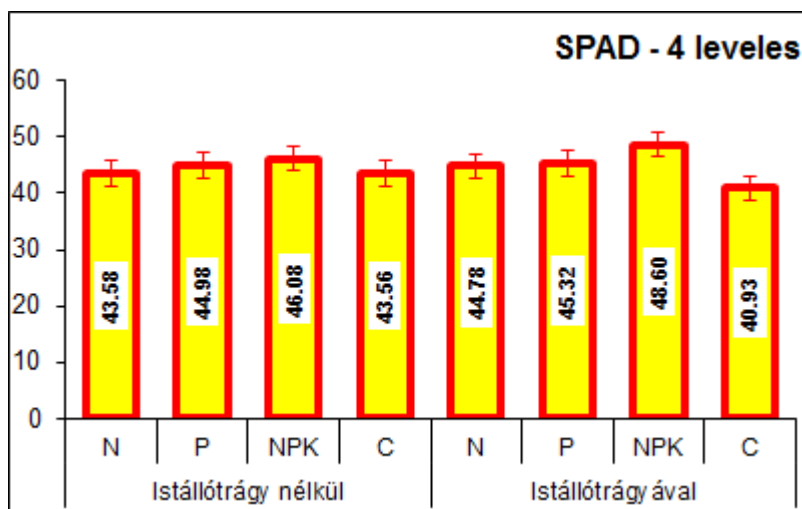


4.26. ábra. Kukorica szárkeresztmetszet alakulása tápanyagkezeléstől függően 4 leveles fenofázisban.

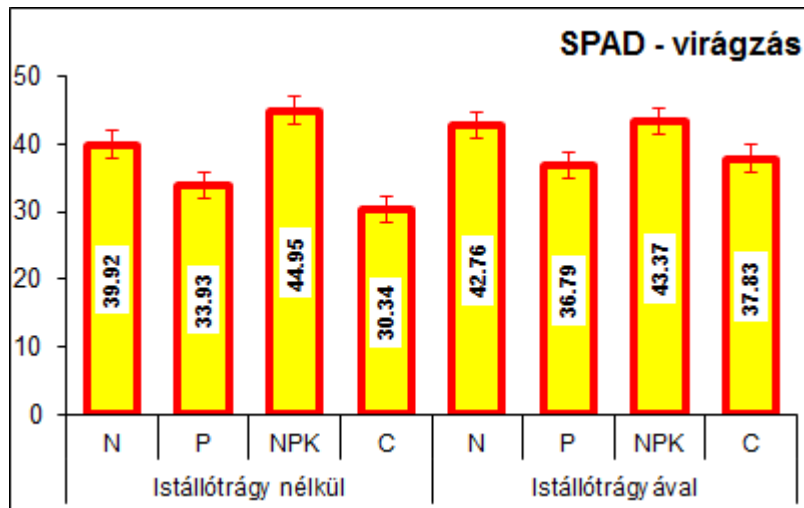


4.27. ábra. Kukorica szárkeresztmetszet alakulása tápanyagkezeléstől függően virágzás fenofázisban.

Eredmények – SPAD értékek: az ábrákon az 1.6-os trágyázási tartamkísérletből mért eredmények láthatók a kukorica növény 4 leveles állapotában és virágzaskor mérve: a SPAD értékeknél szintén az NPK műtrágyák korai, míg a nitrogén műtrágya és az istállótrágya virágzaskori hatása figyelhető meg (4.28-29. ábra).



4.28. ábra. A kukorica levelek SPAD értéke a talajok tápanyag-ellátottságától függően, 4 leveles fenofázisban.



4.29. ábra. A kukorica levelek SPAD értéke a talajok tápanyag-ellátottságától függően, virágzás fenofázisban.

Eredmények-AMF kolonizáció és glomalin: a gyökérminták és talajminták még feldolgozás alatt vannak.

Glomalin mérés – korábbi eredmények: Lásd a 4.30. ábrát.



4.30. ábra. A. ábra: BSA standard sor Bradford reagenssel keverve - minél kékebb színű, annál magasabb az oldat fehérjetartalma. B. ábra: Szikes talajokból készült GRSP kivonatok - a barna szín a talaj humusz és glomalin-tartalmától is függ. C. ábra: Szikes talajokból készült GRSP kivonat Bradford reagenssel keverve. Szemmel is jól látható a különbség a fehérjetartalmakban.

4.2.4. Eddy-kovariancia mérések



Az eddy-kovariancia (angolul eddy covariance; rövidítve EC) mérés technika jelenleg a legelterjedtebb direkt árammérési módszer, ami a különböző ökoszisztémák és a légkör közötti kicserélődés (pl. energia, vízgőz, szén-dioxid, dinitrogén-oxid) számszerűsítésére szolgál. A módszer lényege, hogy nagy időbeli felbontásban (5-10 Hz) mérjük a szélességet valamint a kérdéses mennyiségek koncentrációját. A fluxus, vagyis az időegység alatt felületegységen átáramló anyag mennyisége pedig a vertikális szélesség és a megfelelő koncentráció kovarianciájaként számítható. A fluxusokat általában másodpercre vetítve, egy félóra átlagában szokás megadni. A hőmérséklet adatokból a szenzibilis hőáram, a vízgőz koncentráció adatokból a látens hőáram, a szén-dioxid koncentrációból pedig a szén-dioxid turbulens fluxusa származtatható. A szenzibilis és a látens hőáram egyrészt az ökoszisztémák energiaháztartásáról ad felvilágosítást, másrészt viszont a látens hőáram megfeleltethető az evapotranszpirációnak, vagyis a párologtatásnak. A szén-dioxid áram az ökoszisztéma által kibocsátott és megkötött CO₂ mennyiségét adja meg, amit az angol mintára (Net Ecosystem Exchange, röviden: NEE) nettó ökoszisztéma szén-cserének is szoktunk nevezni. Az NEE felbontható a fotoszintézishez köthető bruttó primer produkcióra (angolul: Gross Primary Productivity, röviden GPP), illetve az ökoszisztéma légzésre (R_{eco}).

Az eddy-kovariancia mérőállomáson a turbulens fluxusok mérésén túl, környezeti változók (pl.: hőmérséklet, relatív nedvesség, csapadék, globál sugárzás, talajhőmérséklet, talajnedvesség) mérése is történik, szintén félórás felbontásban.

Az eddy-kovariancia mérések pótolhatatlan adatokat szolgáltatnak az ökoszisztémák szénmérlegének vonatkozásában. Lényegében az EC technika elterjedése tette lehetővé, hogy a mai korszerű biogeokémiai modelleket, illetve Earth System (föld rendszer) modelleket kifejlesszék és elfogadható módon validálják.

A világszerte eddig létesített és fenntartott EC állomások, illetve hálózataik adatainak elemzése során igazolódott, hogy:

1. az állomások száma az egyes ökoszisztéma típusokban általában kevés ahhoz, hogy a modellezés információigényét – a bizonytalanságok elfogadható szintre csökkentése mellett – kielégítse. A hiátus jelentős részben a térbeli ismétlések elégtelen számából fakad.
2. a folyamatosan fenntartott mérések időtartama általában nem elégséges ahhoz, hogy az időjárás változékonyságára adott válaszokat – pl. az NEE interannuális variabilitásának hátterét – modellekbe építhetően a bizonytalanság elfogadhatóan alacsony mértéke mellett vizsgálhassuk.

3. A fenti – a mérések térbeli és időbeli kiterjesztését indokló – megállapítások után megjegyzendő, hogy a közelmúltban közölt, a bioszféra vészreakcióit (trópusi vegetáció gigantikus méretű CO₂ kibocsátása a klímaváltozás hatására, műholdas légköri CO₂ mérések eredményei) mutató válaszok háttére többtényezős az egyes komponens-folyamatok súlyát illetően (a különböző érintett területeken különböző folyamatok felelősek az említett óriási kibocsátásért). Az egyetlen esély arra, hogy megbízhatóbb predikcióink legyenek a modellek tökéletesítése, amelyek – a szakirodalom egyes meghatározó forrásai szerint – eddig alkalmazott szemléletükben (így struktúrájukban és működésükben) is valószínűleg lényeges változás elé néznek. Ennek eldöntése az események fényében sürgető kérdésnek tűnik, illetve ez is rávilágít arra, hogy a modellek fejlesztéséhez és validálásához szükséges adatbázisok tér és időbeli reprezentativitása kritikusan fontos.

4. Minden rendelkezésre álló, az ökoszisztémák működését a jellemző földhasználat és művelésmód mellett leíró adat modellekbe történő építése szükséges – sajnos nem állítható hogy elégséges – ahhoz, hogy a predikciók értékét jelenleg nagyban devalváló bizonytalanságok csökkenthetőek legyenek.

Az eddy-kovariancia mérőállomások a modellezési feladatok szempontjából kettős szerepet játszanak, egyrészt a környezeti változók bemeneti változói a Biome-BGCMuSo modellnek, míg a mért áramok (evapotranszspiráció, NEE, GPP, R_{eco}) a modell kalibrálásában és validációjában játszanak fontos szerepet.

Mérőhelyek Martonvásár közelében

A GINOP projekt keretében létesítendő eddy-kovariancia állomásokat két mezőgazdasági művelés alatt álló területre kívánjuk telepíteni, Kajászó illetve Pettend közelében (4.31. ábra).

Az eddy-kovariancia adatok feldolgozásának menete

1. Adatgyűjtés

Az eddy-kovariancia állomások adatgyűjtőjének programozása a Campbell Scientific LoggerNet® keretprogramjában CRBasic programnyelven. A szónikus anemométer (GILL HS-50) és az infravörös gázanalizátor (Li-7200) méréseinek mintázása 10 Hz-en történik, a nyers adatokat a program közvetlenül a memóriakártyára menti. A környezeti változókat 10 másodpercenként mérjük, majd félórás átlagok, illetve összegek formájában kerülnek mentésre a memóriakártyán.



4.31.ábra. Az eddy-kovariancia mérések helyszínéül választott mezőgazdasági parcellák műhold fotója (Google Maps) és szintvonalas térképe.

4.3. táblázat. Az eddy-kovariancia mérőrendszerekkel mért mennyiségek, mértékegységeik, a méréshez használt szenzorok, továbbá a tervezett mérési szintek.

Mennyiség	Mérték-egység	Szenzor	Mérési szintek
Közvetlenül mért változók			
hőmérséklet	°C	CS215	3
relatív nedvesség	%	CS215	3
csapadék	mm	SBS500H	1
sugárzási egyenleg (a 4 komponens külön)	W m ⁻²	CNR4	1
beérkező, visszavert PAR	μmol m ⁻² s ⁻¹	Li-190R	1
felszín hőmérséklet	°C	IR100	1
talajhőáram	HFP01SC		1 szinten, 4 db nyílt terület, ill. állomány alatt
talajhőmérséklet	°C	PT100/3	10, 35, 75, 150 cm mélyen a modell szintjeihez igazodva, ill. 5 és 15 cm mélyen intercepció méréshez (2db, nyílt/állomány)
talajnedvesség	%	CS616	10, 35, 75, 150 cm mélyen a modell szintjeihez igazodva, ill. 5 és 15 cm mélyen intercepció méréshez (2db, nyílt/állomány)
CO ₂ koncentráció profil	ppm	Li-840A	7 szinten,
CO ₂ tárolási tag	μmol m ⁻² s ⁻¹	Számított (Li-840A)	1
u, v, w	m s ⁻¹	GILL HS-50	1
szónikus hőmérséklet	°C	GILL HS-50	1
CO ₂ koncentráció	mmol m ⁻³ ; ppm	Li-7200	1
H ₂ O koncentráció	mmol m ⁻³ ; mmol mol ⁻¹	Li-7200	1

2. Az adatok előkészítése az EDDYPRO® számára

Az adatgyűjtő a 10 Hz-es adatokat egy fájlba menti, ezeket félórás adatszeletekre bontjuk.

A környezeti változók adatsorait ellenőrzés után megfelelő formátumúvá (a változók nevei a fejlécben kötöttek, CSV formátum) alakítjuk.

3. Fluxusszámítás EDDYPRO®-val beállítások:

- Angle of attack correction
- Double rotation
- Linear detrending

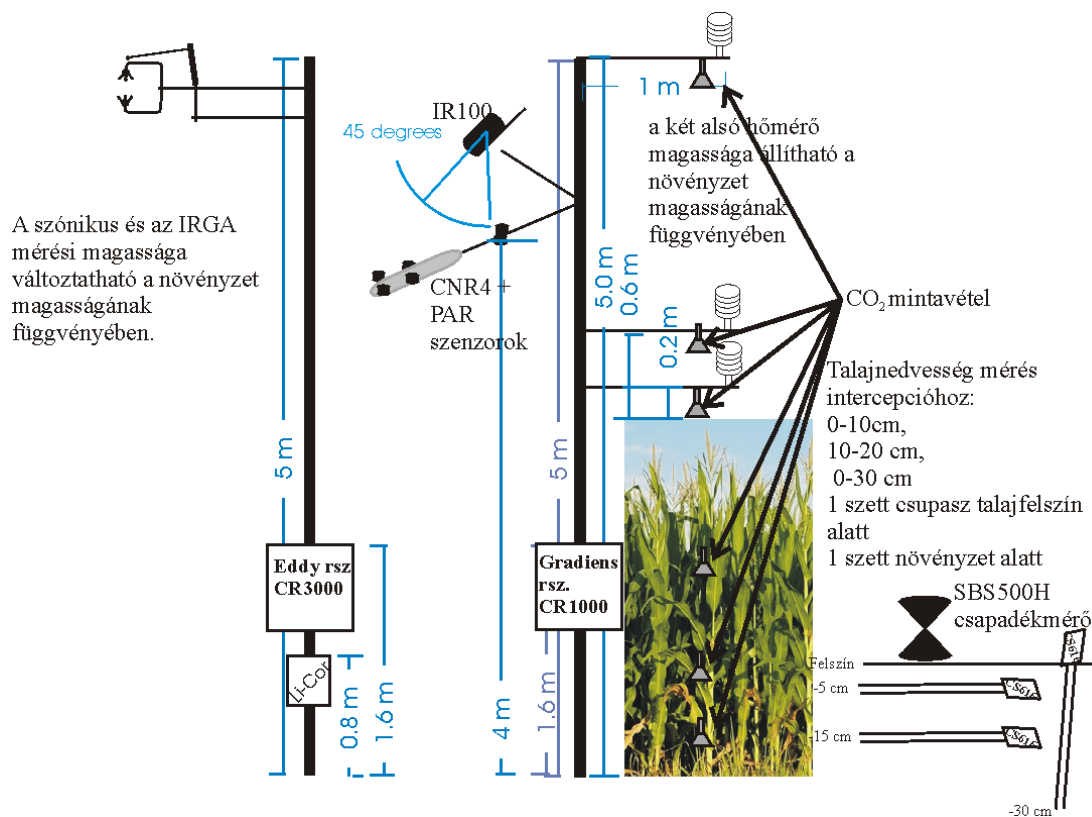
- Time lag compensation method: TBD
- Quality check: Mauder & Foken (0,1,2)
- Footprint: Kljun footprint modell

Statistical Analysis

- Vickers & Mahrt: spike removal, amplitude resolution, drop-outs, absolute limits, skewness & kurtosis

Spectral Analysis and Corrections

- Filter (co)spectra according to Vickers and Mahrt
- Filter (co)spectra according to Mauder and Foken (flag=2)
- High-pass filtering (Moncrieff et al., 2004)
- Low-pass filtering (Moncrieff et al., 1997)



4.32. ábra. A tervezett eddy-kovariancia mérőrendszer sematikus rajza

4. Szűrés

EDDYPRO® quality flag-ek + Papale et al. (2006) féle módszerrel.

5. Adatpótlás és fluxus particionálás

REddyProc (online/offline)

Napi adatsor készítése a Biome-BGCMuSo kalibrációhoz/validációhoz.

4.4. táblázat. Az eddy-kovariancia mérőrendszer legfontosabb kimeneti változói.

Számított mennyiségek			
Mennyiség	Mérték-egység	Szenzor	Mérési szintek
momentum áram	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Számított (GILL HS-50)	1
szenzibilis hőáram	W m^{-2}	Számított (GILL HS-50)	1
látens hőáram	W m^{-2}	Számított (GILL HS-50, Li-7200)	1
NEE	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Számított (GILL HS-50, Li-7200)	
Származtatott mennyiségek			
GPP	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	származtatott	1
R_{eco}	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	származtatott	1

Mérőhelyek egyéb kísérleti környezetben

A Biome-BGCMuSo új verziójának kalibrálásához, illetve eredményeinek validációjához már meglévő állomások már rendelkezésre álló és jövőben mérendő adatait is felhasználjuk. Ezek a mérőállomások a következők:

- Bugac (Kiskunsági Nemzeti Park), ahol a mérések 2002-től jelenleg is folynak a szürkemarhák által legelt homok talajú gyepen (4.33. ábra). Továbbá, 2011-2017 között egy 1 ha-os, a legelés alól kivont kaszálón szénforgalmát is monitoroztuk eddy-kovariancia módszerrel (4.34. ábra).
- 2017 őszétől működik Kartal közelében egy termékeny szántóterületre telepített eddy-kovariancia mérőállomás. A táblán 2017-ben „Farinelli” őszi búzát vetettek. A mérési adatok gyűjtése zajlik jelenleg.
- Hegyhátsál (Vas megye): itt egy felműszerezett TV adótorony segítségével 1997 óta mérik folyamatosan jelen projekt résztvevői egy vegyes mezőgazdasági terület szén- és vízmérlegét. 2015 nyarától N_2O fluxusmérés is zajlik, ami egyelőre az egyetlen adatgazdag mérési adatsor, ami alkalmaz a Biome-BGCMuSo model nitrogén-almoduljának validálására.



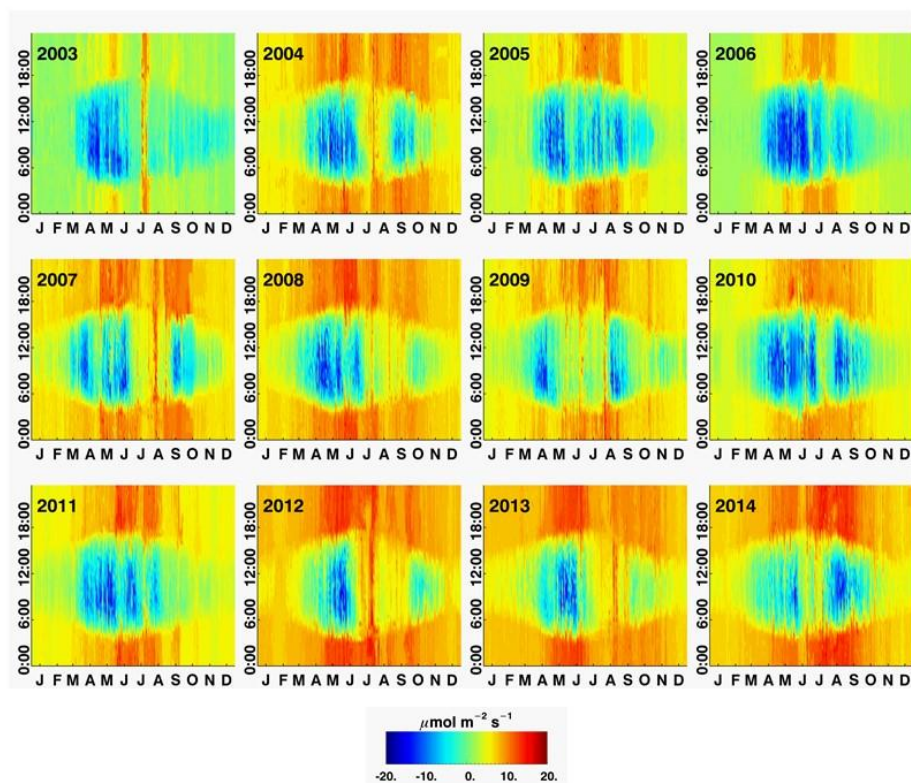
4.33. ábra. Eddy-kovariancia állomás a bugaci legeltetett területen.



4.34. ábra. A bugaci kaszált terület (jelenleg inaktív)

A várható mérési eredmények demonstrálása

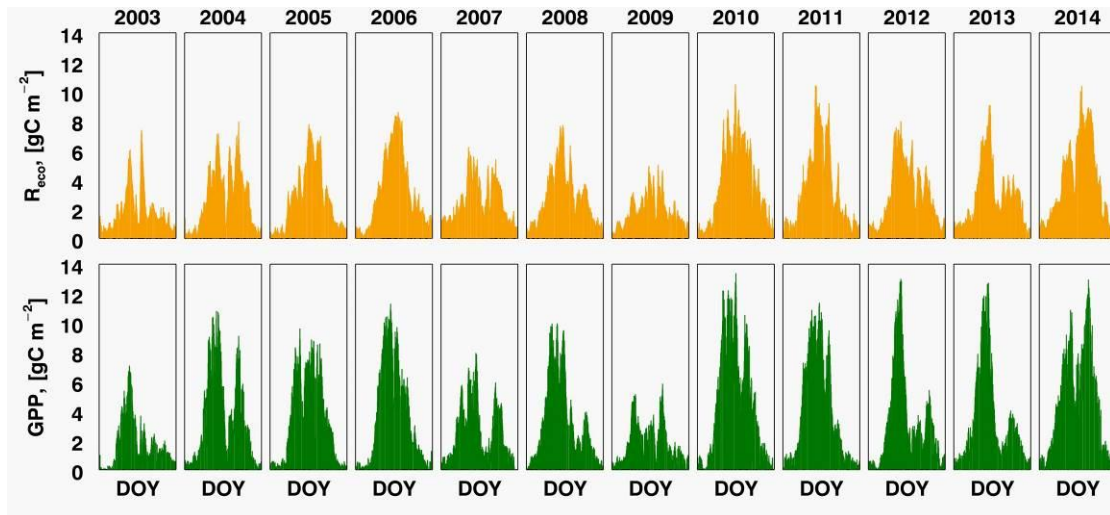
Az eddy-kovariancia mérések eredményeként nyerhető információ jellegét a már meglévő állomások adatsoraival illusztráljuk. Az eddy-kovariancia mérések közvetlen eredménye tipikusan az NEE adatsora. A mért adatsor – technikai problémák ill. szűrés (minőségbizosítás) miatt nem folytonos, azonban adapótló rutinok (pl. Reichstein et al., 2005) segítségével előállítható olyan adatsor, ahol minden egyes félórához rendelhető érték. A kapott adatsort 2 dimenzióban ábrázolva (x-tengely: napok, y-tengely: órák) az NEE napi ill. szezonális variabilitása is részletesen megfigyelhető (4.35. ábra). A GPP és a R_{eco} adatsora is ugyanilyen felbontásban állítható elő.



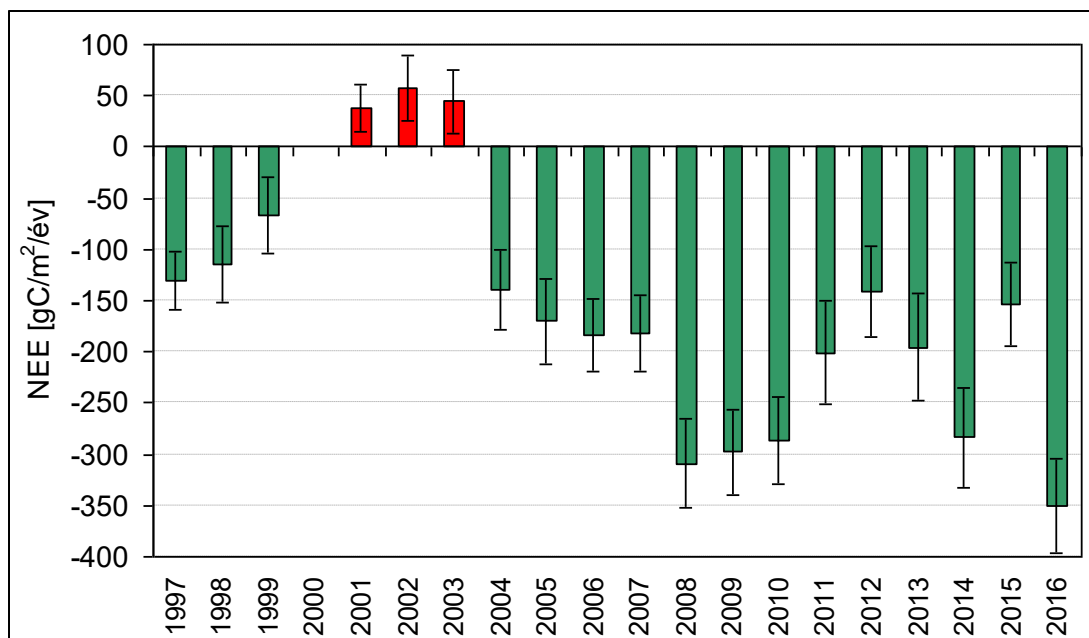
4.35. ábra. A bugaci legeltetett terület nettó ökoszisztéma szénforgalma (NEE) 2003 és 2014 között. A pozitív értékek (sárga ill. piros színnel jelölve) az ökoszisztéma CO₂ kibocsátását (légzés, respiráció), míg a negatív értékek (kékes színekkel jelölve) a felvettelt (asszimiláció, fotoszintézis) jelentik.

Az információ aggregáláshoz napi illetve éves összegeket számítunk. A bugaci referencia területen mért GPP és R_{eco} napi összegeit az 4.36. ábra mutatja. Definíció szerint, mind a GPP, mind a R_{eco} előjele pozitív, noha a valóságban ellentétes előjelű áramokat jelentenek. Jól látható, hogy a GPP maximuma jelentős évek közötti változékonyságot mutat, ami szintén a környezeti tényezők, főleg a csapadék ellátottság befolyásol.

A hegyhátsági vegyes mezőgazdasági terület éves NEE összegeit az 4.37. ábra szemlélteti. Az ábrázolt periódus nagy részében a terület éves szinten szénét kötött meg (negatív éves összegek), viszont 3 évben forrásként viselkedett (pozitív éves összegek), vagyis szénét veszített. Ezekben az években az időjárást hőhullám és aszály jellemezte. Az ábra szerint a hőhullám és az aszály a területek szerves anyag (széntartalom) készleteinek csökkenéséhez vezethet.

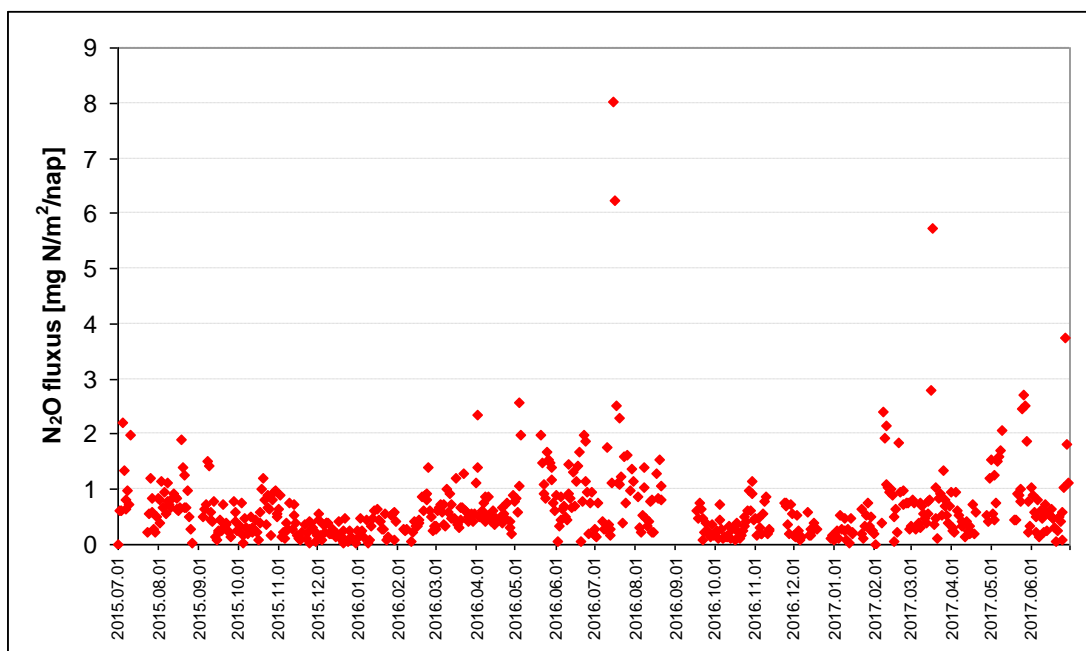


4.36. ábra. A bugaci mintaterület napi R_{eco} és GPP összegei 2003 és 2014 között.



4.37. ábra. A hegyhátsáli állomás éves NEE összegei 1997 és 2016 között. A zöld oszlopok azokat az éveket jelölik, amikor a terület CO_2 -t vett fel a légkörből meg, a pirosak pedig azokat, amikor a terület CO_2 forrás volt. 2000-ben nem volt mérés.

A hegyhátsáli vegyes mezőgazdasági terület dinitrogén-oxid kibocsátását az 4.38. ábra mutatja. A mérőrendszer 2015. július 1 óta üzemel folyamatosan, és jelen projekt részére szolgáltat pótolhatatlan adatokat.



4.38. ábra. A hegyhátsáli eddy-kovariancia rendszer által regisztrált dinitrogén-oxid emisszió a 2015. július 1 – 2017. június 30 időszakban. Az N₂O kibocsátást nitrogén-egyenértékben fejeztük ki.

4.2.5. Hagyományos mérések a tartamkísérletekben

Kísérleti környezet: tartamkísérletek
Méretskála: állomány
A vizsgálat tárgya: szemtermés, talaj tápanyagtartalma, ökofiziológia



A termesztési faktorok eltérő szintjeinek hatását a tartamkísérletekben alapvetően a hasznosított növényi részek mennyisége (szárazanyag tömeg) és azok főbb minőségi paraméterei (fehérje-, olaj-, keményítő-, sikértartalom stb.) alapján elemezzük, de a vizsgálatok kiegészülnek a növények fejlődési ütemére vonatkozó fenológiai megfigyelésekkel, növekedésanalízissel, ökofiziológiai mérésekkel (Sugár et al. 2016, 2017).

A nagy múltú tartamkísérletekben az évek során számos vizsgálat zajlott. Az összegyűjtött idősorok szinte teljes egészében alkalmasak a Biome-BGCMuSo modell kalibrálására illetve validálására. Az alábbiakban két kiragadott példán keresztül mutatjuk be a tartamkísérletekben zajló vizsgálatokat.

PÉLDÁK A TARTAMKÍSÉRLETEKBEN ZAJLÓ MÉRÉSEKRE

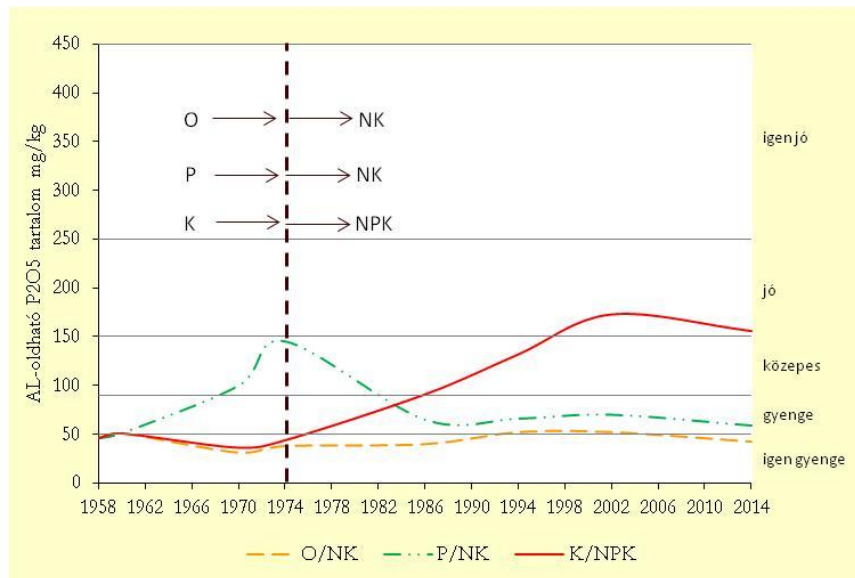
A. Lassú, nagy variabilitású ökológiai folyamatok elemzése

A területhasznosítás során bekövetkező hatások és az azok alapján kimutatható trendek egy része csak évek, évtizedek mérési adatsorainak elemzése révén számszerűsíthető megbízhatóan. A lassú hatású faktorok között tartjuk számon a tápanyag-gazdálkodást, vagyis a növénytáplálással összefüggő agrokémiai kezeléseket. A martonvásári tartamkísérletek egy része utóhatások elemzésére alkalmas, azaz korábban huzamos ideig végzett tápanyag-kezelések megszüntetése után a talaj felső zónájából el nem mozduló, ott felhalmozódott tápelemek produktivitásra gyakorolt hatását vizsgáljuk további éveken, évtizedeken keresztül.

Az 1958 őszen beállított, és 1974-ben átalakított 1.5 jelű tartamkísérletben a 16 éven keresztül végzett P-trágyázás után talajban maradt foszfor utóhatását vizsgáljuk az évenként adott friss P-műtrágya hatásával összehasonlítva, kukorica – őszi búza dikultúrában.

A talajvizsgálatok szerint (4.39. ábra) a foszforral nem trágyázott kontroll talajban (O/NK) az AL-módszerrel kimutatott P_2O_5 -koncentráció a kísérlet története során gyakorlatilag nem változott, 56 év után is igen gyenge - gyenge ellátottságot jelzett. A 16 évig 61 kg/ha hatóanyag dózissal végzett kizárólagos P-műtrágyázás (Σ 976 kg/ha P_2O_5) – miközben 50,86 t/ha kumulált szemtermést (3,18 t/ha/év) eredményezett – a talaj AL-oldható P_2O_5 tartalmát 46 mg/kg-ról 145 mg/kg-ra növelve két kategóriával javította az erdőmaradványos csernozjom talaj ellátottsági szintjét (P/NK). A P-műtrágyázás

megszüntetését követően a könnyen oldható P-tartalom lineárisan csökkent, majd 14 év után gyenge ellátottságon stabilizálódott.

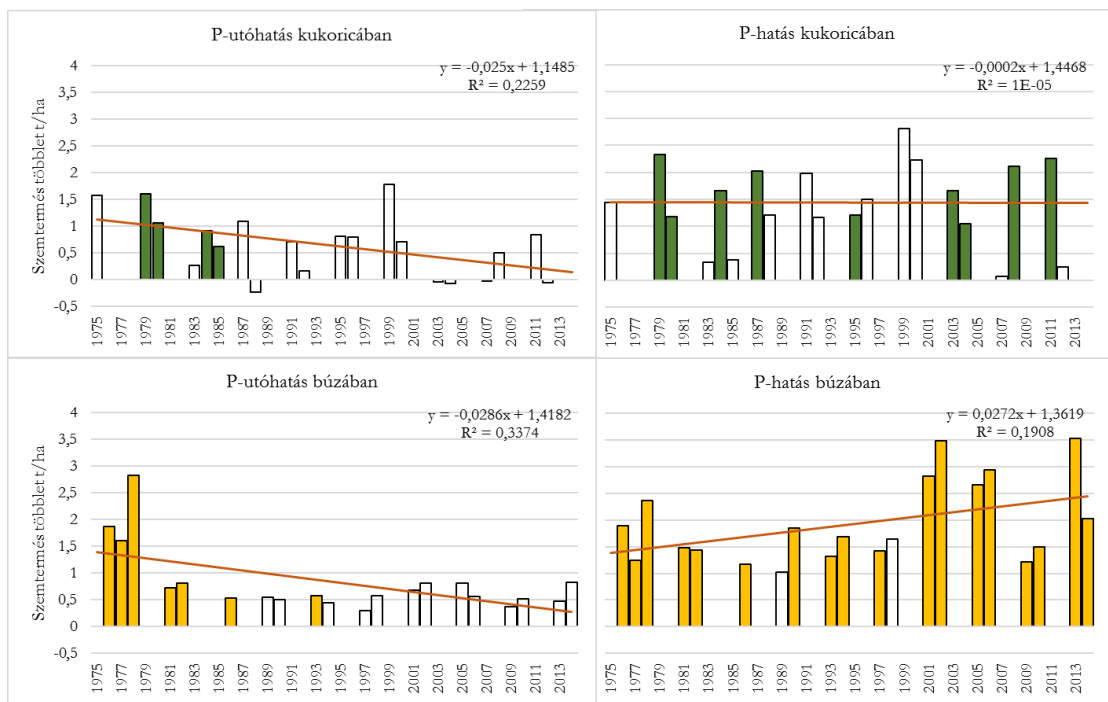


4.39. ábra. A talaj művelt rétegének AL-P₂O₅-tartalma (mg/kg) P-trágyázási tartamkísérletben. Martonvásár, 1958-2014.

A kezelések átalakítását követő 40 év (1975-2014) eredményeit a 4.39. ábra összesíti. A kumulált szemtermés a foszforral nem trágyázott kontroll kezelésben (O/NK) 172,75 t/ha (4,32 t/ha/év), az utóhatás kezelésben (P/NK) 201,63 t/ha (5,04 t/ha/év), a friss foszfort tartalmazó kezelésben (K/NPK) 241,80 t/ha (6,05 t/ha/év) volt.

A kontroll parcellákon (O/NK) a 20 kukorica kísérlet kumulált mennyisége 111,69 t/ha volt, a 20 búza kísérlet 61,05 t/ha termést adott. A P-utóhatás vizsgálatára alkalmas parcellákon ezek a mennyiségek 124,67, illetve 76,96 t/ha voltak. A P-utóhatás kontrollhoz viszonyított relatív nagysága tehát a kukoricában 11,6, a búzában 26,1% volt. A friss, évenként adott foszfor trágyázatlan parcellákhoz viszonyított (K/NPK vs. O/NK) kumulált termésnövelő hatása kukoricában +28,85 t/ha, búzában +40,22 t/ha volt. Ezek alapján a P-műtrágya kezelés relatív terméstöbblete kukoricában 25,8%, búzában 65,9% volt.

Az évenkénti varianciaanalízisek eredményei szerint a kukoricában 20 évből négyben, a búza esetében húszból 7 évben lehetett bizonyítani P-utóhatásokat (4.40. ábra). A P-hatásoknak tulajdonítható terméstöbbletek a kukoricában az esetek kevesebb, mint felében, 9 évben voltak statisztikailag igazolhatóak, miközben a búzában ennek gyakorisága kétszer nagyobb volt (18 év). Az oszlopdiagramokhoz illesztett trendfüggvények növényfajtól és tápanyag-hatástól függetlenül gyenge, statisztikailag nem igazolható kapcsolatokat mutattak. Az egyenesek meredeksége, iránya ugyanakkor jelzi az utóhatások időben csökkenő mértékét, a P-hatásokat tekintve a kukorica reakciójának P-ellátottságtól kevésbé függő időbeli stabilitását, a búza esetében pedig a talaj növekvő P-tartalmával javuló P-reakciókat.

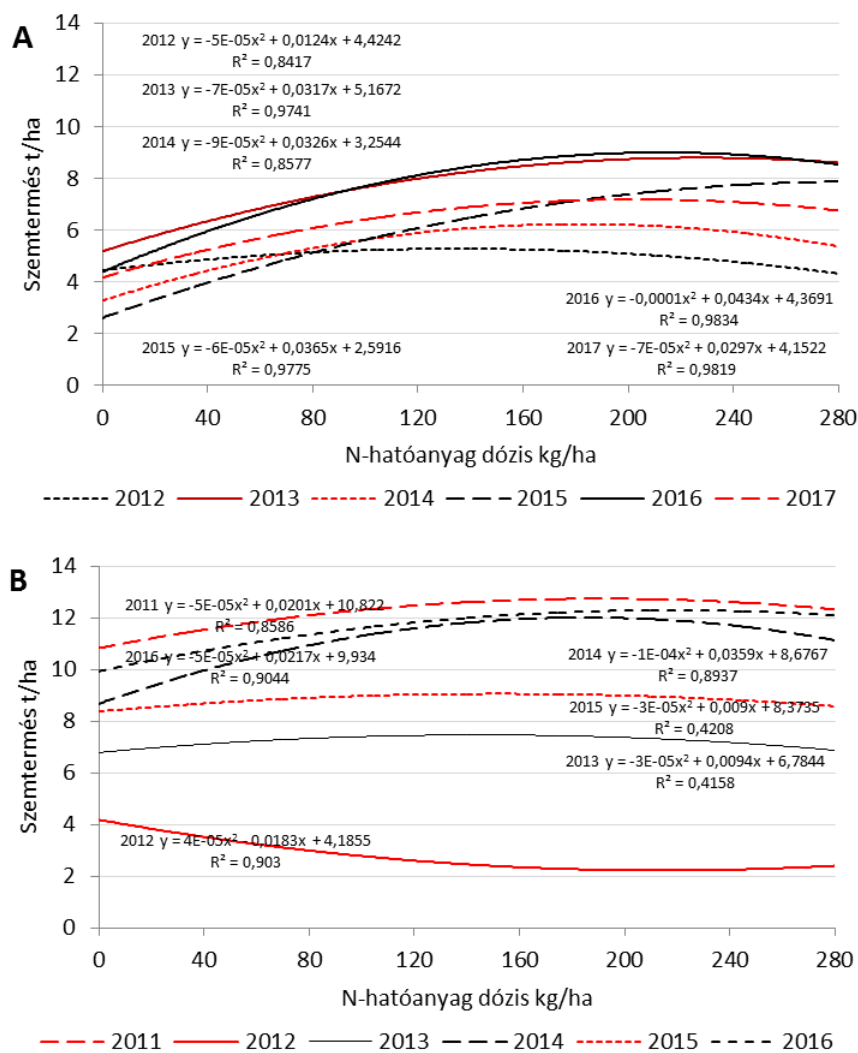


4.40. ábra. A talajban maradt P utóhatása és az évenként adott friss P hatása a kukorica és a búza szemtermés többleteire, valamint azok időbeli trendjeire. Martonvásár, 1975-2014

A kísérletben vizsgált növényfajok P-utóhatás reakciójának és az intenzív fejlődés egyes szakaszai csapadékellátottságának összefüggés-vizsgálata gyakorlati jelentőséggel bír. A vegetációs periódus nyolc különböző szakaszának vízellátottsága és a kukorica mért, de $P=5\%$ -os valószínűségi szinten statisztikailag már nem bizonyítható P-utóhatás reakciói között szorosabb kapcsolatot ($r = 0,311-0,527$) lehetett kimutatni, mint a búza termés többletei és intenzív növekedési periódusainak csapadékaik között ($r = 0,115-0,281$). Mindez azt jelenti, hogy közepesen rosszabb P-ellátottságú talajon a foszforra kevésbé igényes kukorica termésreakcióját az évjárat nagyobb súllyal határozza meg, mint a búzáét, illetve gyenge és igen gyenge P-ellátottságú talajokon még csapadékosabb években sem prognosztizálhatunk több búzatermést, mint száraz-aszályos termesztési feltételek között.

B. Évjárat hatások, ritkán előforduló jelenségek vizsgálata

A vetésforgóban beállított, kéttényezős, négyismétléses martonvásári búza és kukorica N-trágyázási kísérletek független változóinak száma (8), azok széles intervalluma (0-280 kg/ha), az évenként vizsgált genotípusok nagy száma (búza: 15 fajta; kukorica: 9 hibrid) lehetővé teszi, hogy igen változatos meteorológiai feltételrendszerben, időtávlatban jellemezzük az összefüggések törvényszerűségeit (4.41. ábra).

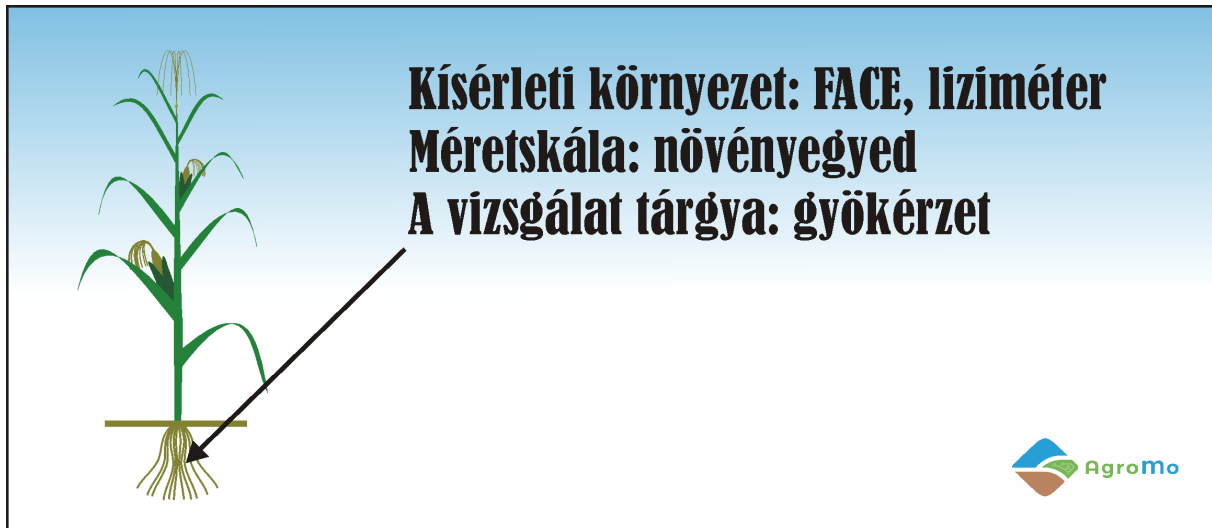


4.41. ábra. Az őszi búza (A) és a kukorica (B) szemtermés-mennyiség alapján jellemzett N-reakciója. Martonvásár, 2011-2017. A – 2012-2017, évente 15 búzafajta átlaga; B – 2011-2016, évente 9 kukoricahibrid átlaga

Az őszi búzával 2012-2017 között folytatott kísérletekben (A) a másodfokú függvények nagyon szoros, két évben (2012, 2014) $P=1\%$, három évben (2013, 2015, 2016, 2017) $P=0,1\%$ szinten szignifikáns négyzetes összefüggést igazoltak. Az egyenletekkel becsült termésminimumok értéke az évek sorrendjében 4,42 - 5,17 - 3,25 - 2,59 - 4,37 - 4,15 t/ha, a maximumoké 5,26 - 8,78 - 6,22 - 7,86 - 8,98 - 7,17 t/ha volt. A vizsgált időszakban tehát az Nmin szinten 2,58 (2013 vs. 2015), az Nmax szinten 3,72 t/ha (2016 vs. 2012) volt az évjáratok közötti különbség. A maximum termésekhez tartozó, függvényekkel becsült N-hatóanyag dózisos nagysága évek szerint a következő volt: 135 - 228 - 182 - 289 - 213 - 203 kg/ha. A függvények lineáris szakaszának évjáratonként változó meredekségét jól mutatja, hogy az optimum-termésszint (termésmaximumok 95%-a) eléréséhez szükséges N-adagok becsült mennyisége 60 - 148 - 122 - 210 - 146 - 133 kg/ha volt. A trágyázás termésmenővelő hatása (max-min) 2012-ben volt a legkisebb, 0,84 t/ha, a 2015. évben a legnagyobb, 5,27 t/ha. A N-trágya termésmaximumok és -minimumok különbsége alapján számított fajlagos – azaz 1 kg hatóanyagra vonatkoztatott – termésmenővelő hatása az évek szerint 6,2 - 15,8 - 16,3 - 18,2 - 21,6 - 14,9 kg/ha volt.

A 2011-2016. években beállított kukorica kísérletekben (B) a másodfokú függvények két évben (2013, 2015) gyenge, nem bizonyítható, négy évben (2011, 2012, 2014, 2016) nagyon szoros kapcsolatokat igazoltak. Az évek szerinti termésminimum 10,82 - 2,22 - 6,77 - 8,68 - 8,40 - 9,93 t/ha, a maximum 12,74 - 4,19 - 7,22 - 12,00 - 9,02 - 12,29 t/ha volt. Az Nmin szinten 8,60 (2011 vs. 2012), az Nmax szinten 8,55 t/ha (2011 vs. 2012) volt az évjáratok közötti legnagyobb különbség az adott 5 éves periódusban. A legnagyobb termések N-hatóanyag adagja évek szerint a következő volt: 191 - 0 (!) - 166 - 185 - 154 - 217 kg/ha. Az adatok jól mutatják, hogy a 2012. évben egy ritka, és egzaktan csak tartamkísérletekben kimutatható műtrágya-reakció következett be. A kukoricák föld feletti szárazanyag produktivitása a vegetatív növekedési szakaszban a javuló N-ellátottsággal ebben az évjáratban is nőtt. A virágzás-termésképzés időszakának rendkívüli csapadékhiánya (2012: 81 mm vs. 30 éves átlag: 156 mm) és légköri forrósága (hőségnap 2012-ben 45 vs. 20 éves átlagban 32) azonban termésdepressziót okozott, melynek nagysága összefüggést mutatott a kukorica föld feletti vegetatív tömegével. Az ilyen jellegű „inverz” reakciógörbék (már a 0-szinttől csökkenő termés a növekvő tápanyag-adagokkal) kialakulása olyan években figyelhető meg, amikor a jobban táplált, intenzívebben növekedő, és a gyökérszóna vízkészletét gyorsabban felhasználó növények a generatív fejlődés, a szemtermés kialakulás korábbi szakaszában kerülnek vízhiányos állapotba (Árendás, 1995, Csathó et al., 1991).

4.2.6. Gyökérzet vízfelvételi aktivitásának nyomon követése a gyökér–talaj rendszer elektromos kapacitásának mérésével



A termőközegbe szúrt talajelektród és a növény szárára rögzített növényelektród között 1 kHz frekvenciájú, kis feszültségű (~1V) váltakozó árammal elektromos kapacitás mérhető, mely a gyökérmembránok elektromos polarizálhatóságára (töltéstároló-képességére), mint dielektromos tulajdonságra vezethető vissza. A mérhető kapacitás így a gyökérrendszer méretével (gyökértömeg, -hossz vagy -felület) arányos. A módszer előnye, hogy a víz- és ionfelvétel szempontjából inaktív, szuberinizálódott (szállító funkciót ellátó) gyökérszegmensek hozzájárulása a mérhető kapacitáshoz lényegesen kisebb, mint az aktív (abszorptív) részeké, így a gyökérkapacitás a gyökérzet aktuális aktivitását ("funkcionális gyökérméret") jellemzi. A roncsolásmentes mérési eljárást már az 1970-es évektől alkalmazzák, azonban a talajnedvesség jelentős befolyásoló hatása nem tette lehetővé a gyökéraktivitás szabadföldi körülmények között történő monitorozását (a különböző időpontban, különböző talajnedvességi viszonyok között felvett mérési adatok összehasonlíthatóságát). Ezért a projektmunka során kiemelt szerepet kap a mérőmódszer adaptálása a térben és időben változó talajnedvesség melletti (szabadföldi) mérések kivitelezéséhez.

Az eljárás elsősorban a martonvásári kísérleti területen tervezett szabadföldi széndioxid dúsítási (FACE) kísérletben kívánjuk alkalmazni. A gyökérkapacitás mérését Agilent U1733C típusú, hordozható LCR-mérőhíddal végezzük, a korai vegetatív fenofázistól a termésérés végéig (kukorica esetén május–október, vetéstől és aratástól függően), kb. 2 hetes gyakorisággal. Minden mérési időpontban megállapítjuk a növény jellemző fenofázisát a BBCH-rendszer szerint. A méréseket lehetőség szerint a levélfelület-mérésekkel szinkronizáljuk.



4.42. ábra. Kukorica gyökérkapacitásának mérése a talajnedvesség meghatározása mellett a martonvásári kísérleti területen.

Az adatfeldolgozás tervezett menete

A martonvásári kísérleti területen végzett terepi vizsgálatokkal a gyökér–talaj rendszer elektromos kapacitását (nF egységben), valamint a talaj térfogatszázalékos nedvességtartalmát kapjuk a különböző fenofázisokban ismételt mérések során. A mért elektromos kapacitást a mért talajnedvesség ismeretében tudjuk átszámítani egy származtatott kapacitás értékévé (szintén nF egységben), melynek fenológiai változása, illetve a szén-dioxid dúsítás esetleges hatása időben követhető. Az átszámítást laboratóriumi előkísérletek során felvett, és az adott talajra és növényfajra/fajtára specifikus, adatokra történő modellillesztés eredményei alapján tervezzük megvalósítani. A statisztikai értékelést R programozási környezetben végezzük (Bartón 2015; Pinheiro et al., 2012).

Várható mérési eredmények

1. A gyökéraktivitás dinamikájának jellemzése a teljes vegetációs periódusra vonatkozóan, kizárólag a gyökérzet roncsolásmentes vizsgálatával. A nanofarad (nF) egységben kapott gyökéraktivitás ugyan nem mutatja meg közvetlenül a vízfelvételi aktivitást (bár kalibrációk felvételével erre konvertálható), azonban összehasonlítható adatként (pl. időbeni változások, kezelések hatásának kimutatására) jól alkalmazható.
2. Új módszer-adaptáció szolgáltatása az *in situ* terepi monitorozáshoz; a mérési eredmények függetlenné tétele a talajnedvességtől, illetve annak tér- és időbeni változékonyságától. A gyökér–talaj rendszer elektromos kapacitásának ez a fajta (szabadföldi) detektálása a projekt munka szempontjából egyfajta innovatív mérési eljárásnak tekinthető; alkalmazhatóságának, illetve hasznosságának tesztelése a projekt keretében a martonvásári területen végzett kísérletek során történik. A víz- és tápanyagfelvétel szezonális dinamikája és a környezeti tényezők erre gyakorolt hatása számos haszonnövény esetén kutatott és jól ismert, hiszen a növénytermesztés szempontjából, főként stresszterhelt környezetben, óriási jelentőséggel bír (pl. vetési idő megválasztása,

optimális öntözési rendszer kialakítása). A gyökérkapacitás mérés tervezett adaptációjával azonban a hasonló jellegű adatokhoz – destruktív és/vagy munkaigényes és drága mérési módszerek alkalmazása helyett – pusztán a gyökérzet roncsolásmentes (*in situ*) mérése útján jutnánk hozzá.

3. A szén-dioxid dúsítás gyökérrendszer vízfelvételi aktivitására gyakorolt potenciális hatásának kimutatása, illetve ennek időbeli nyomon követése.
4. A gyökérkapacitás-mérési módszer eredményeinek integrálása a gyökérrendszer *in situ* (gyökérszkenneléssel) mért kvantitatív jellemzőivel.
5. A mérési eredmények "validálása" a levélfelület-index, illetve a zöld levélfelület (valamint az ezzel arányos párologtatási intenzitás) szezonális változásának segítségével.

A gyökér víz- és tápanyagfelvételi rátája a talaj–növény rendszer jellemzésére szolgáló fontos működési paraméternek tekinthető. Ily módon, időbeni változásának nyomon követése, valamint a környezeti tényezők (itt: szén-dioxid dúsítás) hatásának kimutatása jelentősen hozzájárulhat a projekt keretében megvalósuló integrált modellrendszerhez.

Az innovatív mérési eljárás során eredményeinket (származtatott gyökérkapacitás) nanofarad (nF) egységben kapjuk meg. Ez a rendszer töltéstároló-képességét mutatja, mely az aktív gyökérmembránok polarizálhatóságának mértékét és hatékonyságát jellemzi. Ebből a növény vízfelvétele (pl. ml/nap egységben), majd ez alapján az állomány területegységre vonatkoztatott vízfelvételi rátája elvileg kiszámítható, bár feltehetőleg csak kalibrációk kísérleti munkával történő felvételével (adott talaj–növény rendszerre). A kifejlesztés alatt álló módszer jelenlegi állapota szerint a nF egységben megadott gyökéraktivitás időbeni változása (pl. a vegetatív fázis során növekedés, termésérés valamely szakaszától csökkenés, relatív növekedés vagy csökkenés az egyes fenofázisokban) és a kezelések erre gyakorolt hatása (a folyamatos monitorozásnak köszönhetően annak időbeni megjelenésével és változásával) mutatható meg.

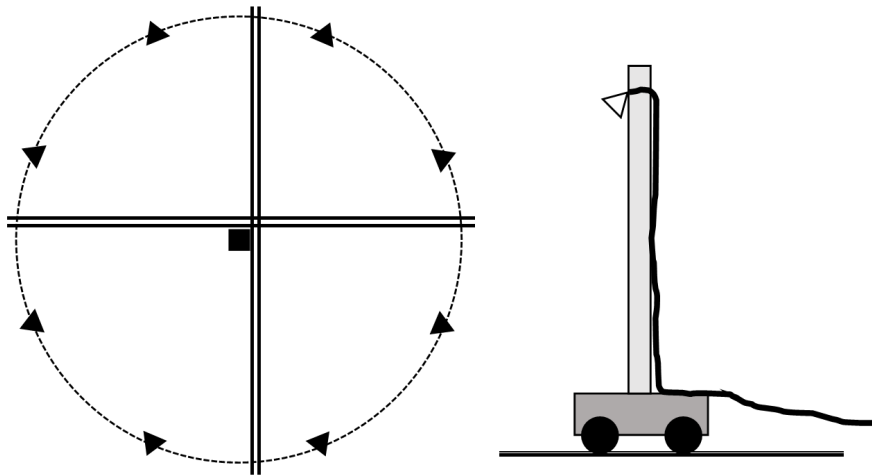
4.2.7. CO₂ koncentráció eloszlás mérése a szabadföldi szén-dioxid dúsítás kísérlet (FACE) területén



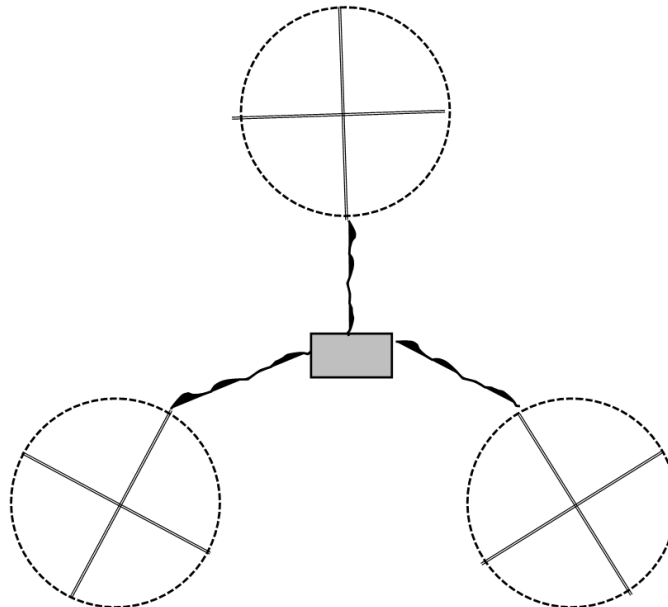
A FACE gyűrűk szén-dioxid dúsítását a gyűrű közepén elhelyezkedő Vaisala CARBOCAP szén-dioxid szenzor jele alapján vezéreljük. A szenzor gyári kalibrációs pontossága (± 18 ppm) elfogadható lenne, de stabilitása folyamatos ellenőrzést igényel. A megfelelő, folyamatos pontosság érdekében a FACE gyűrűk szén-dioxid szenzorát minden mérési szezon előtt és után kalibráljuk. A mérési szezonon belül, a mérési program zavarása nélkül, rendszeresen ellenőrizzük a mérési skála stabilitását a FACE gyűrűn belüli szén-dioxid eloszlás térbeli homogenitásának ellenőrzésére szolgáló mérések révén (lásd alább). A hazai forrásból beszerzendő kalibráló gázokat összemérjük a mérésekhez háttéradatokat szolgáltató hegyhátsági mérőállomás mérési skálájával.

A kísérleti eredmények értékelhetőségéhez fontos, hogy a FACE gyűrűkön belül a szén-dioxid térbeli eloszlása homogén legyen, illetve ismerjük a környezeti hatások miatt óhatatlanul fellépő inhomogenitás mértékét, időbeli és térbeli eloszlását. Ehhez a gyűrűn belül rendszeresen, több ponton és több magasságban koncentrációt kell mérnünk. Ehhez a FACE gyűrű egymásra merőleges átlóin, sínen mozgatható, állítható magasságú mérőfejet használunk (4.43. ábra), melytől beszívócső vezet a három FACE gyűrű között elhelyezkedő, a szén-dioxid analizátort és tartozékait (kalibráló gázok, szivattyú stb.) tartalmazó mérőkabinhoz (4.44. ábra). Ezzel az elhelyezéssel egyetlen műszer segítségével mindhárom FACE gyűrűben elvégezhetjük a méréseket.

A keresztmetszeti koncentráció-profilok mérési protokollját a kezdeti tapasztalatok alapján célszerű véglegesíteni. Kiindulásként 1 méterenként végzünk 3-3 perces méréseket az állomány felett és az állományban. A mérési idő elegendő a CO₂-analizátor megfelelő átöblítéséhez. A FACE gyűrű közepén, a CARBOCAP szenzor magasságában is mérünk, így rendszeresen tudjuk ellenőrizni a gyűrű szén-dioxid ellátását vezérlő szenzor mérési skáláját. Mivel a szén-dioxid analizátor skálája nyomás és hőmérsékletfüggő, ezért egy-egy átmérő végigmérése előtt és után a műszert a hozzá csatlakoztatott kalibráló gázokkal kalibráljuk.



4.43. ábra. A mérőkocsi sínjei a FACE gyűrűn belül (balra) és a mérőkocsi, melyen a beszívócső több magasságban is rögzíthető.



4.44. ábra. A FACE gyűrűk és a műszerkabin tervezett elhelyezkedése.

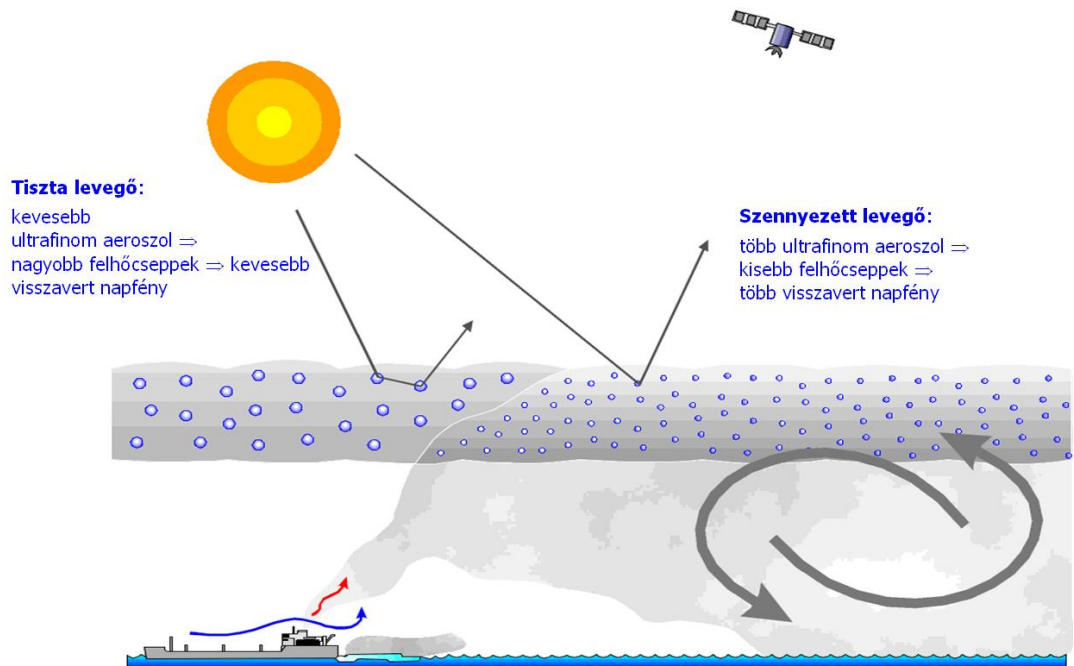
A kezdeti tapasztalatok birtokában a horizontális mérési pontok száma a rövidebb mérési ciklus érdekében csökkenthető, illetve az ekvidisztáns felbontás a koncentráció-eloszláshoz jobban illeszkedőre váltható. Indokolt esetben egy harmadik magassági mérési pont is beilleszthető. Mivel egy 1 m-es felbontású mérési profil végigmérése kalibrációkkal együtt, 3 magassági szinttel számolva közel 3 órát vesz igénybe, és 3 FACE gyűrűt kell végigmérnünk, így folyamatos mérés esetén 17 óránként áll rendelkezésünkre egy-egy meghatározott profil. Tekintettel arra, hogy gyűrűkön belüli koncentráció-eloszlás csak statisztikai módszerekkel határozható meg, melyekhez nagymennyiségű mérési adattal kell rendelkezniünk, a koncentráció-profil méréseket folyamatosan végezzük a kísérlet teljes időtartama alatt.

4.2.8. Szabadföldi szén-dioxid dúsításban (FACE) termesztett kukorica légköri emissziójának hatása a levegőkémiaira és az éghajlatra



A megnövelt légköri CO₂ koncentrációban termesztett kukorica légköri emissziójának változásáról, illetve annak levegőkémiai és éghajlati következményeiről semmilyen információval nem rendelkezünk. A potenciális éghajlati változások eltérő mennyiségű és megváltozott kémiai minőségű emissziós termékeket eredményezhetnek. A biogén gázok egyik része oxidációs reakciók után új aeroszol részecskéket hoz létre légköri nukleációval, illetve kondenzációval a meglévő részecskékre kerül. Az aeroszol részecskének meghatározó szerepe van a felhők születésében. Ezek – pontosabban egy különleges csoportjuk, amelyeket felhőkondenzációs magvaknak nevezünk (CCN, cloud condensation nuclei) – nélkül nem alakulnak ki felhőcseppek és nem keletkezik csapadék sem. A vízgőz homogén nukleációja ugyanis kinetikai okok miatt nem valósul meg tiszta (részecske mentes) levegőben. A megváltozott aeroszol mennyiség, kémiai összetétel és keveredési állapot azonban megváltoztathatja a felhők szerkezetét. Több részecske nagyobb számú, de kisebb méretű felhőcseppet eredményez. Az ilyen cseppekből összetevődő felhőknek egyrészt nagyobb az összfelületük és több fényt vernek vissza az űrben, másrészt kisebb valószínűséggel és arányban hoznak csapadékot. Emellett megváltoztatják a troposzféra hőmérsékletének menetét, ami kihat a nyomanyagok légköri keveredésére és transzport folyamataira is. Ezt a tulajdonságot a közvetett aeroszol éghajlati kényszer fejezi ki. A hatás hűtést eredményez, és ellensúlyozza az üvegház gázok melegítő hatását. A közvetett aeroszol éghajlati kényszer megváltozását a 4.45. ábrán szemléltetjük. A kapcsolódó bizonytalanság (–1.7-től – 0.2 W m⁻²-ig) az éghajlati modellek legnagyobb egyedi bizonytalansági értékét jelenti, és az aeroszol-vízgőz kölcsönhatás tisztázása nélkül nem várható a modellek javulása. Különösen igaz mindez a víz körforgásának vonatkozásában, ami kihat a mezőgazdasági tevékenységre, illetve a termőföldek hasznosítására.

A kapcsolódó, tervezett levegőkémiai kísérletsorozat két fő részből tevődik össze. Meghatározzuk a kukorica által emittált, széntartalmú vegyületek mennyiségi változását, illetve nyomon követjük a biogén emisszió változásának következményeit a felhőkondenzációs magvakra. A lépések több szálon kapcsolódnak egymáshoz.



4.45. ábra. A közvetett aeroszol éghajlati kényszer antropogén hatásra bekövetkezett változásának szemléltetése.

1) A kukorica által emittált, szerves szén (OC, organic carbon) tartalmú aeroszol részecskék, illetve illékony szerves vegyületek (VOC, volatile organic compounds) mennyiségi változásának meghatározása.

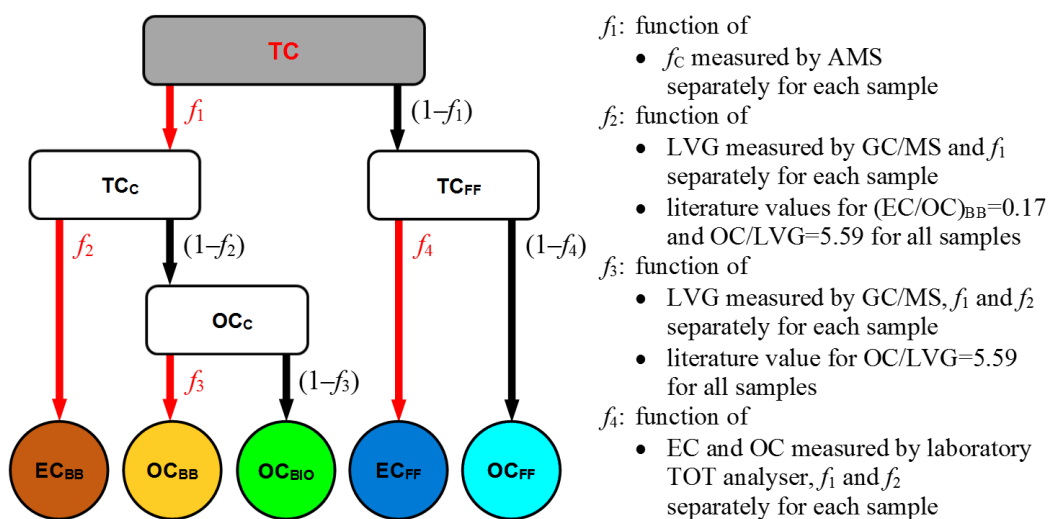
Az aeroszol rendszerből történő mintavétel egyik sajátos alapfeladata a kiválasztott méretfrakció elkülönítése. Elvi különbségek miatt a durva ($PM_{10-2.5}$) és finom ($PM_{2.5}$) aerodinamikai méretfrakcióknak van elsősorban jelentősége, míg a PM_{10} méretfrakciót főleg az egészségügyi hatások miatt kíséri érdeklődés (PM , particulate matter, a PM utáni számok a részecskék adott számnál kisebb, vagy a két szám közötti átmérőtartományát jelölik μm egységben). A biogén emisszió és a másodlagos aeroszol keletkezése szempontjából a $PM_{2.5}$ méretfrakciót célszerű kiválasztani. A méretfrakció elkülönítését tehetlenségi impaktossal végezzük, majd az aeroszol részecskéket szűrőegységgel gyűjtjük kvarcszálal szűrőre. Ez a szubsztrát termikus analízist tesz lehetővé, ami a széntartalmú összetevők kémiai analízise miatt fontos. Rendelkezésünkre áll $PM_{2.5}$ mérettartományú aeroszol részecskék gyűjtésére alkalmas mintavevő készülék, amelyek közül egyet a FACE gyűrőkön belülrre telepítünk, egyet pedig a kontrollterületre. A mintavevők látképét a 4.46. ábrán mutatjuk be.

A mintavevőkkel napi aeroszol mintákat gyűjtünk párhuzamosan a vegetációs időszakban. Az aeroszol minták kémiai vizsgálata különböző analitikai laboratóriumokban történik. A mérések a következő vizsgálatokat foglalják magukba: gravimetria a PM tömeg meghatározása céljából, termikus-optikai transzmissziós analízis az OC és a korom (EC, elemental carbon) meghatározása érdekében, gázkromatográfia- tömegspektrográfia



4.46. ábra. Szűrősen alapuló mintavevő $PM_{2.5}$ méretfrakciójú aeroszol minták gyűjtésére.

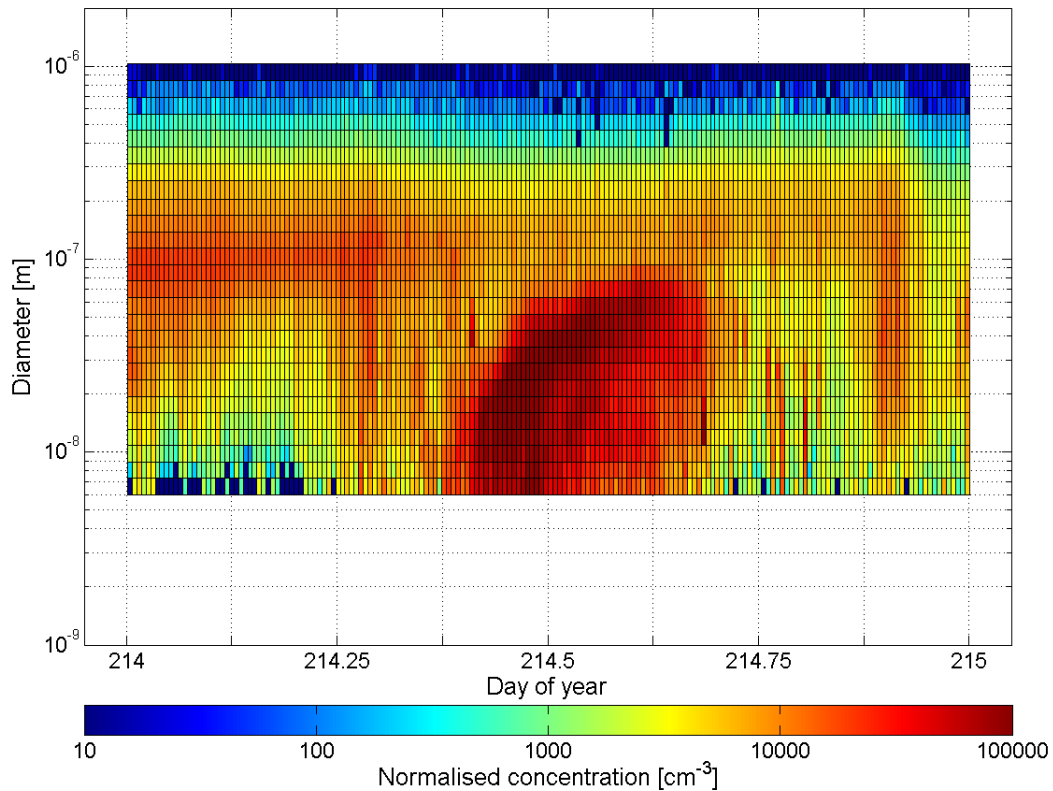
tömegspektrográfia módszer (GC/MS) a levoglükozán (LVG, 1,6-Anhidro-b-D-glükopiránóz, ami a biomassza égetés molekuláris markere) meghatározása céljából, és gyorsító tömegspektrometria (AMS) a $^{14}C/^{12}C$ izotóparány mérése céljából (radiokarbon módszer). Az analitikai eredmények együttes kiértékelését egy általunk ebben az évben kifejezetten, a projekt céljára kidolgozott eljárás (coupled radiocarbon-LVG method, Salma et al., 2017) alkalmazásával végezzük el, ami lehetővé teszi a széntartalmú összetevők (TC, total carbon) tömegének a megosztását a fő forrástípusok, vagyis a fosszilis tüzelőanyagok (FF) égetése, a biomassza égetése (BB) és a biogén emisszió (jelen esetben a kukorica emissziója) között. A forrásmegosztás elvi folyamatát a 4.47. ábrán szemléltetjük.



4.47. ábra. A $PM_{2.5}$ mérettartományú aeroszol részecskék teljes széntartalmának (TC) forrásmegosztás a fosszilis tüzelőanyagok (FF) égetéséből, a biomassza égetéséből (BB) és a biogén emisszióból származó (BIO) szerves szén (OC) és elemi szén (EC) között Budapesten.

Hasonló modellszámítást alkalmazunk a kukorica biogén emissziós járulékanak meghatározása érdekében a FACE gyűrűn belül és a kontroll területen vett minták esetében. Az aeroszol minták feldolgozásával párhuzamosan számításokat végzünk a biogén eredetű illékony szerves vegyületek (BVOC-k, biogenic volatile organic compounds) jellemző

koncentrációjának becslésére a Biome-BGCMuSo modell számára. Ezen eljárások kidolgozása folyamatban van.



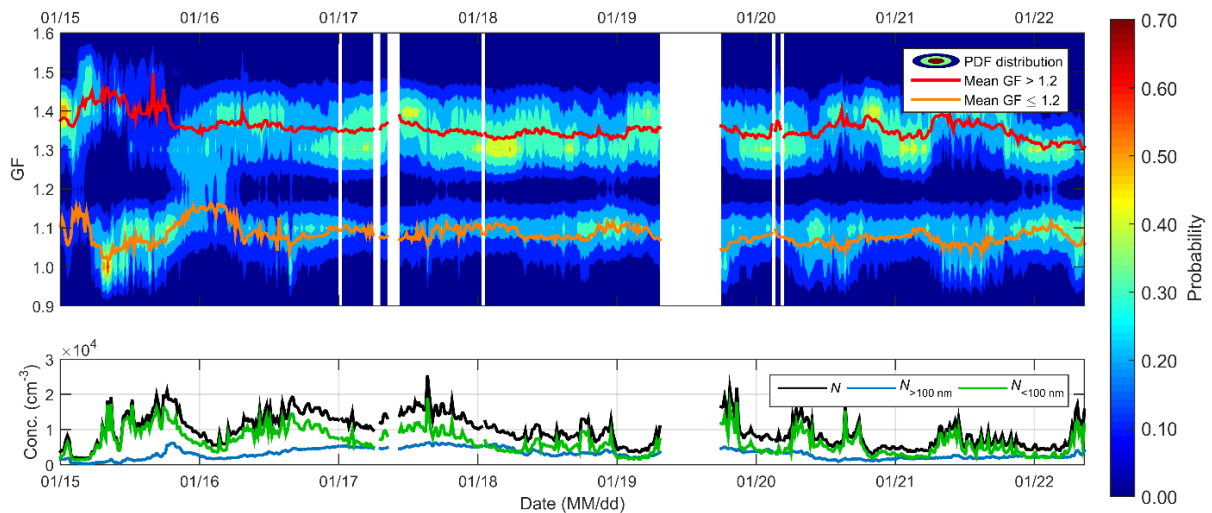
4.48. ábra. Új aeroszol részecskék keletkezése és növekedése (ún. banángörbe) 2017. augusztus 2-án.

2) A biogén emisszió következményei a felhőkondenzációs magvak tulajdonságaira

A légköri nukleációval és kondenzációs növekedéssel kialakult aeroszol részecskék vízfelvevő képességéről és ennek éghajlati, légkörkémiái következményeiről jelenleg nagyon kevés tudással rendelkezünk, annak ellenére, hogy a CCN szerepe a legnagyobb egyedi bizonytalansággal rendelkezik az éghajlati modellekben (Carslaw et al., 2013). Az ilyen típusú kísérletek mostanában indulnak nemzetközi szinten is. Kárpát-medence tekintetében semmilyen hasonló információnk nincs. Tekintettel arra, hogy a leggyakoribb túltelítettségek esetén a CCN-k jözel fele légköri nukleációval keletkezik (Merikanto et al., 2009), a vízgőz-aeroszol részecske kölcsönhatást célszerű kiegészíteni, párhuzamosan végezni az új aeroszol részecskék keletkezésének és kondenzációs növekedésének (Kulmala et al., 2013) vizsgálatával. Ezen a területen több éves tapasztalattal rendelkezünk, amit a jelen projekt számára rendelkezésre bocsátunk. Egy légköri nukleációs eseményt a 4.48. ábrán mutatunk be, amely a nanométer méretű részecskék koncentrációjának időváltozását szemlélteti 2017. augusztus 2-án, szerdán. A részecskék számát a levegőben színekkel ábrázoltuk: a piros a legnagyobb, a kék pedig legkisebb koncentrációkat jelöli.

A biogén emisszió megváltoztathatja a CCN tulajdonságait. Ennek nyomon követésére modellt dolgozunk ki a kappa higroszkopicitási tényező meghatározására, és az aeroszol-felhő kölcsönhatásban játszott szerepének tisztázására releváns (1–2%) túltelítettségi körülmények

között. Eddigi munkánk a szub-telítettségi viszonyokra terjedtek ki műszer hiányában, amely tapasztalatait jól tudjuk hasznosítani a jelen projekt céljainak elérésére. A 145 nm átmérőjű aeroszol részecskék higroszkópos növekedését szub-telítettségi körülmények között téli időszakban a 4.49. ábrán mutatjuk be.



4.49. ábra. A higroszkopicitási növekedési tényező (GF, growth factor) 145 nm száraz (mobilitási) átmérőjű aeroszol részecskék esetén RH=90% relatív páratartalom mellett január 15. és 22. között. A narancssárga (alsó) vonal a hidrofób részecskék (GF \leq 1.2), míg a piros (felső) vonal a kevésbé hidrofil (GF $>$ 1.2) részecskéket jelöli a felső panelen. A részecskék teljes koncentrációját (N , fekete vonal), az ultrafinom részecskék koncentrációját ($N_{<100}$, zöld vonal), míg $N_{>100}$ koncentrációt kék vonal jelöli az alsó panelen.

4.2.9. A talaj üvegházhatású gáz forgalma



A talajban zajló folyamatok eredményeképp a talaj és a légkör közötti üvegházhatású gázforgalom jelentős. A szárazföldi ökoszisztéma szénkészletének jelentős része a talajban tározódik, melynek mennyiségét elsősorban a mikroorganizmusok tevékenységéhez kötött biodegradációs (lebomlási) folyamatok szabályozzák. Ezen folyamatok eredményeképp, valamint a talajban található mésztartalmú anyagok bomlása (heterotróf respiráció) következtében CO_2 kerül ki a légkörbe, melyhez hozzájárul a gyökérlégzés is (autotróf respiráció).

Hazai viszonyok között a talajban, anaerob körülmények között történő légzés termékeként kikerülő CH_4 a mezőgazdasági területek szénmérlegében kevésbé jelentős szerepet tölt be, ennek ellenére mérése fontos a teljes szénmérleg jobb megismerése érdekében.

A talaj nitrogénforgalmát a műtrágya alkalmazása jelentősen módosította a mezőgazdasági területeken. Az N_2O kibocsátás (ami a nitrátlégzésből származik) komoly veszélyt hordoz magában, lévén a dinitrogén-oxid potens üvegházhatású gáz. A trágyázás a talajból történő NH_3 felszabadulást is módosította, mely az ammónia környezetkárosító hatása miatt (mérgező az élő szervezetekre) kiemelt jelentőségű.

Szabadföldi méréseink során információt szeretnénk kapni az egyes ÜHG kibocsátások időbeli változásáról, valamint az őket befolyásoló események (pl. művelés, csapadékesemény) hatásáról.

Módszerek, helyszínek

A fenti gázok forgalmának mérése szabadföldi körülmények között gázanalizátorral és a talaj-fluxusok méréséhez kialakított kamrákkal történik majd átfolyós, nem állandó állapotú rendszerben (*flow-through non steady state*). A Picarro G2508 gázanalizátorával egy időben ötféle gáz koncentrációját tudjuk mérni. A tervezett mérési protokollról az 4.4. táblázatból tájékozódhatunk. Több ismétlésben tervezünk mérni, az analizátorhoz csatlakoztatható elosztó egy időben maximum 16 kamra kezelését teszi lehetővé, melyet azonban nem minden esetben tudunk teljes mértékben kihasználni a kísérlet mérete illetve a rendelkezésre álló kamrák mennyisége miatt.



4.50. ábra. A G2508 típusú Picarro gázanalizátor a hozzá csatolt talajfluxus mérő kamrával.

A méréseket kétheti rendszerességgel több ismétlésben végezzük majd in-situ gázanalizátor segítségével. A készülék lehetőséget nyújt a főbb üvegház hatású gázok fluxusainak szimultán mérésére. A tervezett helyszínek között az eddy-kovariancia helyszínek szerepelnek, ahol a CO₂ forgalom mérése történik. Itt fontos – noha térben korlátozott - információt nyerünk a talajból történő kibocsátást illetően, valamint a többi ÜHG fluxusait csak ezzel a módszerrel mérhetjük a helyszíneken. A FACE kísérlet mérete miatt nem alkalmas az ökoszisztéma szintű EK mérésekhez, így az ÜHG fluxusokra vonatkozó információt csak kamrás mérések segítségével nyerhetünk. Egyes ÜHG (N₂O) fluxusokat nagymértékben befolyásol a kijuttatott műtrágya mennyisége. A martonvásári műtrágyázási tartamkísérletek kiváló helyszínt biztosítanak a jelenség tanulmányozására, így ebben is méréseket kívánunk folytatni.

4.4. táblázat. A talajfluxus-mérések tervezett gyakorisága az egyes helyszíneken.

Helyszín	Eddy 1	Eddy 2	FACE	Trágyatartam
Talaj fluxus mérések (N₂O, NH₃, CO₂, H₂O, CH₄)				
Gyakoriság	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)
Kampány-mérések	Kezdeti kampány térbeli változékonyságra Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve	Kezdeti kampány térbeli változékonyságra Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve	-	Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve
Ismétlések	8-16	8-16	8 ismétlés/gyűrű = 4-4/kezelés	8

Példa jelenleg folyó mérésekre szabadföldi körülmények között

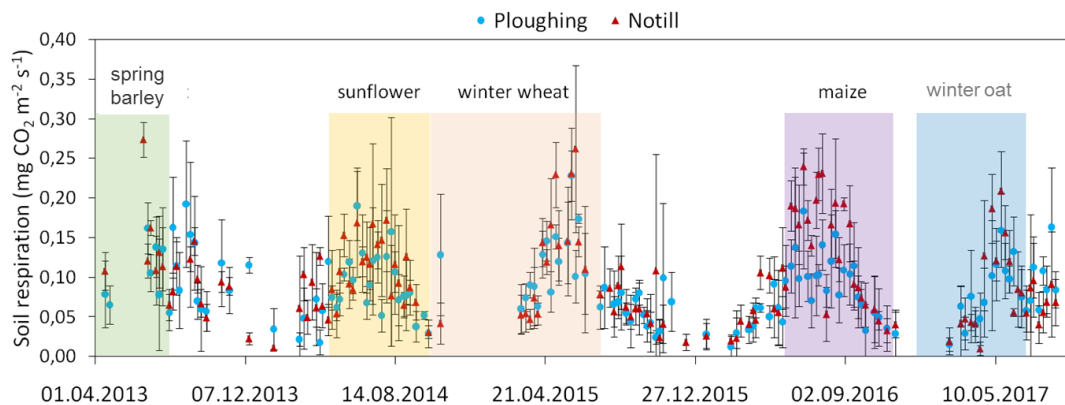
2013 óta végzünk talajlégzés méréseket a hatvan melletti Józsefmajorban, a Szent István Egyetem (SZIE) tangazdaságában, egy talajművelés-klíma tartamkísérletben. A kísérletet 2002-ben állították be, összesen hat különféle talajművelési módot alkalmaznak azóta is szisztematikusan 4 ismétlésben. A kísérletben a szántás és a direktvetés kezeléseken végzünk méréseket 2013 óta statikus kamrás módszerrel (20 perc inkubációs idő, 7 ismétlés) heti rendszerességgel. A minták CO₂ koncentrációját gázkromatográfiásan FISON GC8000 GC-FID készülékkel határoztuk meg. A respiráció mérések mellett rendszeres talajtani

felvételezés, növényi információk (LAI, növénymagasság, gyökértömeg) gyűjtése is történt. Az időjárási paraméterek mérése egy közeli meteorológiai állomás telepítésével történt.

2017-től kezdődően az EGM-4 (PPSystems) infravörös gázanalizátor, valamint a hozzá csatlakoztatott SRC-1 talajrespirációs kamra segítségével is monitorozzuk a széndioxid kibocsátást, 7 ismétlésben a statikus kamrás módszerrel kombinálva. A méréseket kezdetben párhuzamosan végezzük, hogy a két módszerrel mért respiráció értékek összevetését elvégezhessük.

Szintén 2017 évtől kezdődően szabadföldi N₂O fluxus méréseket is kezdtünk. A mérés szintén statikus kamrás módszerrel történik (30 perc inkubációs idő, 7 ismétlés), ahol a levegőminták N₂O koncentrációját utólag laboratóriumban határozzuk meg, szintén gázkromatográfiásan egy Perkin-Elmer Clarus-500 GC-ECD készülékkel.

Az 4.51. ábrán a talaj CO₂ kibocsátásának alakulását láthatjuk különféle termesztett növények esetén. A látható éves menet a hőmérséklet, valamint a vegetáció fenológiai változásainak köszönhető, ugyanis a mérések során a gyökereket nem zártuk ki a mérésből, a gyökérrespiráció hozzájárulása a teljes talaj CO₂ fluxushoz jelentős komponens.

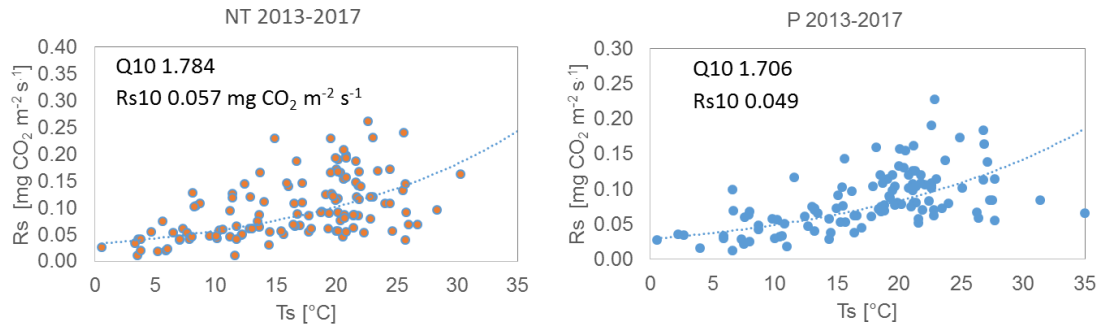


4.51. ábra A talajrespiráció időbeli alakulása a vizsgált 2013-2017 időszakban. A színes négyszögek a vegetációs időszakot jelölik. A pontok a térbeli ismétlések átlagát jelölik, a szórást ugyancsak feltüntettük.

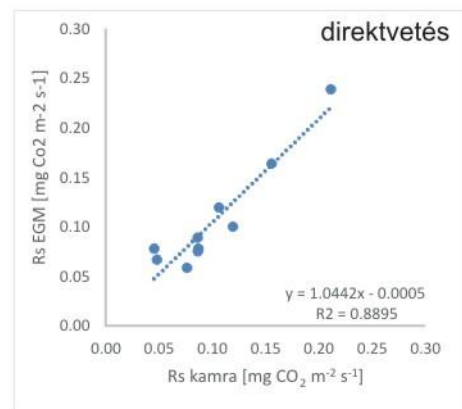
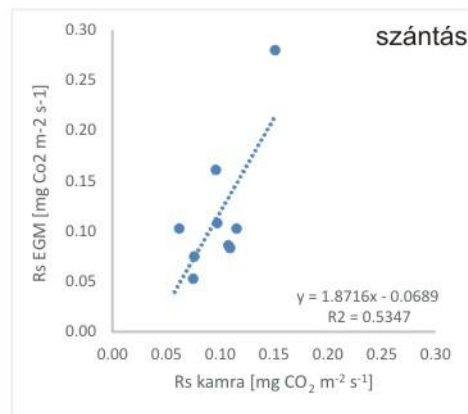
A talajrespiráció hőmérsékletfüggése eltérően alakult a két kezelésben, a direktvetésben erőteljesebb hőmérsékletfüggést kaptunk (4.52. ábra). A talajnedvességgel ugyanakkor nem találtunk szoros összefüggést az időszak során.

A többéves mérési idősor alapján a direktvetésben magasabb talajrespirációt mértünk, mint a szántásban. Ez a különbség a vegetációs időszak során jelentősebb.

Az infravörös gázanalizátorral végzett mérések jó egyezést mutattak a statikus kamrás módszerrel mért respiráció értékekkel (4.53. ábra). Tökéletes egyezést ugyanakkor nem kaphatunk, hiszen a statikus, és az SRC-1-es kamra mérete különböző, illetve a kettő térben elkülönülő helyen került letelepítésre, így csak az időbeli változások konzisztenciáját, valamint a nagyságrendi egyezést várhatjuk el (4.53. ábra). A szántás kezelésben az összefüggés gyengébb, melyet a kis léptékben változatosabb talajszerkezettel magyarázunk.

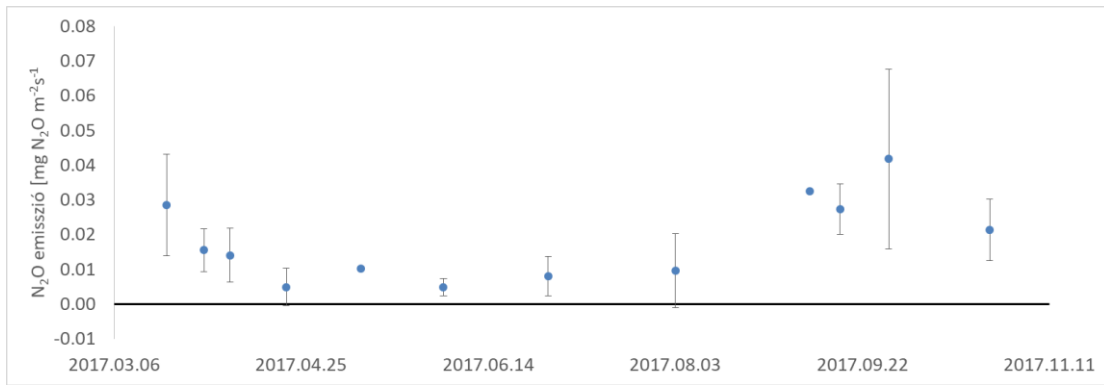


4.52. ábra A talajrespiráció hőmérsékletfüggése.



4.53. ábra. Talaj fluxus mérés EGM-4 gázanalizátor segítségével. A kép bal oldalán a statikus kamra talajba helyezett kerete látható. A jobb oldalon a két módszerrel mért fluxusok összevetése látható.

A N₂O mérések eredménye még csak első éves méréseink alapján értékelhető, a mérési módszerek kidolgozása folyamatban van. A vegetációs időszakon keresztül történt méréseken látható a nyári kiszáradás hatása, valamint a nitrogén műtrágyázás (30 kg ha⁻¹), és az azzal egy időre eső esőzések hatását (4.54. ábra).



4.54. ábra N₂O kibocsátás alakulása 2017 évben a szántás kezelésben. A pontok a térbeli ismétlések átlagát jelölik, a szórást ugyancsak feltüntettük.

4.2.10. Levélszintű fotoszintézis mérés



Az üvegházhatású gázok (ÜHG) körforgalmának egy jelentős része a növények közvetítésével bonyolódik. Emiatt a körforgalom megértéséhez a növényi mérések elengedhetetlenek, mivel a növényeken keresztül történő gázáram (pl. CO_2 áram) jelentős. Az integrált modellrendszerben a modell parametrizációjához a növényi paraméterek, köztük a fotoszintézisre vonatkozó információk szükségesek, melyek nagyban növelhetik a modell pontosságát. Ilyen jellegű adatok ugyanakkor csak ritkán, rövidebb időszakokra, illetve csak egy adott növényfajtára érhetők el más mérésekkel összehangoltan, szabadföldi körülmények között. Épp ezért pótolhatatlan adatokat szolgáltatnak a modellrendszernek.

A rendszeres fotoszintézis mérések a FACE kísérletben a növényi gázcsereről önmagukban is egyedülálló, pótolhatatlan információt szolgáltatnak. A megemelkedett CO_2 szint mellett a növényi asszimiláció megváltozhat, azonban a háttérben zajló mechanizmusok még részben tisztázatlanok. A respiráció és a fotoszintézis megváltozása azonban jelentős következményekkel járhat a szárazföldi CO_2 forgalomra, mely hatás értékelése elsősorban modellezési feladat lesz. Ehhez azonban csak a kísérleti eredmények adhatják meg a megfelelő alapot. A növényi aktivitás megfigyelése a talajból kibocsátott ÜHG-k fluxusainak vizsgálatához és az azokat adott esetben kormányzó folyamatok megértéséhez is szükséges. A talajból a CO_2 emissziójának vegetáció aktivitásától és a fenológiai fázistól függően jelentős része autotróf, vagyis növényi eredetű, a gyökérlégzés hozzájárulásából fakadóan. A gyökérrespirációt a növény fejlettsége mellett (biotikus) a felszín feletti növényi részek gázcserejéhez hasonlóan a pillanatnyi környezeti (abiotikus) feltételek is meghatározzák.

Módszerek, helyszínek

A fotoszintézis méréseket a talaj ÜHG fluxus mérésekkel azonos helyszíneken tervezzük, azokat kiegészítendően. Különösen a FACE helyszíneken, ahol a növényi CO_2 fluxusokról egyéb információval nem rendelkezünk, fontos legalább a levél szintű fotoszintézis mérése.

A fotoszintézis mérését kis méretskálán levél szinten végezhetjük. A levél szintű fotoszintézis mérések gázanalizátor és a levélre helyezhető küvetta segítségével történnek, például a CIRAS-3 analízátor a hozzá tartozó levélküvetákkal (4.55. ábra). A levélküvetták különféle levéltípusokhoz állnak rendelkezésre, keskeny levelekhez, széles levelekhez illetve tűlevelekhez alkalmazható küveták is léteznek, valamint egy köztes méretű univerzális

levélküvetát is említhetünk (4.55. ábra), mely a legtöbb mezőgazdasági haszonnövényhez használható. Kiegészítővel, fényforrások segítségével lehetséges a CO₂ forgalom fényintenzitásra adott válaszának (ún. fényválasz-görbe) meghatározása is. Mivel a fotoszintézis és a gyökérrespiráció szoros kapcsolatban van, a fotoszintézis mérések a gyökérzetre vonatkozó információkkal segítenek a talajrespiráció értelmezésében.



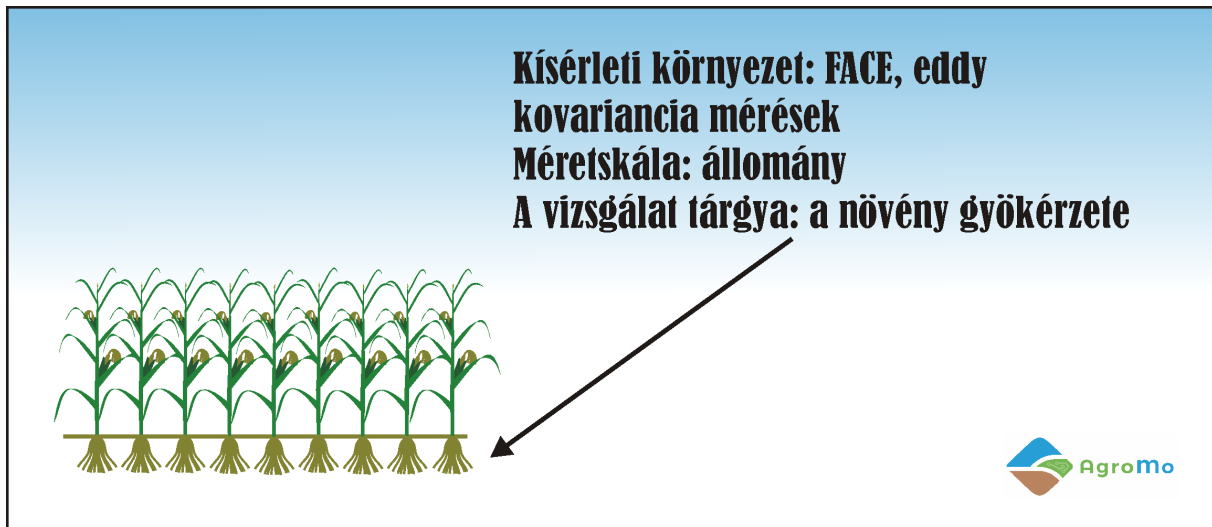
4.55. ábra. A CIRAS-3 fotoszintézis mérő, és a hozzá csatlakozható univerzális levélküvetta.

A fenti módszerekkel, noha hordozható terepi műszerek felhasználásával történnek a mérések, a mérési gyakoriságot kétheti rendszerességben állapítottuk meg, mivel a műszerek mozgatása, használata a helyszínek megközelítésére fordított idő és munka ráfordítása ebben az esetben tolerálható. Ezen felül alkalmanként expedíciós méréseket is tervezünk, amikor egy térben vagy időben jobb felbontású adatsor megalkotása a cél, elsősorban modellfejlesztési céllal. A tervezett mérési protokoll az 4.5. táblázatban látható.

4.5. táblázat. A levél szintű fotoszintézis mérések tervezett mérési protokollja.

Helyszín	Eddy 1	Eddy 2	FACE	Trágyatartam
Fotoszintézis				
Gyakoriság	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)
Kampány-mérések	Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve	Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve	-	Alkalmi kampány időjárási eseményekhez időzítve
Ismétlések	6	6	4	4

4.2.11. *In-situ* roncsolásmentes gyökérnövekedés monitoring



A biogeokémiai körfolyamatok, így az egyes ÜHG-k keletkezése is jelentős részben köthető a talajban zajló folyamatokhoz. Ezen folyamatok meghatározó tényezője a gyökérzet jelenléte, kezdve a talajból történő vízfelvételtől a gyökérlégzésen át a szimbióta baktériumközösségek tevékenységéig.

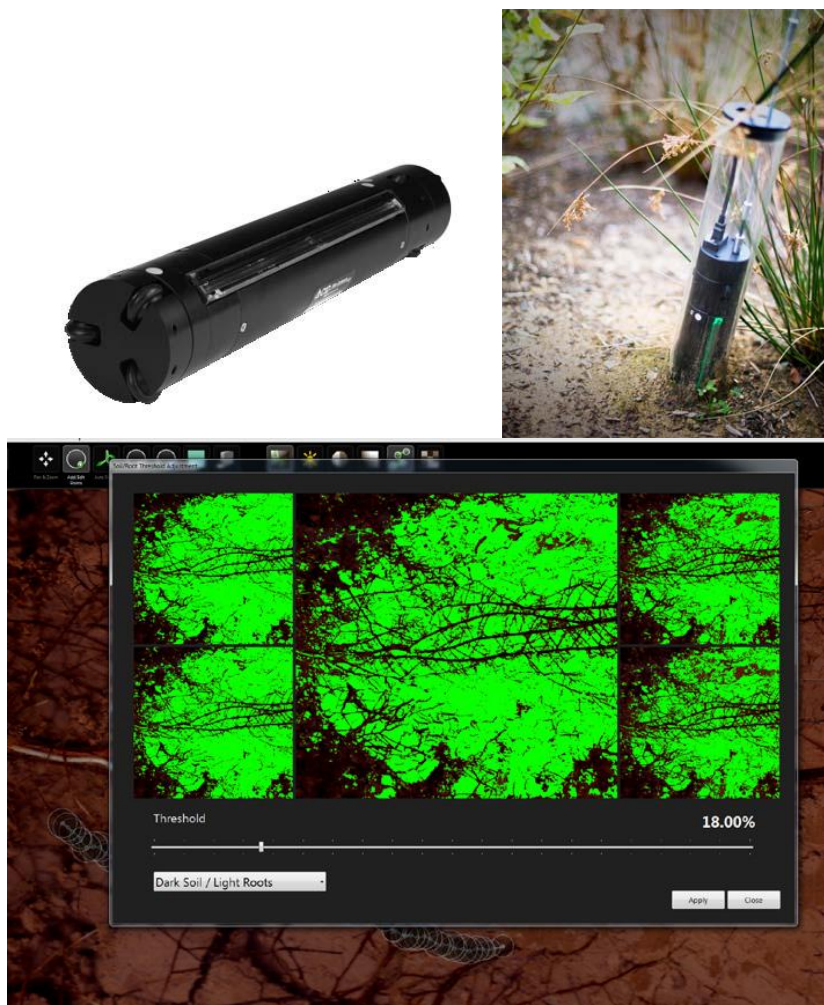
A talajból a CO₂ emissziójának vegetáció aktivitásától és a fenológiai fázistól függően jelentős része autotróf, vagyis növényi eredetű, a gyökérlégzés hozzájárulásából fakadóan. A gyökérrespirációt a növény fejlettsége mellett (biotikus) a felszín feletti növényi részek gázcseréjéhez hasonlóan a pillanatnyi környezeti (abiotikus) feltételek is meghatározzák. A talaj CO₂ kibocsátásának megértéséhez szintén nélkülözhetetlenek a gyökér növekedésre vonatkozó információk.

A vegetációs időszakon át a gyökérnövekedés, és a gyökér biomassza fontos információt nyújt az talajrespiráció autotróf komponensének becsléséhez, ugyanakkor fontos modellezési paraméter is egyben, így a mintaterületeken mérése kiemelten fontos.

Módszerek, helyszínek

Az *in situ* gyökérmegfigyeléseket a talaj ÜHG fluxus mérésekkel azonos helyszíneken tervezzük, azokat kiegészítendő, valamint az integrált modellrendszer adatigényét kiszolgáló. Az összes helyszínen, de különösen a FACE gyűrűkben, melyek kiterjedése miatt a növényszám korlátozott, különösen ügyelnünk kell a lehető legkevésbé destruktív megoldásokra, monitoring jellegű rendszeres méréseknél főként.

A minirhizotron módszer lehetőséget nyújt a felszín alatt a gyökérzet roncsolásmentes vizsgálatára destruktív mintavétel nélkül, akár teljes vegetációs időszakon, akár több éven keresztül. A CI-600 (CID Bioscience, Camas, WA USA) módszer optikai elven működik, a talajba lehelyezett átlátszó csöveket a gyökérzet körülnövi a vegetációs időszak során, a csöbe behelyezhető nagyfelbontású képalkotó eszközzel a gyökérzet szerkezetéről képet kaphatunk (4.56. ábra). A képek utólagos feldolgozásával a gyökér vastagságra és gyökérhosszra vonatkozó információkat kaphatunk, melynek rendszeres monitoringjával a gyökérnövekedés dinamikáját követhetjük. Az így nyert adatokat felhasználhatjuk a talajfluxusok jobb megértéséhez, ugyanakkor fontos adatokat szolgáltatnak modellfejlesztéshez is.



4.56. ábra. A CI-600 gyökérszkenner és az eredményül kapott feldolgozott kép.

A tervezett mérési protokoll az 4.6. táblázatban látható. A négy fő GINOP helyszín mindegyikén tervezünk méréseket. A mérési gyakoriságot összehangoljuk a többi mérés időpontjával (talaj ÜHG fluxus, fotoszintézis).

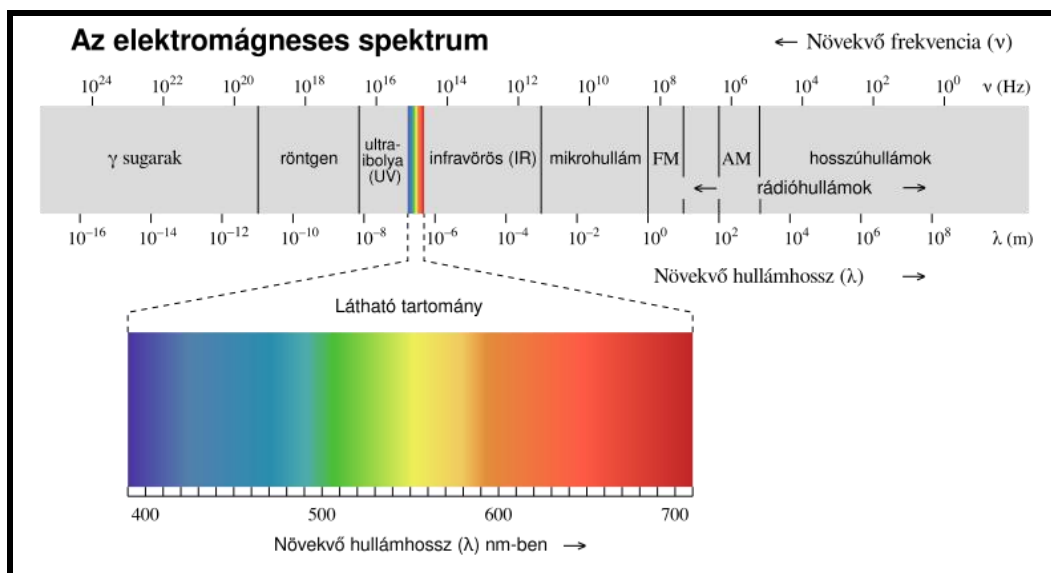
4.6. táblázat. a GINOP helyszíneken tervezett mérési protokoll.

Helyszín	Eddy 1	Eddy 2	FACE	Trágyatartam
Gyökér				
Gyakoriság	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páros héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)	kéthetente (pl. páratlan héten)
Kampány-mérések	-	-	-	-
Ismétlések	8	8	4 ismétlés/gyűrű = 3-3/kezelés	4

4.2.12. Hiperspektrális távérzékelés



A hiperspektrális távérzékelés a passzív távérzékelés azon része, amelyben egy adott hullámhossztartományon (jellemzően az ultraibolya és a termális infravörös közötti szakasz) belül folytonosnak tekinthető spektrális információt kapunk a felszínről, a multispektrális érzékelők diszkrét spektrális sávjaival szemben (4.57. ábra). Ezen módszer segítségével pontosabb képet kaphatunk a különböző felszínborítási elemek jellemzőiről (pl. vegetáció esetén biomassza- és nedvességtartalom; talaj esetén ásványi anyagtartalom a felszínen és a felszínközeli rétegben – sófelhalmozódás, szikes területek). A megfelelő spektrális sáv használatával, adott jellemzőn keresztül lehetővé válik a különböző felszínborítási kategóriák vizsgálata, térképezése.



4.57. ábra. Elektromágneses hullámspektrum (Forrás: www.wikipedia.org).

A hordozó járműtől függően megkülönböztetünk műholdas, légi illetve földi szenzorokat. A légi hordozójármű klasszikusan repülőgép, azonban az utóbbi években egyre nagyobb teret nyertek a pilóta nélküli járművek (UAV – Unmanned Aerial Vehicle) a föld közeli távérzékelésben. Típustól függően általában több tíz, merevszárnyú platform esetén

akár néhány száz hektáros terület felmérése is lehetséges cm-es terepi felbontás mellett, szemben a műholdas távérzékelés néhány tíz méter/pixel felbontásával. További fontos előnyük egyrészt a műholdakhoz képesti nagyobb időbeli rugalmasság, másrészt a hagyományos repülőkkel összehasonlítva a költséghatékonyság a korábban említett területméretek esetén.

Hiperspektrális multikopteres távérzékelés lehetőségei a Cubert UHD-185 kamera érzékelőjén keresztül

A jelenleg elérhető kisméretű hiperspektrális érzékelők közül a németországi Cubert GmbH által fejlesztett UHD-185 (FireFly) „snapshot” kamerát (4.58. ábra) alkalmazzuk. Érzékelője 125 sávban, 450–950 nm hullámhossztartományban, 4 nm-es spektrális felbontásban gyűjti a felszínről reflektált elektromágneses sugárzást. A duális szenzorral rendelkező kamera leggyorsabb „záridője” 1 ms, így lényegében elkerülhető bemozdult képek készítése. A szenzorok egy 1000×1000 pixeles felbontású pankromatikus, valamint egy 50×50 pixeles hiperspektrális képet rögzítenek. Ez a felbontás gyakorlati példán azt jelenti – az első hallásra igen kevésnek hangzó 50×50 pixel ellenére – hogy akár egyezred másodperc alatt jutunk 2500 felszíni mintavételi pont spektrális tulajdonságához!



4.58. ábra. Cubert UHD-185 kamera és a hozzátartozó miniszámítógép.

UAV és alkalmazása

Az UHD-185 kamera és a hozzátartozó mini számítógép-adattároló egység hordozására egy CarbonCore Cortex X8 oktokofter (4.59. ábra) áll rendelkezésre. Kialakítása és teljesítménye lehetővé teszi a 840 g össztömegű kamera és perifériái alkalmazását 15 perces időtartamra, ez idő alatt nagyjából 2-3 ha-os terület mérhető fel 100 m relatív repülési magasságon, 2 cm-es terepi felbontás mellett. A repülések számát a rendelkezésre álló akkumulátorok szabják meg, jelenleg hat repüléshez elegendő akkumulátorral rendelkezünk.



4.59. ábra. CarbonCore Cortex X8 oktokofter.

UAV felmérés lépései:

- az oktokofter és a kamera is vezeték nélküli kapcsolatban áll egy terepi lappal, melynek segítségével egyrészt a drón repülésének, másrészt a kamera képrögzítésének a nyomon követése valósul meg;
- felméréendő terület kijelölése a terepi lappal futó szoftverben: Zero-Tech GCS (GCS – Ground Control Station), útvonal automatikus tervezése a kamera paraméterei (fókusz távolság, szenzorméret, felbontás stb.), repülési magasság, kívánt terepi felbontás és átfedések függvényében;
- útvonal feltöltése az UAV-ra telemetria kapcsolaton keresztül;
- Cubert UHD-185 kamera kalibráció: Edelweiss szoftverben, Spheroptics Spectralon reflektancia „csempére” ~95-100% reflektancia;
- kalibráció eredménye alapján a kamera beállítja a helyes felvételezési időt ms-ban;
- Timelapse funkció beállításánál megadjuk hány másodpercenként, illetve mennyi ideig készítsen felvételt a kamera;
- repülés végrehajtása autonóm üzemmódban;
- leszállást követően az adatok letöltése és feldolgozása.

Esettanulmány – Szappan-szék

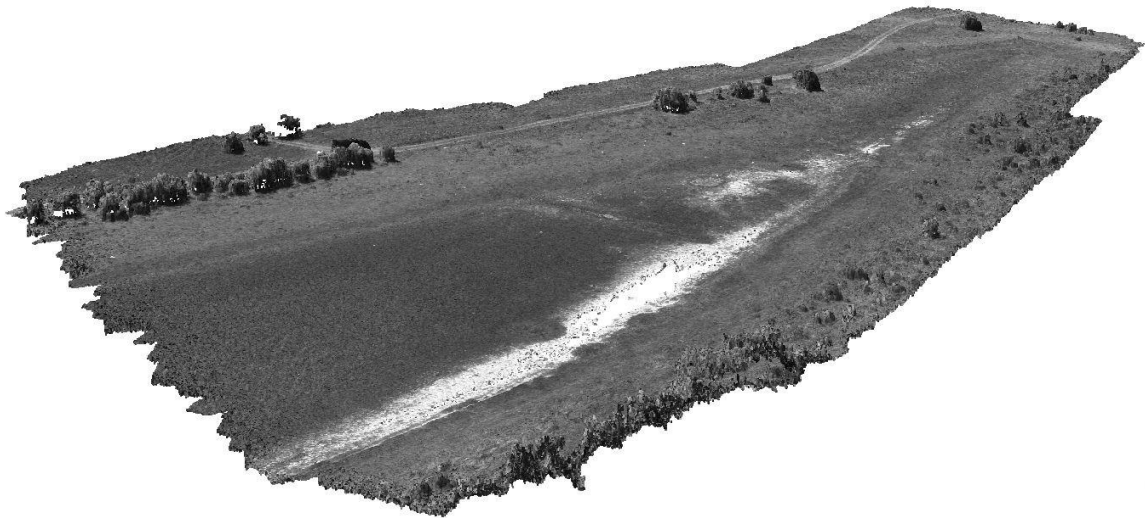
Az elmúlt időszak felmérései igazolják, hogy a látható fény valamint a közeli infravörös tartományban folytonos információt biztosító adatgyűjtő eszközzel készült pár cm-es felbontású felmérésekkel a mikro domborzat mellett a felszín spektrális tulajdonságai is nagy részletességgel vizsgálhatók váltak.

Szappan-szék (É46°53'14.54"; K19°25'26.75") északi részén a felszíni szikes területek detektálása, felszíni sófelhalmozódás spektrális vizsgálata. 2 ha-os terület, 2.2 cm/pixel felbontás, 900 fotó (4.60. ábra).

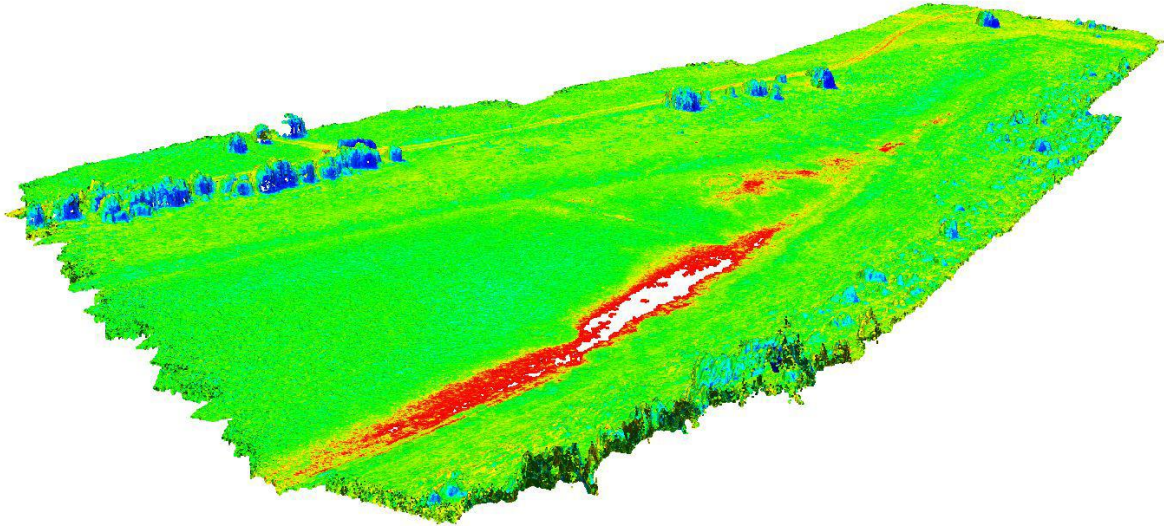


4.60. ábra. Szappan-szék (Forrás: Google Earth Pro).

A rögzített képek fotogrammetriai feldolgozásával úgynevezett sűrű pontfelhőt (4.61. és 4.62. ábra), az abból interpolált felszínmodellt és a képek mozaikolásával előállt ortofotó mozaikot (4.61. ábra) készítettünk. A pixel értékeket átszámolva só indexre (SI – Salinity Index $SI = \sqrt{638 \text{ nm} (Band56) \times 430 \text{ nm} (Band1)}$) elkülöníthetők a felszíni szikes részek a vegetációtól, a nagy terepi felbontás miatt akár cm^2 -es részletességgel is (4.63. ábra alsó része).



4.61. ábra. 900 darab, 1000×1000 pixeles pankromatikus felvételtől generált sűrű pontfelhő.

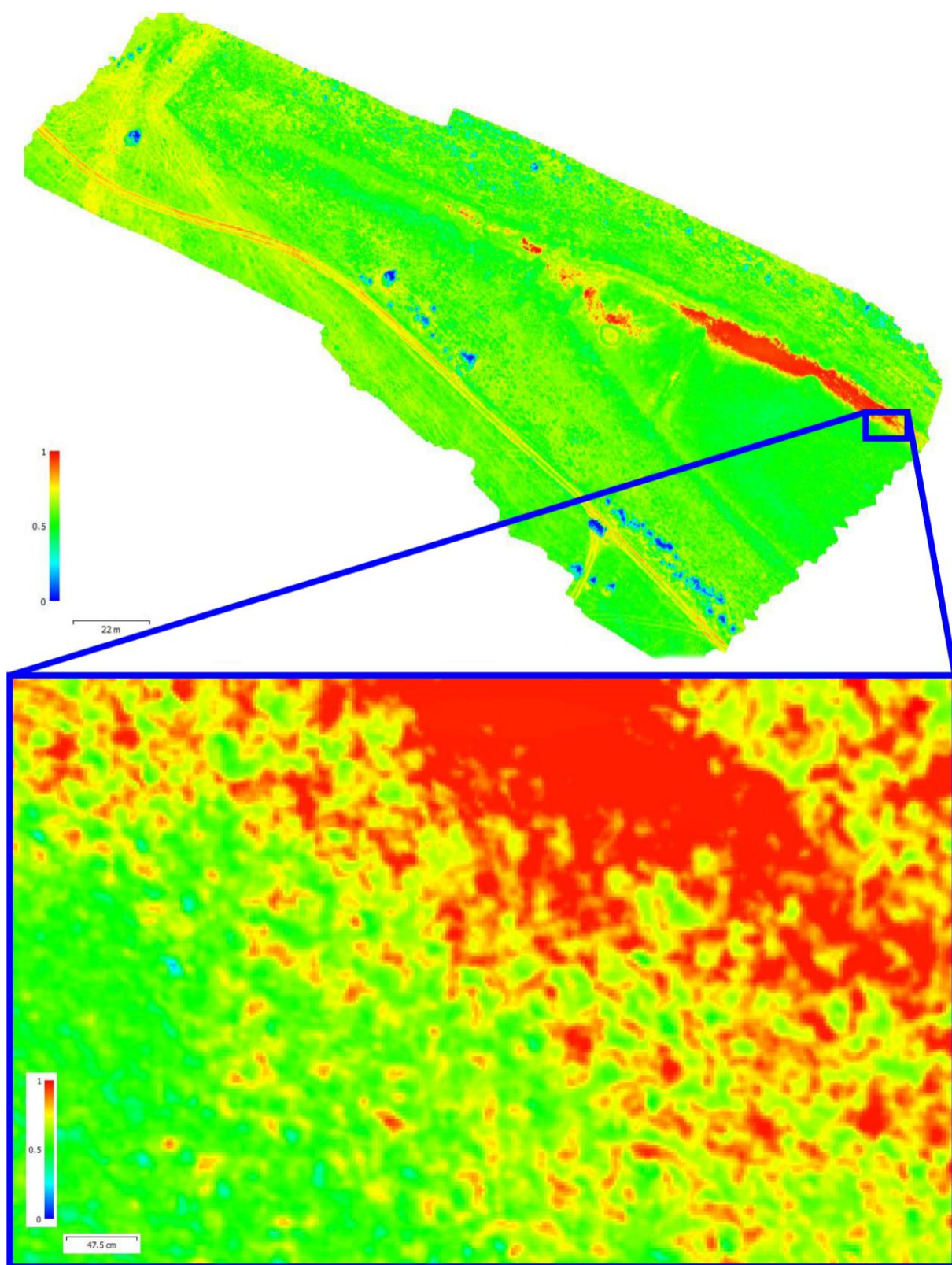


4.62. ábra. 900 db 50×50 pixeles felbontású natív hiperspektrális felvétel alapján összeállított pontfelhő.

Az AgroMo projektben való alkalmazási területek

A projekt keretében a távérzékelte mérések segítségével célunk a projekt kutatási területein, helyszínein (Eddy1, Eddy2, FACE) folyó **mérések térbeli kiterjesztésének** megalapozása, melyet spektrális felvételek (légi/űrbázisú/telepített), és rácsponthoz végzett felszíni mérések felhasználásával szeretnénk megvalósítani. Emellett elvégezzük a különböző vegetációs indexek (pl. NDVI, PRI) alkalmazhatóságának vizsgálatát a növény állapotának és válaszreakcióinak detektálásában (i) különféle haszonnövények (*tervezett*: kukorica (C4), búza (C3)); (ii) jelenlegi és emelt CO₂ szint esetén. A megemelkedett légköri CO₂ koncentrációra adott növényi válasz spektrális tulajdonságokra gyakorolt hatása kevésbé kutatott téma, noha fontos kérdés, hogy vajon a jelenleg alkalmazott spektrális indexek/mutatók mennyire maradnak informatívak megváltozott körülmények között. Ennek a kérdésnek a megválaszolásához nyújt egyedülálló lehetőséget a FACE kísérlet.

A különböző forrásból származó távérzékelte információk és a felszíni, *in-situ* mérések adatainak összehangolásával tábla szinten nyerhetünk kvantitatív ismereteket a mezőgazdasági ökológiai rendszer állapotáról különféle körülmények között. A rendelkezésre álló UAV (CarbonCore Cortex X8) és a rá rögzített hiperspektrális kamera (Cubert UHD-185 FireFly) platformmal a felszínközeli szinten szeretnénk hiperspektrális felvételeket készíteni a felszínről. Ez a megközelítés lehetővé teszi a műholdas távérzékelésnél rugalmasabb adatgyűjtést, melyet lehetőség szerint a felszíni ÜHG fluxus, és növényi (pl. LAI) mérésekkel szeretnénk összehangolni. A felszíni méréseket kéthetes gyakorisággal tervezzük minden helyszínen, ugyanakkor az időjárás az UAV felszállásokat erősebben korlátozhatja (szél, megvilágítási viszonyok), így a havi szintű adatgyűjtés a valószínűsíthető kimenetel (4-5 alkalom egy vegetációs periódusban).



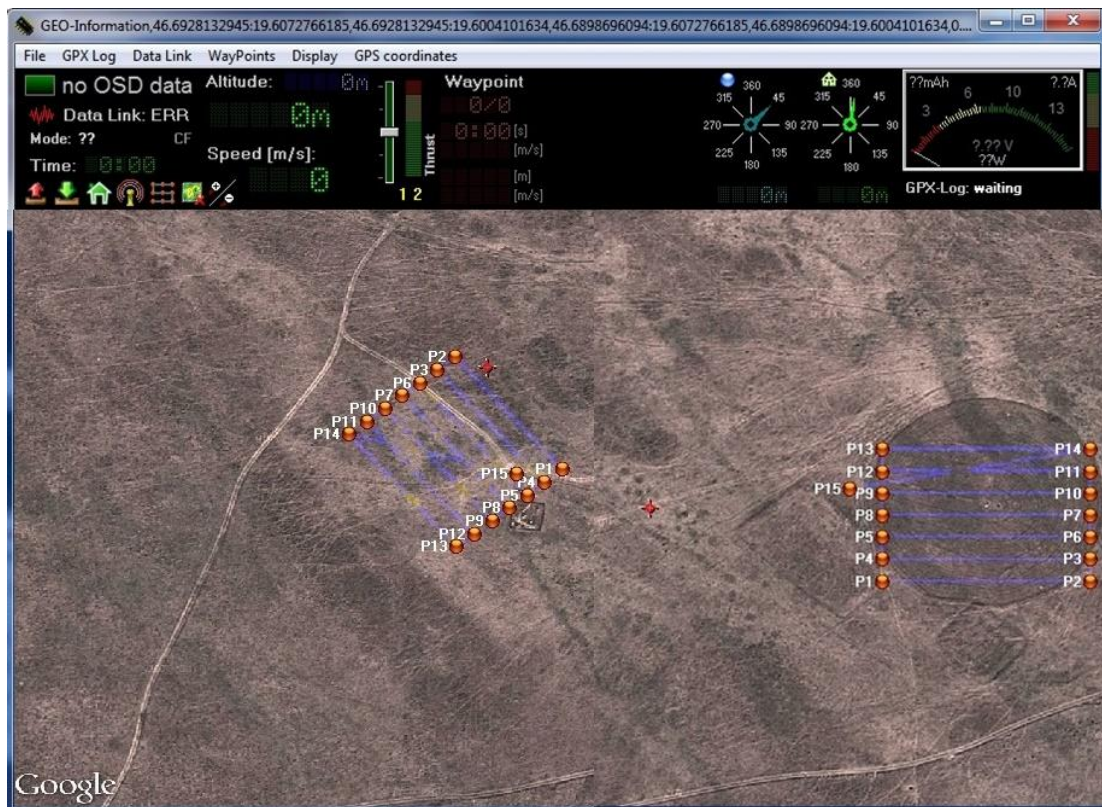
4.63. ábra. Szappan-szék mintaterület ortofotója só index értékek alapján megjelenítve (kevert terület részlete a nagyításon).

Biomassza becslés MiniMCA multispektrális fényképezőgép használatával

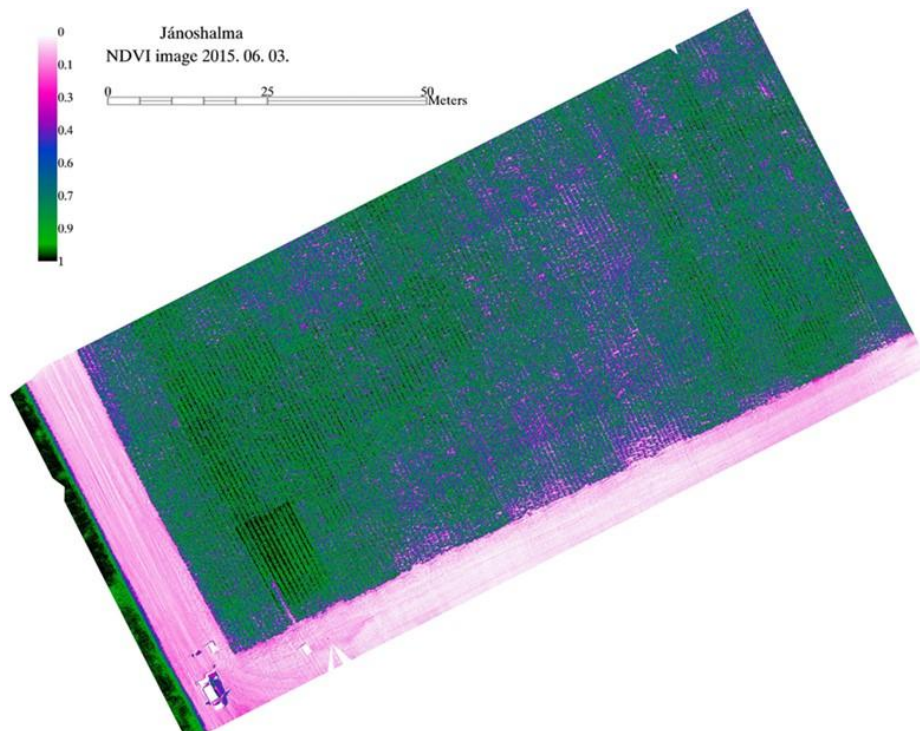
A hiperespektrális kamerákkal szemben, bizonyos esetekben jó alternatíva lehet multispektrális (4-10 szűk spektrális tartományban érzékeny) kamerák használata. Az általunk használt TetraCam MiniMCA kamera a következő 5 sávban érzékeny: 550, 680, 740, 800, 970 nm. Ezekből a reflektancia adatokból NDVI ill. egyéb vegetációs indexek számítása lehetséges. A kamerát egy Mikrokofter XL típusú oktokofter szállítja. Állandó azonosító pontok (Ground Control Point, GCP) alkalmazása megkönnyítheti az ortofotók mozaikolását.

A felvétel készítés lépései a MiniMCA kamera estében:

1. Kalibráció: teflon lapok fényképezése, amivel tulajdonképpen a beérkező sugárzás mennyiségét mérjük meg, amit aztán a reflektancia számításához használunk fel.
2. Repülés (Mikrokofter XL) állandó útvonalakon (4.64. ábra), a repülés tervezése és a kommunikáció a Mikrokofter saját szoftverével történik.
3. Helyszíni biomassza mintavétel 50x50-es kvadrátokból (15 db):
 - a kvadrátok helyének bemérése STNOEX S8 GPS segítségével,
 - terepen friss tömegmérés,
 - szárítás laborban, utána száraztömeg mérés.
4. A multispektrális felvételek feldolgozásának lefontosabb lépései:
 - a) 10 bites raw képek konverziója multipage tiff képekké (reflektancia).
 - b) 3-3 sáv ortomozaikolása PhotoScan szoftverrel.
 - c) NDVI képek (4.65. ábra), biomassza térkép készítése.



4.64. ábra Az útvonal tervező szoftver és a repülési útvonalak a bugaci mintaterületen.



4.65. ábra Egy kukoricatábla NDVI képe, ami az MCA multispektrális szenzor felvételeiből készült.

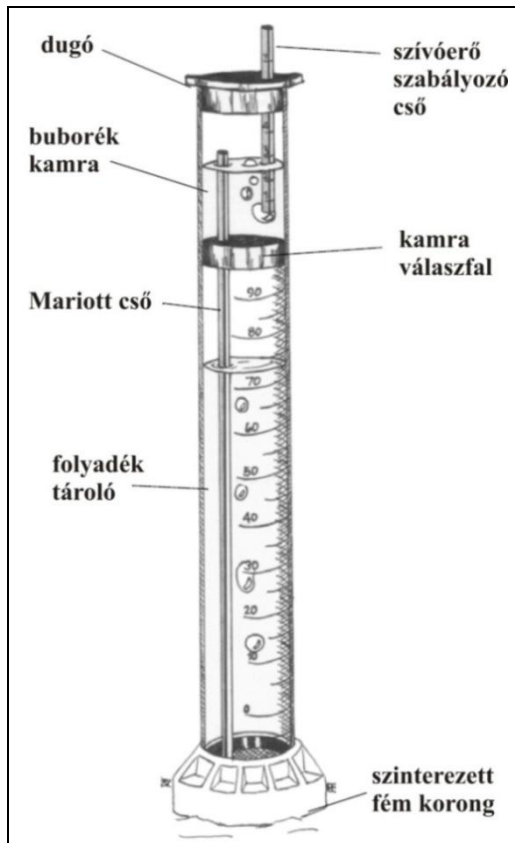
4.2.13. Talaj hidraulikus vezetőképesség, vízbeszivárgás és víztaszítás meghatározása



A talaj hidraulikus vezetőképessége fontos belső paramétere a Biome-BGCMuSo modellnek, következésképp az Agromó rendszernek is, ezért fontos ennek minél pontosabb meghatározása.

Terepi körülmények között a minikorongos beszivárgás mérőnek is nevezett *Mini Disk Infiltrómetert* (MDI) (4.66. ábra) alkalmazzuk homok, vályog és agyag fizikai féleségű területeken, ahol méréseinket minimum 5 ismétlésben végezzük el. Azért alkalmazzuk ezt a módszert, mert a műszer könnyen kezelhető, kis mérete miatt egy méréshez mintegy 135 cm³ víz elegendő, ezáltal a szállítása is egyszerű. Tudományos kísérletek bizonyították, hogy a Mini Disk Infiltrómeterral mért vízvezető képesség értékek szignifikánsan nem különböznek a világszerte ismert és alkalmazott Tension Disc Infiltrómeterral kapott eredményektől, illetve, hogy víztaszító talajok esetében is alkalmazható.

A mérésekkel a telítésközeli vízvezetőképesség értékét határoztuk meg 2 cm H₂O szívóerő mellett, melyet egy szabályzó cső segítségével (4.67. ábra) állítottunk be. Agyag talaj esetében, a kisebb áteresztőképesség miatt, ezt 0,5 cm-re módosítjuk. A mérőműszer egy 4,5 cm átmérőjű, 0,5 cm vastag szinterezett fémporból sajtolt porózus korongon keresztül érintkezik a talajjal. A mérés során a talaj, az adott szívóerő függvényében vizet vesz fel, így vízszintcsökkenés jelentkezik és vákuum keletkezik a folyadék tárolóban, mely hatása továbbítódik a buborék kamrába a Mariott csövön keresztül. Ennek hatására levegő lép be először a buborék kamrába, majd a Mariott cső közvetítésével eljut a folyadék tárolóba, ahol kiegyenlítődik a nyomás és a talaj újból vizet vesz fel. A mérés során az egységnyi idő alatt tapasztalható vízszintcsökkenést jegyezzük le.



4.66. ábra: A Mini Disk Infiltrométer felépítése (Ábra forrása: Decagon, 2010).



4.67. ábra: MDI használat közben (Fotó: Sándor Renáta).

A talajban történő vízmozgás leírása szempontjából meghatározó, hogy megfelelően jellemezzük a felszínre hulló csapadék beszivárgási körülményeit és az infiltráció folyamatát. Számos talajfizikai tulajdonság módosíthatja a beszivárgás ütemét, ezek közül napjainkban egyre nagyobb figyelmet kap a víztaszítás, mely egy átmeneti talajtulajdonság (Sándor, 2014; Sándor et al., 2015a,b, Sándor, 2015). Széles körben ismert, hogy néhány talaj bizonyos körülmények között víztaszítóvá válhat, mely jelentősen befolyásolhatja a talajok hidrológiai tulajdonságait. A kritikus mértéket meghaladó víztaszítás világszerte több helyen kimutatható (Dekker et al., 2005), mely hatással van a talajok hidrológiai tulajdonságaira, s ezáltal az ökoszisztémák produktivására is. A kismértékű víztaszítás már késlelteti a beszivárgás elindulását, de nem akadályozza meg (Hunter et al., 2011), továbbá befolyásolja a felszíni lefolyás mennyiségét (Doerr, 1998, Lichner et al., 2012) is. A talajok víztaszításának mértéke függ a talaj nedvességtartalmától. A két jellemző között fordított arányosság áll fenn (Doerr és Thomas, 2000). A száraz víztaszító talaj általában nehezen nedvesedik át csapadék vagy öntözés hatására (Dekker et al., 2001), de ha már átnedvesedett, könnyen beszivárog a víz.

A víztaszítás egy átmeneti talajtulajdonság, mely igen nagymértékű térbeli változatossággal (Ritsema és Dekker, 2003) és időbeli változékonysággal rendelkezik (Rodríguez-Alleres és Benito, 2011) hasonló vegetációs körülmények között. Talajműveléssel a víztaszítás mértéke jelentősen csökkenthető (Hallett et al., 2001).

A víztaszítás mértékét meghatározza a terület fizikai félesége, szervesanyag és karbonát tartalma, valamint növényborítása, ezért különböző textúrájú talajokon végezzük el vizsgálatainkat, hogy a modellt megfelelően kalibrálhassuk. A víz és etanol beszivárgási méréseket Mini Disk Infiltrométerrel hajtjuk végre különböző fizikai féleségű talajokon eltérő felszínborítások esetén.

A talaj nedvesíthetőségét – a világszerte egyre elterjedtebb – *Water Drop Penetration Time (WDPT)* vagyis vízcsepp beszivárgási idő mérésével vizsgáltuk (4.68. ábra). A vizsgálat során a talaj felszínére pipetta segítségével elhelyezünk egy vízcseppet és mérjük a beszivárgáshoz szükséges időt, mely mértékéből következtethetünk a talaj víztaszítására. A víztaszítás mérések kiértékeléséhez Dekker és Ritsema (1996) skáláját alkalmazzuk, akik öt talajnedvesíthetőségi kategóriát különböztetnek meg a felszínre helyezett vízcsepp beszivárgáshoz szükséges idő (t) alapján: (1) nedvesíthető (wetable), vagy nem víztaszító (non water repellent) ($t < 5$ s); (2) kissé víztaszító (slightly) ($t = 5-60$ s); (3) közepesen víztaszító (strongly) ($t = 60-600$ s); (4) erősen víztaszító (severely) ($t = 600-3600$ s); (5) extrém víztaszító (extremely water repellent) ($t > 3600$ s). Víztaszítás vizsgálatokat homoktalajokon végezzük el, mivel az előzetes vizsgálatok alapján az agyag és vályog fizikai féleségű talajok jól nedvesíthetőek, pl. a martonvásári talaj nem mutat víztaszítást.



4.68. ábra. Talaj nedvesíthetőség (WDPT) teszt homoktalajon (Fotó: Sándor Renáta).

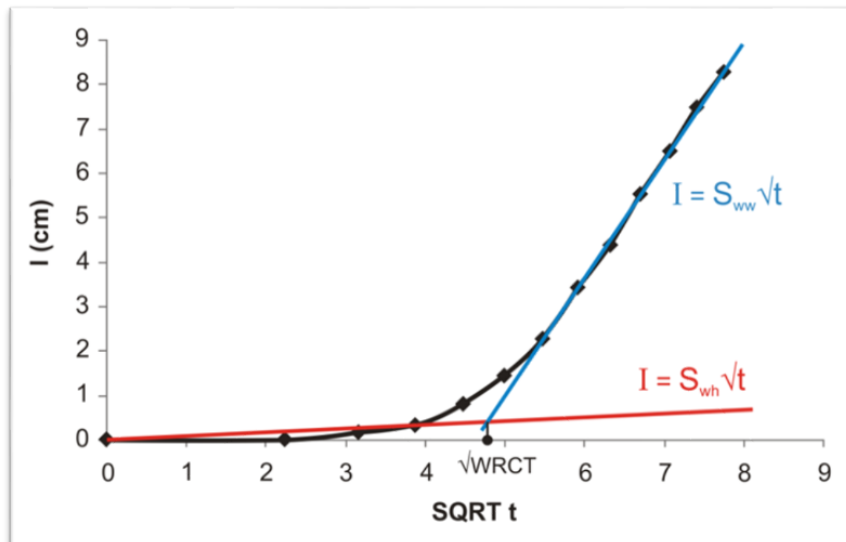
A talajok térbeli heterogenitás vizsgálata során egy $0,5 \text{ m}^2$ -es területet a 4.69. ábrán látható módon 10×10 cm-es cellára osztunk fel. A vizsgálatok minimum 7 esőmentes nap után végezhetőek csak el. Az $0,5 \text{ m}^2$ -es terület celláiban szisztematikus mintavételezést (systematic sampling) alkalmazva hidraulikus vezetőképesség mérést végzünk MDI-vel, illetve megvizsgáljuk a talajnedvesíthetőséget és szorpciós értékeit. A hidraulikus vezetőképesség méréséhez azért a Mini Disk Infiltrómétert választjuk, mert Orfánus és munkatársai (2014) kimutatták, hogy a MDI esetében a kezdeti beszivárgási ütem független a talaj nedvességállapotától, így összehasonlíthatóvá válik több mintaterületen végzett kísérlet is.

	A	B	C	D	E
1	WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI
2		WDPT; SWC; Se		WDPT; SWC; Se	
3	WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI
4		WDPT; SWC; Se		WDPT; SWC; Se	
5	WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI		WDPT; SWC; k; S _{ww} ; S _{wh} ; S _w ; WRCT; RI

4.69. ábra. Nedvességtartalom (SWC), víztaszítás (WDPT,WRCT,RI), hidraulikus vízvezetőképesség (k), víz szorpció (S_{ww}, S_w, S_{wh}) és etanol szorpció (Se) vizsgálatok 0,5 m²-en belüli elrendezése.

A kumulált beszivárgás és az eltelt idő felhasználásával megállapítjuk a talaj vízszorpciós (S_w) és etanol szorpciós (S_e) értékeit, továbbá a beszivárgás kezdeti üteme szerint elkülönítjük a vízszorpció hidrofób (S_{wh}) és nedvesíthető (S_{ww}) szakaszait, melyekből a *Repellency Index (RI)* – víztaszítási mutatót határozzuk meg. A talaj víztaszítását a világszerte közzismert *Water Drop Penetration Time (WDPT)*, vagyis vízcsepp beszivárgási idő mérésével is meghatározzuk (Doerr et al., 2000), melyből a víztaszítás megszűnési idejét – *Water Repellency Cessation Time, WRCT* – Lichner és munkatársai (2013) módszerével számítjuk ki.

A 4.70. ábra a talaj szorpciós értékének meghatározását szemlélteti, a kumulált beszivárgás (*I*) és az eltelt idő (*t*) felhasználásával. Továbbá, a beszivárgás kezdete szerint elkülönítettünk a vízszorpció hidrofób és nedvesíthető szakaszát. Ezen elkülönítés segítségével számszerűsíthetjük a modell számára a víztaszító homoktalajok csapadékbeszivárgási ütemét, hozzájárulva a modell eredmények pontosításához.



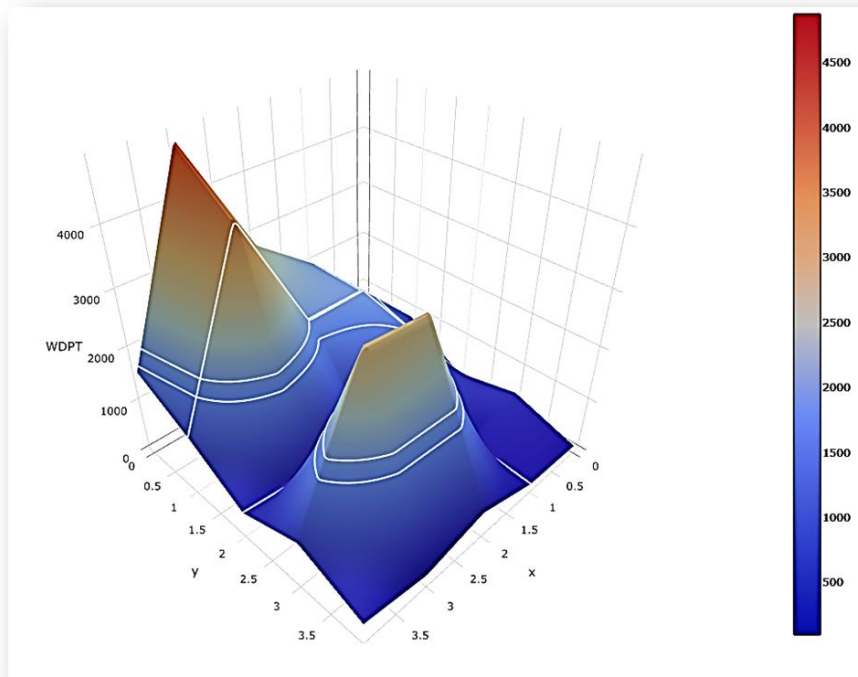
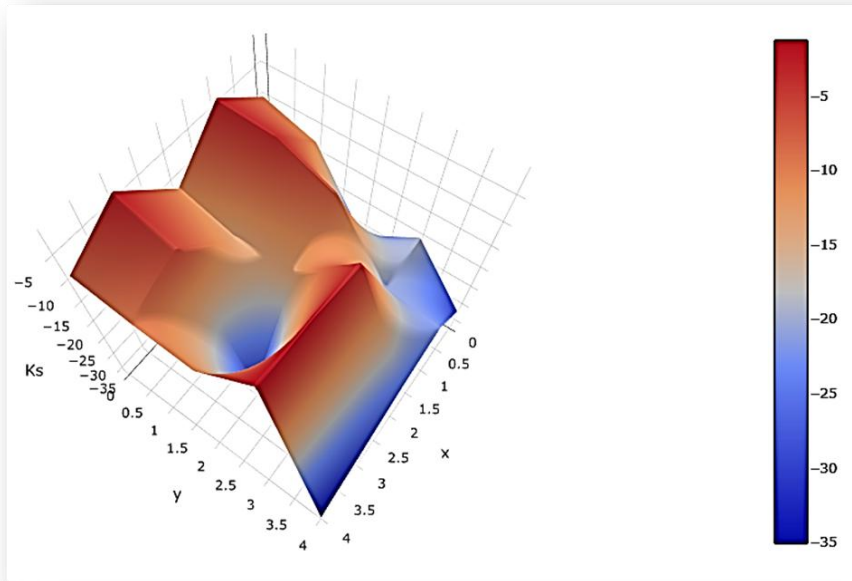
4.70. ábra. „Hokiütő” szerű kapcsolat a kumulált beszivárgás (I) és az eltelt idő gyöke ($SQRT t$) között a csólyospálosi homoktalaj esetén 2017 júniusában.

Amennyiben a talajfelszínen, pedon léptéken mért K_S (4.71. ábra, felső) és WDPT (4.71. ábra, alsó) értékek térbeli heterogenitását ábrázoljuk – köztük folytonosságot feltételezve – akkor a csólyospálosi víztaszító, helyenként erősen és extrém mértékben víztaszító részei, lokális beszivárgási zónák kialakulását mutatják. Így a beszivárgás nem egyöntetűen, rétegről rétegre történik, mint ahogy számos modell is feltételezi, hanem „ujjszerűen”, a beszivárgási zónák közt száraz lencsék hagyva, melyeket víztaszító körülmények között az adott talaj nedvességtartalmának túlbecsléséhez vezethet, így növelve a modell bizonytalanságát.

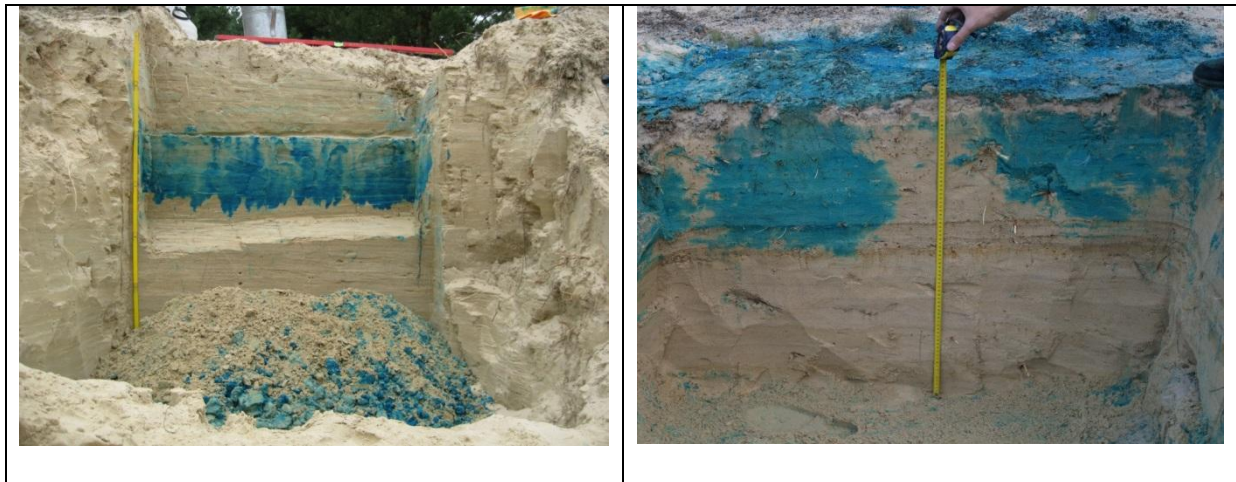
A 4.71. ábrán szereplő mutatókból és mérőszámokból következtethetünk, hogy egy terület víztaszítási tulajdonságaira, és hogy egy terület felszínére érkező csapadék milyen valószínűséggel szivárog mélyebb talajrétegek felé és raktározódik a talajban, avagy a csapadék elszivárgási zónák (gyökerek, hangya és giliszta járatok, stb.) mentén elfolyik, köztük száraz lencsék hagyva, melynek vertikális eloszlását az 4.72. ábra szemlélteti.

Egy csólyospálosi példa szemlélteti, hogy a különböző földművelések (szántó, parlag, fiatal kaszáló/idős parlag) hatására eltérő méretű valószínűséggel találunk víztaszító körülményeket 2017 nyarán (4.73. ábra). Szántó esetében a beszivárgás gyorsan végbemegy és a talaj jól nedvesíthető. A mezőgazdasági műveléssel felhagyott területeken azonban a parlagokon jelentősen, egy nagyságrendnyivel megnövekedik az átlagos víztaszítás értéke, míg fiatal kaszálók esetében a talajok nedvesíthetősége tovább csökken egy nagyságrenddel.

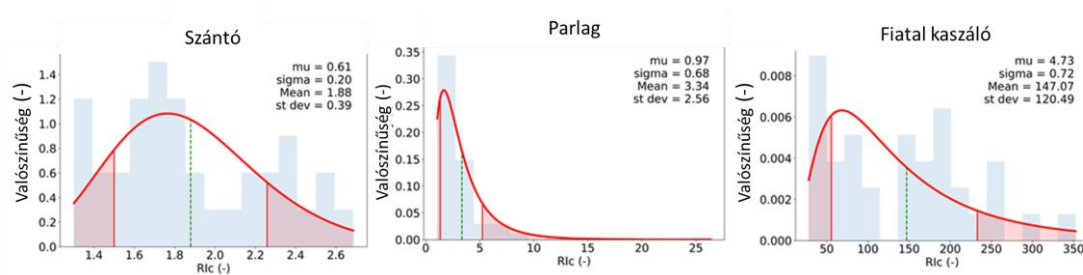
Ez fokozza a lokális beszivárgási zónák kialakulását, mely következtében egyre kevésbé valósul meg az idealizált, rétegről-rétegre történő beszivárgás. Ezért a modell fejlesztése szempontjából elengedhetetlen, hogy a jövőben a modell szimulációk figyelembe vegyék a művelés felhagyását követő talaj hidrológiai tulajdonságok átalakulását a lehullott csapadék és az utolsó művelés óta eltelt idő függvényében, ezzel növelve a modell megbízhatóságát víztaszításra hajlamos homoktalajok esetén, melyek nagy előfordulással a Duna-Tisza közén találhatók.



4.71. ábra. A hidraulikus vezetőképesség (K_s [cm/nap], felső) és víztaaszítás (WDPT [sec], alsó) egy 1 m^2 -en belüli térbeli heterogenitása.




4.72. ábra. Beszivárgási zónák nedvesíthető (bal) és víztaszító (jobb) talajokon (Fotó: Peter Surda).




4.73. ábra. Kombinált víztaszítás (RIc) előfordulási valószínűsége szántó, parlag és fiatal kaszáló területeken, Csólyospáloson, 2017 nyarán.

A talajvíztaszítás átmenetileg képes átalakítani a területre jellemző beszivárgási viszonyokat, ezzel csökkentve a talajrétegekben optimális körülmények között tárolható víz mennyiségét, így növelve a modell becslési bizonytalanságát. Ezen jelenség csökkentheti a modell megbízhatóságát víztaszításra hajlamos területek esetén, mivel a talajban potenciálisan tárolható víz mennyisége változik, melyet a modell túlbecsülhet. A régióra előrevetített klímaváltozási előrejelzéseket figyelembe véve: csökkenő csapadék mennyiség és a nyári hőmérséklet növekedése, a homoktalajok víztaszító tulajdonságának növekedése várható, mely negatívan hat a területek mezőgazdasági potenciáljára, tovább csökkentve a térség gazdasági versenyképességét. Jelenleg egyetlen modell sem veszi figyelembe a víztaszítás egyre fokozódó problémáját, mely egy új fejlesztési lehetőséget jelent az AgroMo számára, így segítheti a politikai és gazdasági döntéshozók munkáját a kedvezőtlen mezőgazdasági potenciálú homokterületek vonatkozásában is.

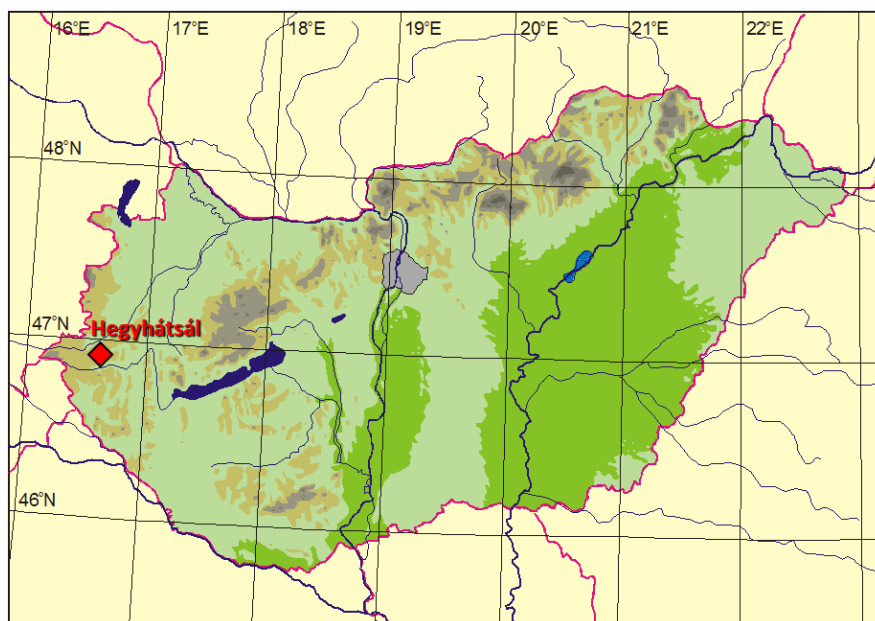
4.2.14. Léggöri üvegházhatású gázok háttérkoncentrációjának mérése Hegyhátsálon



Kísérleti környezet: egyéb hazai mérőhely (Hegyhátsál)
Méretskála: regionális skála
A vizsgálat tárgya: léggöri üvegházhatású gázok



Az AgroMo projektben tervezett FACE rendszer célszerű üzemeltetése megköveteli, hogy ismerjük a kísérletek szempontjából releváns üvegházhatású gázok léggöri háttérkoncentrációját. A projekt keretében fejlesztés alatt álló Biome-BGCMuSo modell (a leendő BBGC-MAG alapja) kalibrációja és validációja ugyancsak igényli ezeket az adatokat. Az üvegházhatású gázok hosszú léggöri tartózkodási idejük, a léggörben globálisan is meglehetősen egyenletesen elkeverednek, ezért nem feltétlenül szükséges a költséges eszközparkot igénylő háttérkoncentráció méréseket Martonvásáron végezni, támaszkodhatunk az országban máshol végzett mérések célszerűen feldolgozott adataira is. A FACE kísérlet helyszínéhez legközelebb eső üvegházgáz megfigyelő állomás a légvonalban 170 km-re eső Hegyhátsál község közelében található (4.74. ábra).



4.74. ábra. Az AgroMo projekthez háttér üvegházgáz-koncentrációkat szolgáltató hegyhátsáli mérőállomás elhelyezkedése.

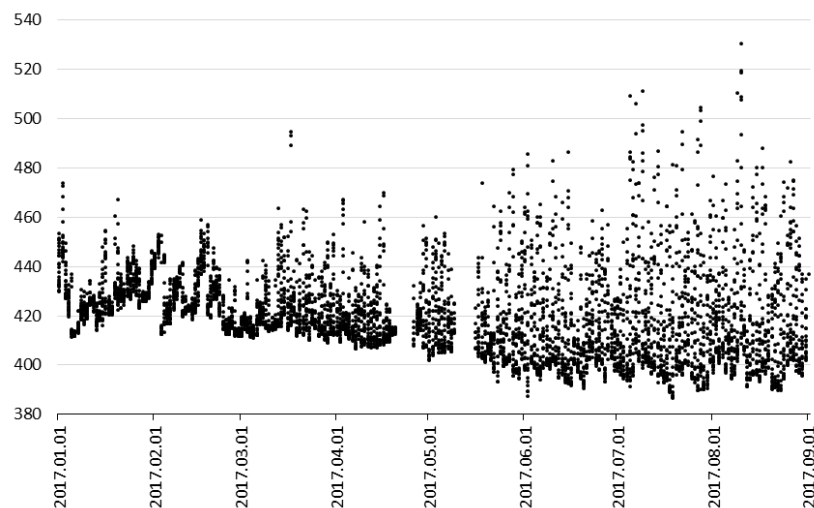


4.75. ábra. A háttér üvegházgáz-koncentráció mérések helyszíne, az Antenna Hungária Rt. hegyhátsáli adótornya.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett, de több intézmény méréseinek is helyet adó mérőhely az Antenna Hungária Rt. adótornya (4.75. ábra), ahol több magassági szinten folynak meteorológiai és levegő-összetétel mérések. Projektünkhöz a felszínhez legközelebb eső mérések illeszkednek.

Szén-dioxid koncentráció mérések 10 m, 48 m, 82 m és 115 m magasban folynak, melyek közül számunkra a 10 m-en végzett mérések a leghasznosabbak. A mérésekhez Li-Cor LI-7000 típusú nem-diszperzív infravörös spektrométert (NDIR) használnak (Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA), melynek skáláját a Meteorológiai Világszervezet (WMO) Központi Kalibráló Laboratóriuma által hitelesített négy standarddal kalibrálják. A mérések szigorú minőségellenőrzésen esnek át. A legutóbbi, 2015. évi globális mérésösszehasonlítás szerint a hegyhátsáli mérések eleget tesznek a mérési pontossággal szemben támasztott nemzetközi követelményeknek. A skálaeltérés a nemzetközi mérési skálától (WMO X2007) kisebb, mint 0,1 ppm (WMO, 2016).

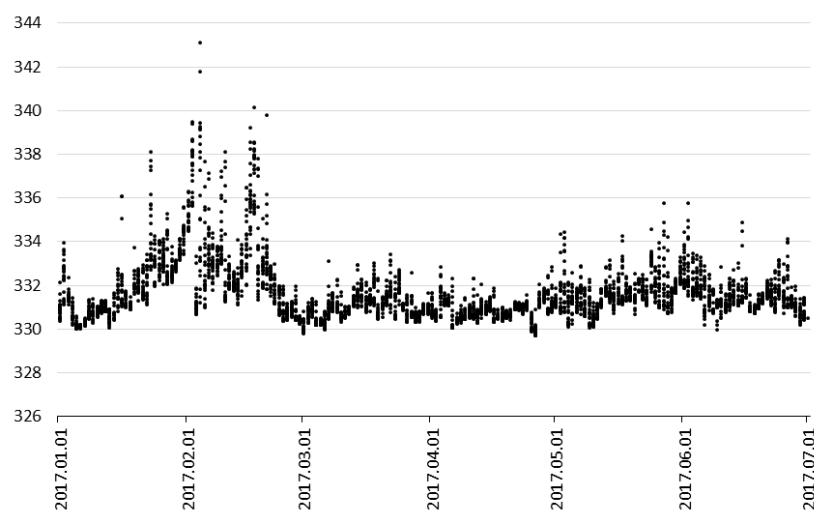
Az AgroMo projekt indulása óta a 10 m-es magassági szinten mért órás szén-dioxid adatokat az 4.76. ábra tünteti fel. A mérések jól mutatják a szén-dioxid koncentráció alakulásának jellemző évi menetét, a télen magasabb, nyáron alacsonyabb koncentrációt, továbbá a vegetációs időszak erőteljesebb napi koncentráció-ingását, a fotoszintézis-respiráció ciklus miatt előálló éjszakai magasabb és nappali alacsonyabb koncentrációkat. A FACE kísérlet behangolásakor tekintettel kell lennünk ezekre a természetes ciklusokra.



4.76. ábra. A szén-dioxid koncentráció órás átlagainak (ppm) alakulása Hegyhátsálon, 10 m-es felszín feletti magasságban.

Dinitrogén-oxid mérések csak 82 m-es magasságban folynak, így a munkánkhoz csak ezeket használhatjuk. A mérésekre egy Los Gatos Model 913-0014 EP N₂O/CO/H₂O típusú lézerspektrométert használnak (Los Gatos Research Ltd., San Jose, CA, U.S.A.). A gázelemzőt a Meteorológiai Világszervezet Központi Kalibráló Laboratóriumához közvetlenül kötődő európai ICOS Központi Kalibráló Laboratórium által hitelesített négy standard gázkeverékkel kalibrálják, így a mérések a nemzetközi WMO X2006A skálát használják. Az AgroMo projekt indulása óta a mért órás dinitrogén-oxid adatokat az 4.77. ábra tünteti fel.

A hegyhátsáli mérőállomáson 82 m-es magasságban WMO X2004 skálán precízen kalibrált folyamatos metán-koncentráció mérések is folynak. A hazai nem vizenyős talajok metán-forgalma azonban a korábbi szórványos mérések szerint (Haszpra, 2011) valószínűleg nem jelentős, ezért a mérések feldolgozására csak akkor kerül sor, ha ez a FACE kísérlet során nyert tapasztalatok alapján indokoltnak látszik.



4.77. ábra. A dinitrogén-oxid koncentráció órás átlagainak (ppb) alakulása Hegyhátsálon, 82 m-es felszín feletti magasságban.

4.3. Műholdas megfigyelések lehetséges szerepe

Jelenleg a távérzékelés széleskörű alkalmazási lehetőségei között világszerte a mezőgazdasági használat az egyik legjelentősebb és legerősebben alkalmazott/kutatott szakterület. A távérzékeltektől a növényfejlődés megfigyeléséhez korszerű és nagy potenciállal rendelkező adatforrást jelentenek. Az így felvételezett adatforrásokra támaszkodva a növényfejlődés (fenológia) megfigyelhetővé és modellezhetővé válik. Emellett a távérzékeltektől adatai kiszámíthatóan, szisztematikusan és folyamatosan a teljes év során elérhetőek úgy, hogy nagy területekről képesek információt gyűjteni.

A mezőgazdasági távérzékelés nem újkeletű dolog, annak gyakorlati és tudományos alkalmazásai az 1970-es évekre nyúlnak vissza. Azonban jelenleg soha nem tapasztalt lehetőségek állnak rendelkezésünkre a korszerű technológiai előrelépéseknek, az amerikai és európai szakpolitikai programoknak és az ezekkel kéz a kézben járó nyílt adathozzáférésnek, nyílt adatpolitikának köszönhetően.

A nyílt adatfelhasználás lehetővé tette, hogy az ezzel a technológiával felvételezett adatok és így az abból levezetett információ tulajdonképpen elérhetővé váljon mindenki számára lokális, nemzeti, regionális, országos, kontinentális és globális léptékű vizsgálatokra. Ráadásul a technológia magyarországi alkalmazásai még viszonylag kidolgozatlanok.

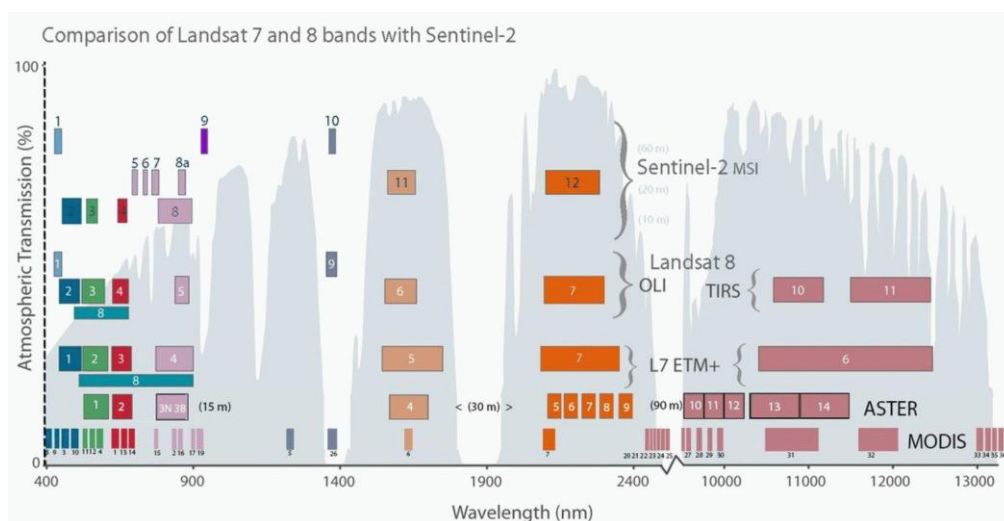
A mezőgazdasági célú távérzékelésben különböző szenzortípusokat van lehetőségünk használni. Általánosságban azonban elmondható, hogy ezen a szakterületen mostanáig az ún. passzív szenzorok domináltak. A passzív típusú szenzorok a Nap által kibocsátott és a földfelszínről visszavert sugárzást mérik alacsony földközeli keringési pályán. A passzív (optikai) szenzorok mellett lehetséges aktív (rádióhullám alapú) mérés technikával felvételezett adatok alkalmazása is. Ezen eszközök rádióhullámokat bocsátanak ki, maguk a keringő eszközökön elhelyezett műszerek hozzák létre mesterségesen az elektromágneses hullámokat és sugározzák a földfelszín irányába. Ily módon a földfelszínről visszavert, általuk létrehozott sugárzást, nem pedig természetes módon a Naptól származó sugárzást mérik.

A számunkra elérhető távérzékeltektől adatai és módszerek spektruma széles, a megfelelő adatinputok és módszerek kiválasztása és használata nagyban függ magától az alkalmazástól. Időjárási jelenségek megfigyeléséhez, előrejelző-modellek bemeneti adataiként használt műholdadatok esetén elegendő lehet a kilométeres térbeli felbontás, ugyanakkor percenként időbeli felbontásra lehet szükség. A mezőgazdaság számára kilométeres térbeli felbontás nem elegendő, a percenkénti felbontás pedig indokolatlanul gyakori. A távérzékeltektől adataira vonatkozó három legfontosabb, legnagyobb megszorítást így a spektrális-, az időbeli és a térbeli felbontás jelenti. Ezeket a tulajdonságokat adathasználat, az adott alkalmazás kidolgozása előtt mérlegelnünk kell, hiszen az elérhető adatok ezen tulajdonságai a szenzor- illetve felvételezési technikától függenek és mindenféleképpen egyfajta limitációt jelentenek.

Egy adott szenzor *spektrális felbontása* a szenzor érzékenységre vonatkozik az elektromágneses spektrum bizonyos frekvenciaterjedelmében. A különféle szenzorok eltérő számú sávban adott hullámhossztartományokon mintavételeznek. Egy-egy sáv az elektromágneses tartomány egy szűk régiójára korlátozódik és az emberi szem számára látható fény tartományain túl, az emberi érzékelésen kívül eső pl. infravörös tartományban is képesek felvételezést végezni. A multispektrális szenzorok 10-20 ilyen jól elkülöníthető sávban mintázzák meg az elektromágneses spektrumot (4.78. ábra). Ilyen szenzorokkal rendelkeznek különböző földmegfigyelő műholdak pl. Landsat, Worldview, SPOT, Sentinel-2, Aqua, Terra, Sentinel-3 stb.

Az infravörös tartományok a mezőgazdasági monitoringban rendkívül fontosak, mert a növényzetben történő folyamatok feltárására spektrálisan a legalkalmasabb terület potenciálisan a 670 nm és 780 nm közötti tartomány. Ez a tartomány csakugyan az emberi érzékelésen kívül esik és hullámhossz szerint a vörös tartomány szomszédságában található.

A spektrum ezen szakaszán a növényzet visszaverő-képessége éles emelkedést, magasabb reflektancia értékeket mutat. Ezt a régiót, a vörös és közeli infravörös tartomány közötti szakaszt nevezzük red-edge-nek.



4.78. ábra. Különböző műholdas multispektrális szenzorok mérési sávjai a hullámhossz függvényében. Forrás: USGS Landsat Program.

Az űrfelvételekre vonatkozó *időbeli felbontás* (vagy másként az űreszköz visszatérési ideje) azt mutatja meg, hogy adott földfelszíni ponton milyen időközönként halad át adott műhold.

A mezőgazdasági alkalmazásban ez rendkívül fontos, mert konzisztens, szisztematikus és legfőképpen gyakori visszatérési idővel, azaz jó időbeli felbontással rendelkező műholdadatokkal lehetséges kizárólag a növényfejlődés precíz nyomonkövetése. A kulcsfontosságú fenofázisokat, a különböző növénykondíciókban történő változásokat kizárólag gyakori időbeli mintavételezéssel, például napi, közel-napi felbontással lehet hibátlanul nyomon követni. A lehető legtöbb potenciális felvételezés azért is jelentős előny, mert a műhold és a növény „között” mindenképpen ott a légkör, ami időszakos felhőborítást és így kitakarást eredményez. Gyakori felhőborítás mellett kivételesen nehéz a növényfejlődés fázisait nyomon követni a vegetációs időszakban. Ráadásul a felhőborítás jelentősen változhat évről évre, ez pedig megnehezíti az évről évre történő összehasonlításokat.

A mezőgazdasági távérzékelésben a gyakori mérések mellett rendelkezünk kell jó *térbeli felbontással* is. A térbeli felbontás azt mutatja meg, hogy egy mérés, egy pixel mekkora földfelszínről nyújthat információt. Arra vonatkozik, hogy mi a földfelszín azon legkisebb egysége, ami a képén detektálható. Ezt az alapértelmezett egységet nevezzük pixelnek.

A pixelméret kulcsfontosságú a növényzet megfigyelésében (lásd 4.79. ábra). Van az a bizonyos részletesség, részletgazdagság, amellyel mindenképpen rendelkezünk kell, hogy képesek legyünk növény-specifikus, parcella-specifikus információt származtatni a műholdadatokból. Nagy pixelekkal ill. nem nadír-pontba néző szenzorokkal (pl. MODIS) nehezebb növény-specifikus információt kinyerni. Azzal a térbeli felbontással (250 m), amellyel a MODIS szenzor rendelkezik, inkább a tájat vagyunk képesek monitorozni, nehezebb feltárni a parcella léptékén a heterogenitást, a növényállapotot, hiszen a pixelméret limitálja a detektálható mintákat a parcellán belül.

A túl sok adat ugyanakkor szintén nem megfelelő, pl. centiméteres felbontású drónfelvételek jelenthetik a másik végletet (lásd a méréseket bemutató fejezetet). A tíz- és harmincméteres felbontás a legtöbb esetben elegendő lehet. Nem elhanyagolható, hogy ez az

adatfelhasználás, adatfeldolgozás szempontjából is optimálisabb helyzetet biztosít. Kisebb fájlméreteket jelent, információtartalma pedig elegendő lehet, hiszen 10-30 méteres pixelméret mellett aggregált képet kaphatunk adott területről. A jó térbeli felbontású műholdadatok a terepi méréseket kiegészíthetik. A megfelelő, szükséges pontosság-vizsgálatok után azt nagy biztonsággal ki is válthatják. Az űrtávérzékelés egy olyan eszköz, amely rendelkezik azzal a potenciállal, hogy képes megbecsülni a tábla kondíciót anélkül, hogy terepre mennénk, vagy mintát vennénk például destruktívan a növényzetből. Terepi mintavétel sok esetben nem is igazán lehetséges a megközelíthetőség miatt, körülményes és drága.



4.79. ábra. Martonvásár határa és a mintaparcellák különböző térbeli felbontású műholdfelvételeken. Sentinel-2 (10 m - bal oldalon - 2017-03-29), Landsat-8 (30m - középen - 2017-03-27), Aqua MODIS (250m - jobb oldalon - 2017-03-29). Az Eddy-1 a Baracska (Pettend) melletti eddy-kovariancia, míg az Eddy-2 a Kajászó melletti eddy-kovariancia mérés parcellája. A kiválasztott búza tábla Kápolnásnyék mellett található. A Tartamkísérlet az MTA ATK egyik kísérlete, Martonvásár külterületén.

4.7. táblázat. A műholdfelvételek technikai adatai a MODIS, Landsat és Sentinel adatok kapcsán.

	MODIS	Landsat-8	Sentinel-2	Sentinel-1
Időbeli felbontás	1 nap	16 nap	10 nap (5nap)	12 nap
Térbeli felbontás	250, 500, 1000 m	30 m	10 m, 20 m	20-30 m
Spektrális terjedelelem	0.459 μm - 14.385 μm	0.440 - 2.300 μm	0.440 - 2.300 μm	C-band
Sávszám	36	9	13	2 (VV, VH)

Ingyenesen elérhető távérzékelte adatforrások

Jelenleg az ingyenesen elérhető műholdadatok tekintetében két nívós és nagymúltú ügynökségre támaszkodhatunk. Az egyik lehetőségünk az Amerikai Egyesült Államok Országos Repülésügyi és Űrhajózási Hivatala (*National Aeronautics and Space Administration, NASA*), míg a másik forrás az Európai Űrügynökség (*European Space Agency, ESA*). Mindkét intézmény rendelkezik önálló földmegfigyelő programmal és földmegfigyelő rendszerrel, amely nem kizárólag a mezőgazdasági célú érzékelés lehetőségeit hivatott biztosítani, de más szakterületek számára is szolgáltat adatokat pl. meteorológia, erdészet, vízügy, katasztrófavédelem stb. Mindkét ügynökség esetén különböző missziók és így különböző specifikációkkal rendelkező műholdak vannak dedikálva különböző szakterületeknek, így a szárazföldi távérzékeléses megfigyelésnek is. Ezenkívül mindkét intézmény nyílt adatpolitikával biztosítja az ingyenesen elérhető adatokat, az adatdisztribúciót.

Mezőgazdasági szempontból a NASA Földmegfigyelési rendszerének keretein belül ingyenesen elérhető leggyakrabban igénybe vett műholdak a Landsat-sorozat különböző műholdjai ill. a MODIS szenzor. Az amerikai Aqua és Terra műholdakon helyet foglaló identikus MODIS szenzorok legjobb térbeli felbontása 250 méteres, ezt a felbontást azonban csupán két hullámhosszon (a növényzet méréséhez kulcsfontosságú vörös ill. infravörös tartományokban) produkálja, a többi hullámhosszon történő mérések 500 méteres vagy 1 kilométeres térbeli felbontással történnek. Az Aqua és Terra műhold nagy előnye, hogy mindennap áthalad adott terület felett, az egyik délelőtt a másik pedig délután. Visszatérési idejük tehát 1 nap. Mivel az adatok ingyenesen elérhetőek, ezért az utóbbi tíz évben e két szenzor mérései a legszélesebb körben elterjedt multispektrális adatforrások. Ezek produkálták a legtöbb eredményt is.

A Landsat család első tagját 1972-ben lőtték fel. Legutóbbi tagja (Landsat-8), 2013 februárjában került felbocsátásra. A platformon található OLI (*Operational Land Imager*) szenzora 30 méteren produkál méréseket. Visszatérési ideje azonban gyenge, mindössze 16 nap, így havonta hozzávetőlegesen két felvétel áll rendelkezésünkre, ami nem elegendő mérési gyakoriság a mezőgazdasági idősoros alkalmazásokhoz. Főként, ha figyelembe vesszük, hogy a ritka méréseket a potenciális felhőborítottság megtizedeli.

A Landsat program azonban nagyon értékes, hiszen 1972 óta folyamatosan kering legalább egy műhold. Mindamelllett a program folytonossága biztosított, a következő műhold, a Landsat-9 felbocsátását a NASA és az amerikai geológiai szolgálat (USGS) 2020-ban tervezi. Az új platformon helyet foglaló szenzor tulajdonképpen a Landsat-8 OLI mérőeszközének egy klónja lesz. A szenzor specifikációi teljes egészében megegyeznek majd az előző szenzorral, mert így lehetséges annak leggyorsabb legyártása.

A NASA missziók adatai az ügynökség különböző adathubjain^{1,2} szabadon elérhetőek és ingyenesen letölthetőek.

Az Európai Űrügynökség és Európai Bizottság Földmegfigyelési programja (*Copernicus*) keretein belül felbocsátott Sentinel műholdsorozat mind passzív (*optikai*), mind aktív (*radar*) mérőeszközökkel rendelkező műholdakat foglalnak magukban. A program egyedi jellege továbbá, hogy alkalmazási területekre hangolt műholdak identikus szenzorokkal a fedélzetükön párban keringve végzik saját méréseiket. Ennek fő oka, hogy két műhold párban keringve jobb időbeli felbontás ér el. A Copernicus program már most egy lenyűgöző, egyedi rendszert hozott létre. Jelenleg hat műholdat bocsájtottak fel (Sentinel-1A és 1B két radar műhold, Sentinel-2A és 2B optikai műholdak, Sentinel-3A közepes felbontású optikai műhold ill. legutóbbi Sentinel-5P).

¹ earthdata.nasa.gov

² reverb.echo.nasa.gov

Számunkra, a mezőgazdasági megfigyelések szempontjából elsődlegesen érdekes és potenciálisan alkalmazható Sentinel-2A és 2B műholdak tehát azonos pályán, 180° pályaeltéréssel tandemben keringnek. Az Egyenlítőnél 5 ill. 10 napos visszatérési idővel produkálnak felvételeket a földfelszínről 13 spektrális sávban. A közepes szélességeken ez a konstelláció 3-5 napos visszatérési időre lesz képes már ebben, a 2017-es évben. A Sentinel-2 műholdakon lévő MSI szenzor térbeli felbontása a sávok hullámhosszaitól függő: 10 méteres, 20 méteres illetve 60 méteres is lehet (4.79. ábra). Martonvásár környéke már most kedvező helyzetben van a műholdak áthaladása szempontjából, mert két szomszédos pálya átlapolt területén helyezkedik el. Ezzel még jobb időbeli felbontást kaphatunk.

A gyakori visszatérési idő, ilyen térbeli felbontással rendelkező műholdak esetén unikálisnak számít. A Bizottság nyílt adatpolitikája pedig lehetőséget teremt arra, hogy egy fenntartható és magas színvonalú adatfolyam álljon rendelkezésre a földfelszín monitorozásában és így többek között a növényfejlődés követésében egyaránt.

A Sentinel-1A és Sentinel-1B SAR radar adatok is hatalmas mennyiségű adatot feltételeztek már felbocsátásuk óta. Ezek potenciálisan komplementerei lehetnek az optikai adatoknak, sőt idősoros vizsgálatok esetén önállóan is megállják a helyüket. Nagy előnyük, hogy a felhősültség nem befolyásolja felvételezésüket.

A Copernicus programhoz hozzátartozik, hogy az Európai Bizottság időben fenntartható adat- és információforrásként tekint az európai Földmegfigyelési rendszerre. Azok meglétét, rendelkezésünkre bocsátását hosszú távon, pontosan és kiszámíthatóan tervezi. Jelen állás szerint, ezen műholdsorozat mérőeszközeit, azok sorozatos felbocsátását a Bizottság 2030 után is fenntartani szándékozza. A Copernicus program az európai űrtechnológia és űrstratégia egyik zászlóshajója. Az ESA ezzel a programmal az elmúlt több évtized alatt a földmegfigyelés szakterületén szerzett tapasztalatokra építve, az időközben kialakult és felmerült igényekre hangolva egy tudatos és célzott, jövőbemutató európai közösségi szintű példaértékű high-tech programot indított el.

Az adatok az ESA hivatalos adathozzáférési hub-járól szabadon és ingyenesen tölthetőek le (*Copernicus Open Access Hub*³).

Elmondható tehát, hogy űrbázisú távérzékelési technológiai specifikációk, adottságok és a mezőgazdasági távérzékelés szempontjából különböző kompromisszumokra volt eddig szükség: vagy jó időbeli felbontást kaptunk, nem megfelelő térbeli felbontással (lásd MODIS); vagy jó térbeli felbontásunk volt, nem megfelelő időbeli felbontással (lásd Landsat). Ezt a helyzetet az európai Copernicus program keretein belül felbocsátásra kerülő Sentinel-2 műholdak megváltoztatták azzal, hogy egy szisztematikus, globális, jó térbeli felbontású és gyakori visszatérési idővel rendelkező adatvizíciót produkáló űrtávérzékelést végző rendszer jött létre, amely ingyenesen és nyíltan hozzáférhetővé tesz minden adatot. Ezzel kimondottan, igazi érett állapotba, eddigi életciklusát tekintve mindenféleképpen tetőpontra került az optikai távérzékelés, amit nekünk is illik kihasználnunk.

NASA HLS (Harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 Product)

A projekt során azonban ennél tovább mennénk. Az eltérő forrásból érkező, de hasonló spektrális és térbeli felbontással rendelkező európai Sentinel-2 és annak amerikai testvérei, a Landsat-8 műholdak harmonizált, fuzionált, szinergikus használatát tervezzük. A két szenzort együtt használva lesz lehetőségünk igazán hatékony mezőgazdasági távérzékelési eredményeket produkálni mind parcella, mind táj szintjén.

A NASA erre a nyilvánvaló és magától értetődő optikai adatfűzési lehetőségre reagálva, a fuzionált adathasználatban rejlő potenciált felismerve indította el az úgynevezett HLS (*harmonizált Landsat és Sentinel*) adatfeldolgozást és egy előzetes, kísérleti

³ <https://scihub.copernicus.eu/>

adatterméket hozott létre röviddel az ESA által pályára bocsájtott Sentinel-2A műhold operatívává válása után.

A NASA HLS (Harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 Surface Reflectance) tehát egy önálló NASA kezdeményezés arra a célra, hogy egy konzisztens, harmonizált felszíni reflektancia adatproduktum álljon elő. Amely éppen a mi céljainkra reményeink szerint majdhogynem tökéletesen megfelelő, és így az általunk használni kívánt két különböző és legelterjedtebb multispektrális műholdadatsorok (*Landsat-8 OLI, Sentinel-2A, Sentinel-2B*) szinergikus, együttes használatát célozza. Ezzel az adattermékkel a NASA célja, hogy gyakorlatilag 2-3 nap visszatérési időt legyenek képesek produkálni globálisan, 30 méteres térbeli felbontásban.

A harmonizált reflektancia produktum dióhéjban azt takarja, hogy a NASA végrehajt egy sor szükséges radiometriai, spektrális, geometriai és térbeli korrekciót a két adattermék között azért, hogy egy hiánytalan idősort kapjunk és egyáltalán lehetséges legyen az együttes használat. A NASA algoritmusai révén a lehető legkisebb mértékűre kívánja csökkenteni a bizonytalanságot és eltérést a két szenzor mérései között. A szükséges korrekciók mellett továbbá azonos grid rendszerbe rendezett egységes adattermék definíciót hoz létre a két eltérő forrású termékből. A két műholdadat együttes használatával, időszzerűbb és pontosabb megfigyeléseket kaphatunk.

Az adatok jelenleg az előzetes fázisban vannak, azok tényleges, folyamatos ún. operatív produkálását jövő évtől (2018-tól) tervezik⁴.

Nemzetközi döntő szakmai kapcsolatainknak hála sikerült elérnünk, hogy a GINOP AgroMo projekthez kapcsolódva a NASA jóváhagyta külön kérelmünket, a Martonvásár területére eső felvételek fuzionált feldolgozására és rendelkezésünkre bocsájtását illetően. Magyarországi terület eredetileg nem szerepelt az előzetes teszt site-ok sora között, azt külön kérvényeztük. Így az egyik NASA mintaterületet tulajdonképpen a Martonvásárt fedő két csempe lett.

⁴ <https://nex.nasa.gov/nex/static/media/publication/HLS.v1.0.UserGuide.pdf>

Növényfejlődés megfigyelése távérzékeléssel

Mezőgazdasági távérzékelés három fő irányvonala: a növénytípus osztályozás, a növényállapot-felmérés illetve termésbecslés/terméselőrejelzés. Az utóbbi évtizedekben a mezőgazdasági távérzékelés mindhárom alterületen szignifikáns eredményeket volt képes produkálni.

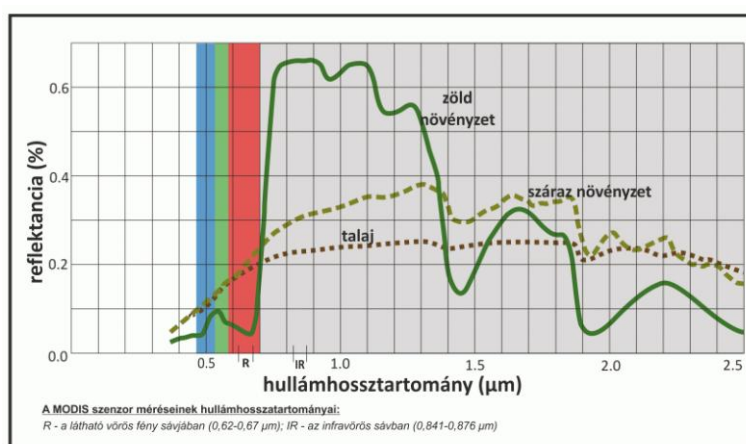
A mezőgazdasági területek térképezése során az egyes parcella- vagy mezőhatárok, azok területhatárai valamennyi skálán (globálistól a lokálisig) meghatározhatóvá válnak. Képesek vagyunk az őszi és a tavaszi növényeket, az erdőtípusokat (lombhullató, örökzöld), a gyepeket, legelőket, városi beépített területeket, időszakosan vizes vagy állandóan vízzel borított területeket elkülöníteni. Az őszi és tavaszi növénytípusok elkülönítése után pedig képesek vagyunk különböző növénytípusok elkülönítésre is.

Spektrális szignatúrák

A távérzékelés koncepciója, hogy a földfelszínről visszavert vagy kibocsátott elektromágneses sugárzás mértékét vagyunk képesek mérni a Föld körüli pályán keringő űreszközök segítségével. Egy adott műhold fedélzetén lévő szenzor az elektromágneses spektrum tulajdonképpen csak egy kis részét, különböző jól definiált hullámhossz tartományokra szűrt sávokban méri.

Amikor a Napból érkező elektromágneses sugárzás keresztülhalad a légkörön és eléri a földfelszínt, például a növényzetet, alapvetően három kimenet lehetséges attól függően, hogy az elektromágneses sugárzás milyen hullámhosszról van szó. Az elektromágneses sugárzás visszaverődhet, elnyelődhet és átvezetődhet. Ez attól is függ, hogy a földfelszín objektumainak milyenek a karakterisztikái, milyen a növényzet "architektúrája", milyen a lombzati struktúra, milyenek a növényzet optikai tulajdonságai. Függ az ún. angularis szignatúráktól, a megvilágítási viszonyoktól, a napállás is befolyásolja a reflektancia, az abszorpció, transzmittancia mértékét.

Különböző objektumok különböző hullámhossz tartományokon eltérően verik vissza vagy nyelik el a Napból érkező elektromágneses sugárzást (4.80. ábra). A visszavert energia mértéke tehát nem egyenlő eloszlású az elektromágneses spektrum különböző részein. Adott földfelszíni pont (pixel) spektrális szignatúrájának nevezzük az adott pontról visszavert sugárzás mértékét a hullámhossz függvényében.



4.80. ábra. Különböző felszínborítások reflektanciaértékei a hullámhossz függvényében.

Annak a kombinációi, különbözőségei, mint például a levél színe, textúrája, formája határozza meg, hogy mennyi energia verődik vissza, nyelődik el és vezetődik át a növényzeten. Így különböző növények, felszínborítási típusok spektrális szignatúrai mások lesznek (lásd 4.80. ábra), azok egyedi görbékkel rendelkezhetnek.

Az emberi szem a látható fény tartományát (400 nm – 700 nm) képes érzékelni. Azért láthatjuk a vegetációt zöldnek, mert a növényről ebben a szemünk által felfogott tartományban látható fénytartományból a zöld hullámhossztartományra eső fény verődik vissza a legerősebben. Másként fogalmazva az elektromágneses sugárzás ezen tartományú elnyelése a zöld hullámhosszokon a leggyengébb. Míg a növény leveleinek klorofilltartalma a kék és vörös hullámhosszú fényt elnyeli.

Emellett ez az elektromágneses energiatartomány az, amely vezeti a fényreakciót és elengedhetetlen a fotoszintézis szempontjából. A növény leveleiben található klorofill, az a pigment-forma, amely felelős a látható hullámhosszú energia elnyeléséért. A növény víztartalma, sejtsztruktúrája is befolyásolja ezt. A látható fény régiójával szomszédos közeli infravörös sugárzás ellenben nem nyelődik el és hasznosul a fényreakció során a klorofilltartalom révén. Ennek a sugárzásnak közel fele átvezetődik illetve visszaverődik a növényzetről. Összegezve azok a távérzékelési szenzorok, melyek a kék, a zöld, a vörös és az infravörös tartományokban képesek mérni, a növényzet esetén gyenge visszaverődést fognak detektálni a kék és a vörös hullámhosszú sávokon, míg kissé erősebben visszavert jelet a zöld tartományban. Ezenkívül nagyon erősen visszavert jelet a közeli infravörös tartományokon (lásd 4.80. ábra). Emellett hozzátartozik a növényállapotról vonatkozólag, hogy alacsonyabb klorofilltartalom, az elsárgult növényzet alacsonyabb visszaverődést produkál az infravörös hullámhosszokon.

A távérzékeléses mérések, spektrális reflektancia adatok a világúrból mérve tehát indirekt módon a növényi rendszer állapotához köthetőek, a növényfejlődéshez, a növény-növekedés feltérképezéséhez térben és időben. Az így felvételezett adatok rendelkeznek azzal a potenciállal, hogy levezethetővé válnak belőlük a növényegészség bizonyos biofizikai indikátorai.

Vegetációs indexek

Ahogy már fentebb szó volt róla, a red-edge tartomány az elektromágneses sugárzásnak egymással szomszédos vörös (600, és 700 nm) és közeli-infravörös (700 nm - 1200 nm) tartományok közötti régióra terjed ki. Ahogy a klorofill koncentráció növekszik, a vörös régióban az elnyelés szintén növekszik, ami alacsony vörös reflektanciában nyilvánul meg. A növényről visszavert sugárzás alacsony reflektanciaértékeket produkál a vörös hullámhossz tartományában, majd éles növekedés mutatkozik meg a reflektív értékekben a magasabb hullámhosszak felé. Ez a meredek emelkedés a 730 nm régió körül tehát az ún. red-edge.

A növényzet fejlődése különböző okoknak köszönhetően pl. tápanyaghiány, növénybetegségek, aszály, fagy stb. eltérhet a számunkra, a termés szempontjából optimálistól. Ennek a feltárása, hogy az eltérés jelen van-e vagy sem, mekkora ennek az eltérésnek a mértéke, távérzékelési adatokkal lehetséges. Erre spektrálisan a legalkalmasabb terület a fentebb már körvonalazott éles emelkedést mutató erősebb reflektív kapacitással rendelkező 690 nm és 730 nm közötti altartomány.

A legtöbb vegetációs index a látható és a vörös tartomány közötti különbséget használja ki. Mivel klorofill elsődlegesen a növényekben található meg és ismert a vörösben lévő alacsony reflektancia ezért ezt a régiót szokás a látható sávok közül választani az

indexképzéskor. Egyébként könnyű belátni, hogy számos kombináció lehetséges spektrális indexképzésekre.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

A leggyakrabban használt vegetációs index az NDVI, amely a vörös hullámhosszokon visszavert és az infravörös hullámhosszokon visszavert reflektancia értékek különbségeit normalizálja. Az NDVI egy dimenziótlan index, -1 és 1 közé esik. Rouse vezette be 1974-ben és Tucker által vált népszerűvé.

Az NDVI szorosan kapcsolódik a növények különböző tulajdonságaihoz, egészségi állapotukhoz. Képes leírni a fenológiai állapotot, a fenológiai változásokat, segítségével becsülhető a biomassza és a termés.

Az NDVI érzékeny index, főként ha a világúrból mérjük meg. Gyengeségei közé tartozik, ha a vegetációs fedés gyenge, ilyenkor a vegetáció, a lombzat alatti talaj, ill. az aljnövényzet is hozzájárul a mért jelhez. Csupasz talaj, ritkás növényzet esetén minden, ami a felszínen jelen van hozzájárul a mért jelhez. A mutató a 'zöldesség' mértékéről árulkodik, kihasználva a növényzet bizonyos spektrális tulajdonságait. Érzékeny, mert a spektrális visszaveréstől is függ, ami minden szenzor esetén más és más, a szenzorra vonatkozó specifikációtól függ.

Vegetációs index idősorok

Az alábbiakban a NASA HLS adatterméke alapján vizsgáljuk az 4.79. ábrán látható földrajzi elhelyezkedéssel rendelkező Eddy-1, Eddy-2 ill. tartamkísérlet parcellákra eső pixelek alapján levezetett NDVI idősorokat a 2016-os és 2017-es évekre vonatkozóan (4.81-84. ábra).

A műholdas mérésekből levezetett adatok ún. Box-Whisker Plotok segítségével vannak ábrázolva. Az ilyen jellegű ábrák egy adathalmaz (esetünkben az egyes feature/polygonra vagyis a parcellára eső pixelhalmazra) kvartilisei segítségével mutatja az adatsort változékonyságát/variabilitását.

Egy műholdáthaladás tehát egy azonos időpontú mérés-sorozatot jelent és így egy azonos adatsortot. A box teteje és alja mindig az adatsort első és a harmadik kvartilisét mutatja. A box-on belül látható vertikális vonal az adatsort mediánját jelöli, mint a minta centrális tendencia mutatója. A dobozokból ágazó vertikális vonalak mutatják a felső és alsó kvartilisen kívül eső adatok változékonyságát. A box-plotokon kívül az adott parcellára eső adathalmaz átlagát is bemutatjuk, színes körrel jelölve azokat. Kék körök jelölik a Landsat-8, míg piros körök a Sentinel-2 méréseket.

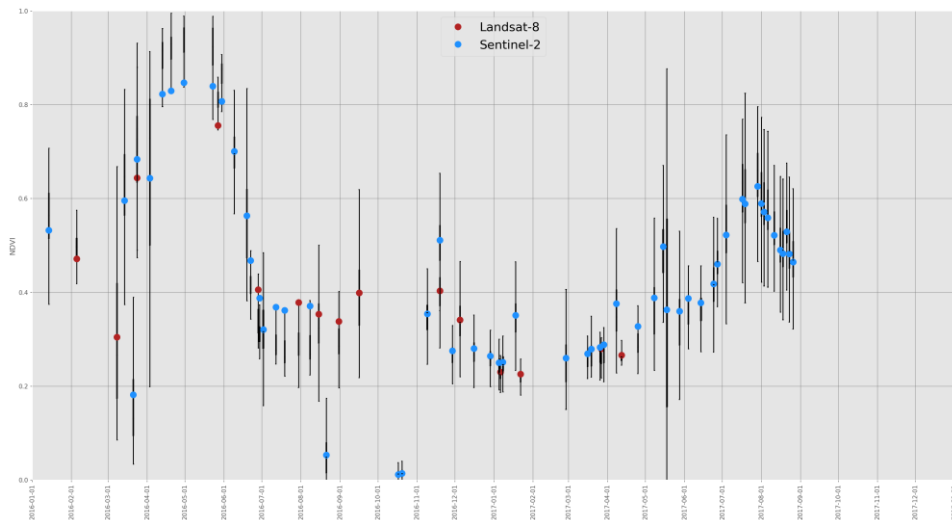
Az alábbi táblázat az 2016-os és 2017-es években elérhető Landsat-8 és Sentinel-2 felvételek számát mutatják a területre. A felhőfedés miatt ezen felvételek nagy része sajnos használhatatlan, de a maradék felvétel is elegendő azért, hogy kövessük adott parcella fenológiáját.

A NASA HLS projektre vonatkozó információ, hogy az itt bemutatott adatinputok előzetes adatok, a két szenzor közötti adatharmonizációs kísérlet első eredményei. A jelenlegi feldolgozási verzió az 1.3-as. A NASA az év végéig ígéri az 1.4-es feldolgozással készített adatok új verzióját.

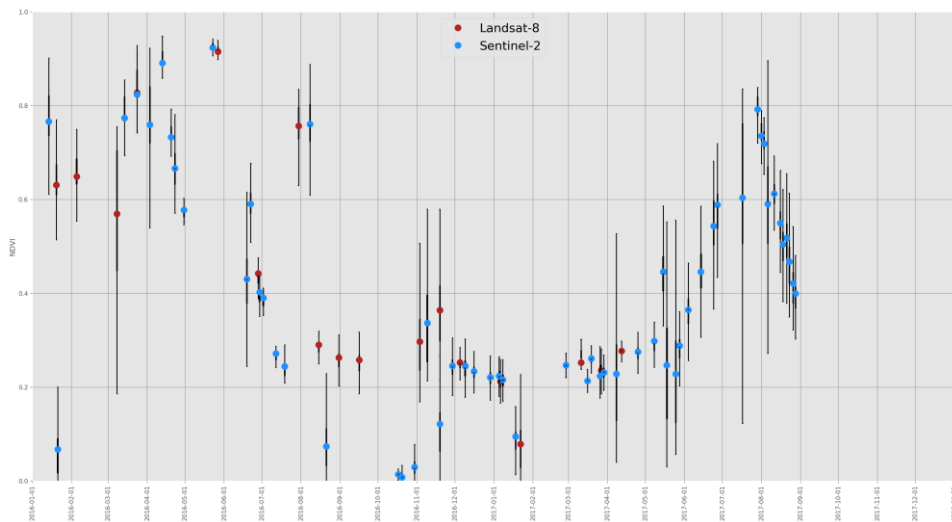
Ezen kívül, sajnálatos módon a 2017-es évre vonatkozóan csak április 30. napjáig vannak elérhető Landsat-8 felvételek a HLS projektben. Ennek oka, a Landsat-program során tavasszal adatdefiníciós változások történtek, de az adatok későbbiekben elérhetőek lesznek a teljes évre, már az új adatfeldolgozási verzió mentén.

4.8. táblázat. A 2016-os és 2017-es években elérhető Landsat-8 és Sentinel-2 potenciális adattermék száma ill. A felhősültség alapján kiesett felvételek utáni maradék, ténylegesen használható felvételek száma.

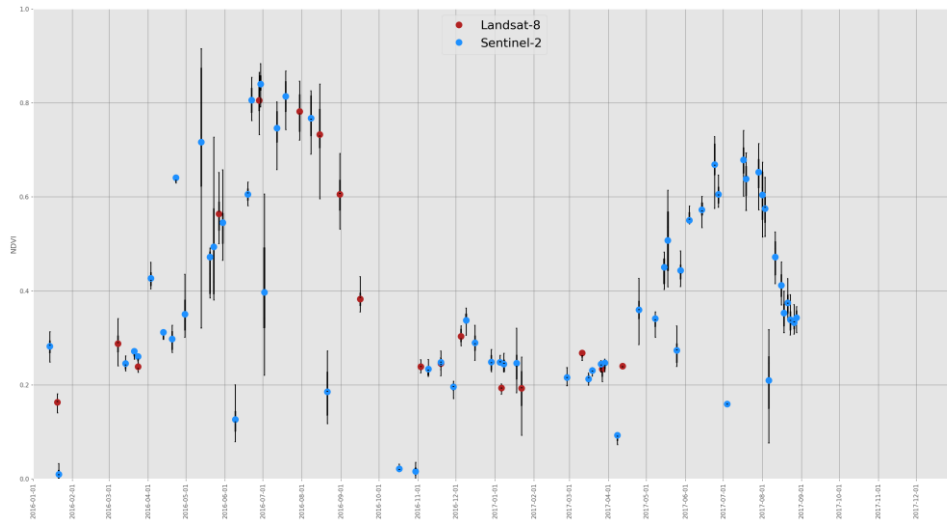
	Összes elérhető felvétel		Felhasznált felvételek száma	
	2016	2017	2016	2017
Landsat-8	68	22	13	5
Sentinel-2	68	55	35	34



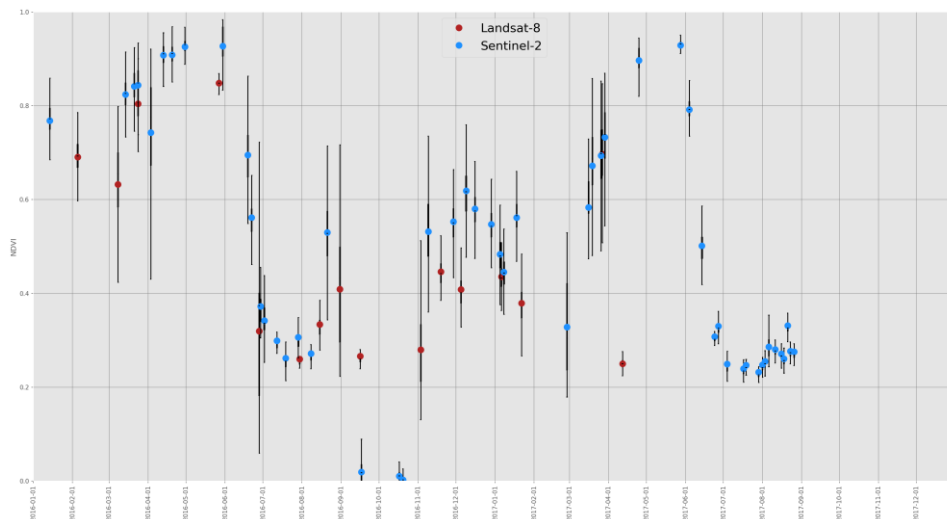
4.81. ábra. Az Eddy-1 parcella NDVI időszora a harmonizált Landsat-8 és Sentinel-2 adatokból levezetve 2016 és 2017 között.



4.82. ábra. Az Eddy-2 parcella NDVI időszora a harmonizált Landsat-8 és Sentinel-2 adatokból levezetve 2016 és 2017 között.



4.83. ábra. A tartamkísérlet parcella NDVI időszora a harmonizált Landsat-8 és Sentinel-2 adatokból levezetve 2016 és 2017 között.



4.84. ábra. A kápolnásnyéki búza parcella NDVI időszora a harmonizált Landsat-8 és Sentinel-2 adatokból levezetve 2016 és 2017.

Biofizikai változók

Levélfelület index (LAI)

Az optikai műholdas szenzorok önmagukban nem alkalmasak arra, hogy direkt információt nyújtsanak a növényzet konkrét biogeokémiai és morfológiai tulajdonságairól, hiszen a szenzor a sugárzási fluxus térbeli eloszlását méri, abból is csak azt, ami a szenzor irányába érkezik. A növényzetre vonatkozó információkat le kell vezetni a reflektancia adatokból. Alapvetően tehát a távérzékelte adatok használata mindig egy modell által meghatározott. LAI esetén ez a modell lehet fizikai, statisztikai vagy a kettő kombinációja ún. hibrid modell.

A biofizikai indikátorok a növényállapotot, a növényi kondíciókat jellemzik, írják le. Mivel optikai műholdadatokból egyes biofizikai paraméterek indirekt módon levezethetőek,

az olyan időszerű multispektrális reflektancia mérés, amely biofizikai indikátorokhoz kapcsolható egy kritikus információforrás lehet.

A LAI egy egyszerű, de annál fontosabb szintén dimenzió nélküli paraméter (lásd még a 4.2.1. fejezetet). A fotoszintézis a növény levélfelületén történik, annak meghatározása így kulcsfontosságú. Az indikátor térbeli változékonysága így referál a növényzet térbeli mintázatára is. Emellett leírja a növényi rendszer primer produktivitását és a növény esetén felmerülő stressz indikátora is lehet. A legtöbb ökológiai vagy növénymodell a Biome-BGCMuSo modellhez hasonlóan idősorban határozza meg és kíváncsi ezekre a paraméterekre.

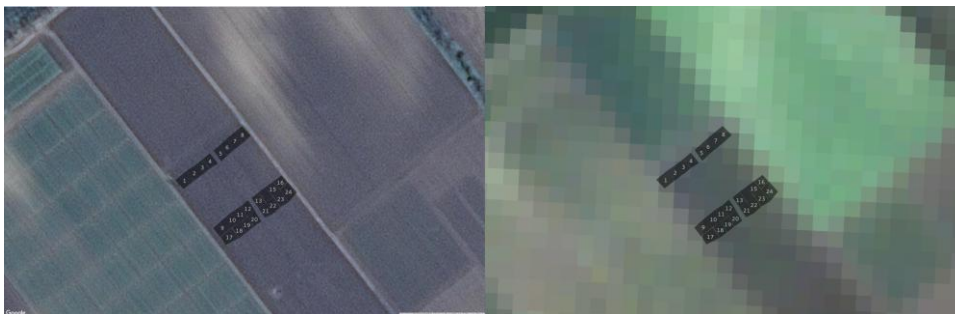
A távérzékelte adatok térben és időben is képesek követni a fenológiát. A jelenlegi adatbőség miatt az űrbázisú szenzorok jó időbeli felbontást szolgáltatnak, jó térbeli felbontás mellett. Ráadásul teljesen ingyenesen állnak rendelkezésünkre. A távérzékelte adatok egyértelműen komplementerei lehetnek a terepi, felszíni más technikákkal mért LAI méréseknek. Így elengedhetetlen lehet abból a szempontból is, hogy a már modellezett LAI/növényfejltség eredményeket, a modell-outputok térbeli és időbeli variabilitását kritizáljuk és/vagy validáljuk.

Esettanulmány: *in situ* LAI-mérés és műholdas adatsor összevetése

2017. június 14-én – a Sentinel-2A terület feletti áthaladásához igazodva – sikerült terepi méréseket végezni Martonvásár külterületén az MTA ATK 2.11-es számú kukorica tartamkísérletéhez tartozó parcellákon.

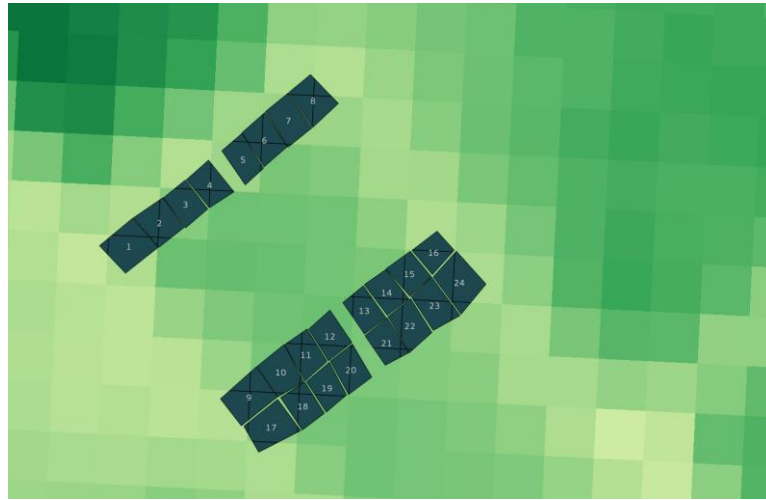
A mérőeszköz, amivel a méréseket végeztük egy AccuPAR PAR/LAI LP-80-as ceptométer volt. A mérési protokoll még nem végleges, de első próbaként minden 7,7 méter x 12 méter alparcellán gridben 4x5 mérés történt. Végeztünk mérést egyaránt a növény felső ill. alsó, tövi részében is. Összesen 5 mérést végeztünk egy kukorica sorban, amivel így soronként határozhattunk meg egy LAI értéket. Egy alparcelláról tehát végezetül 4 LAI mérést sikerült kapni. Összesen 24 parcellát mértünk le ezzel a módszerrel (az alparcellákat lásd az 4.85. ábrán).

Az alparcellák „sarokpontjait” a későbbi térinformatikai/távérzékelési utófeldolgozás miatt okostelefon segítségével került rögzítésre.

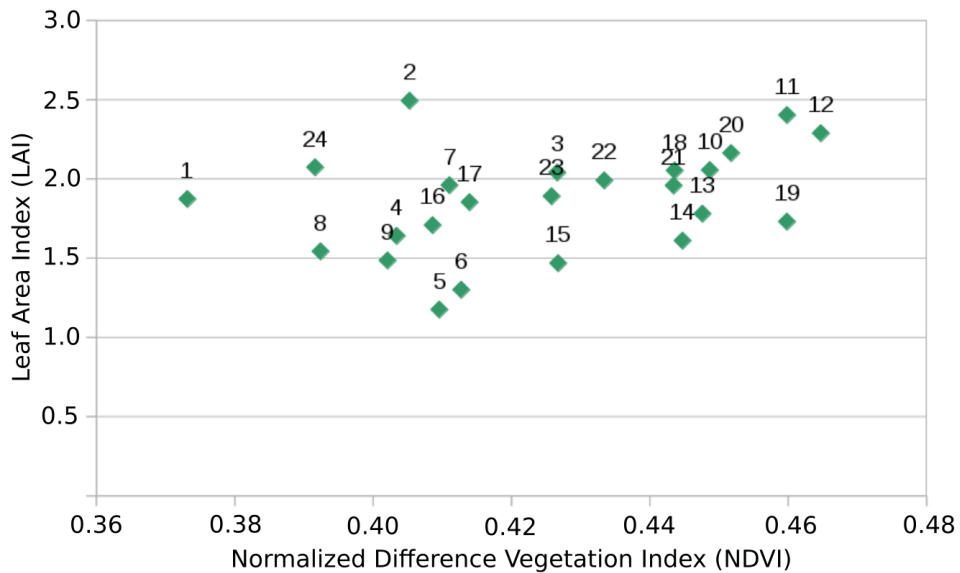


4.85. ábra. Balra ismeretlen időpontú Google Maps alaptérképen a felmért alparcellák, kísérleti kukoricatáblák ill. jobbra Sentinel-2A valós színes 2017.06.14-i áthaladása és a felmért alparcellák.

Ezen terepi méréseket kíséreltük meg az adott napi műholdáthaladás reflektancia adataiból számított normalizált vegetációs indexhez (NDVI) kapcsolni (4.86. ábra). A terepen GPS-koordinátákkal kijelölt négyzetekben mért LAI mérések átlagát metszettük össze a Sentinel-2 felvételből levezetett NDVI pixelek súlyozott átlagával. Az eltérő forrásból érkező két növényparaméter számszerűsítése közötti kapcsolatot a 4.87-es ábra mutatja.



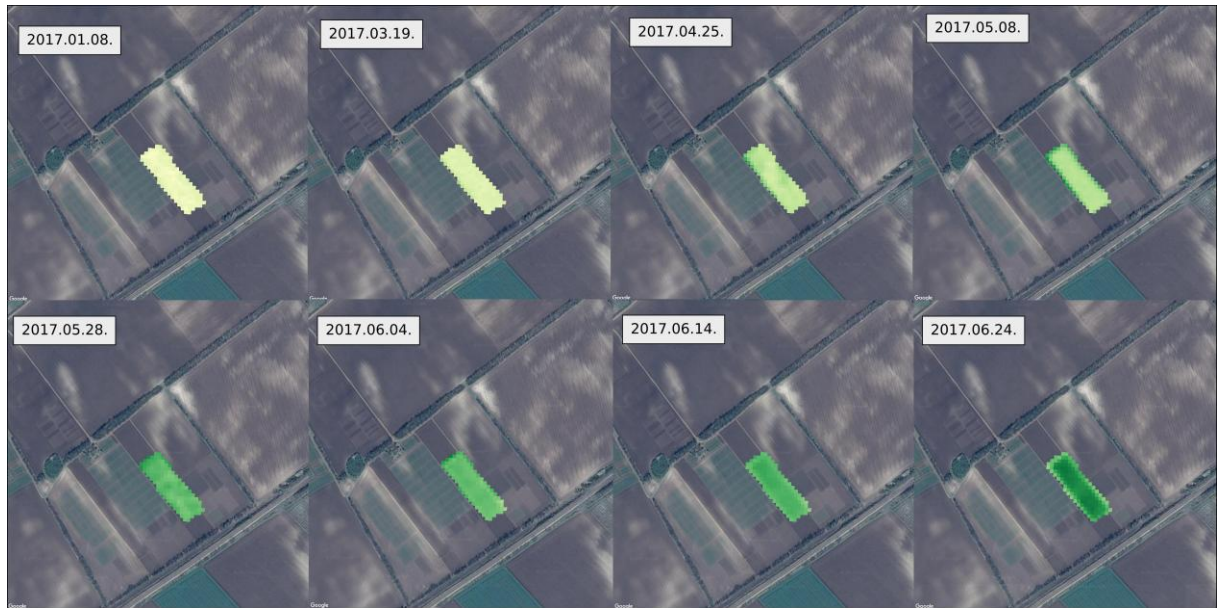
4.86. ábra. A Sentinel-2A pixeleivel metszett LAI mérési alparcellák ill. Sentinel-2A 2017.06.14-i NDVI képe.



4.87. ábra. Sentinel-2A NDVI (x-tengely) és terepi LAI mérés (y-tengely).

Pontosabb geometriai összemetszésre és az év során több terepi mérési alkalomra lenne szükségünk egy helyes empirikus kapcsolat meghatározására. A műholdas mérések szisztematikusan rendelkezésre állnak (lásd 4.88. ábra). A terepen mért adatok és azok űrfelvételen megjelenő pixeleken keresztüli reprezentációnak pontosításával (pl. “spectral unmixing”) lenne lehetőség precízen levezetni a levélfelületi indexet kukoricára akár nagyobb területre is.

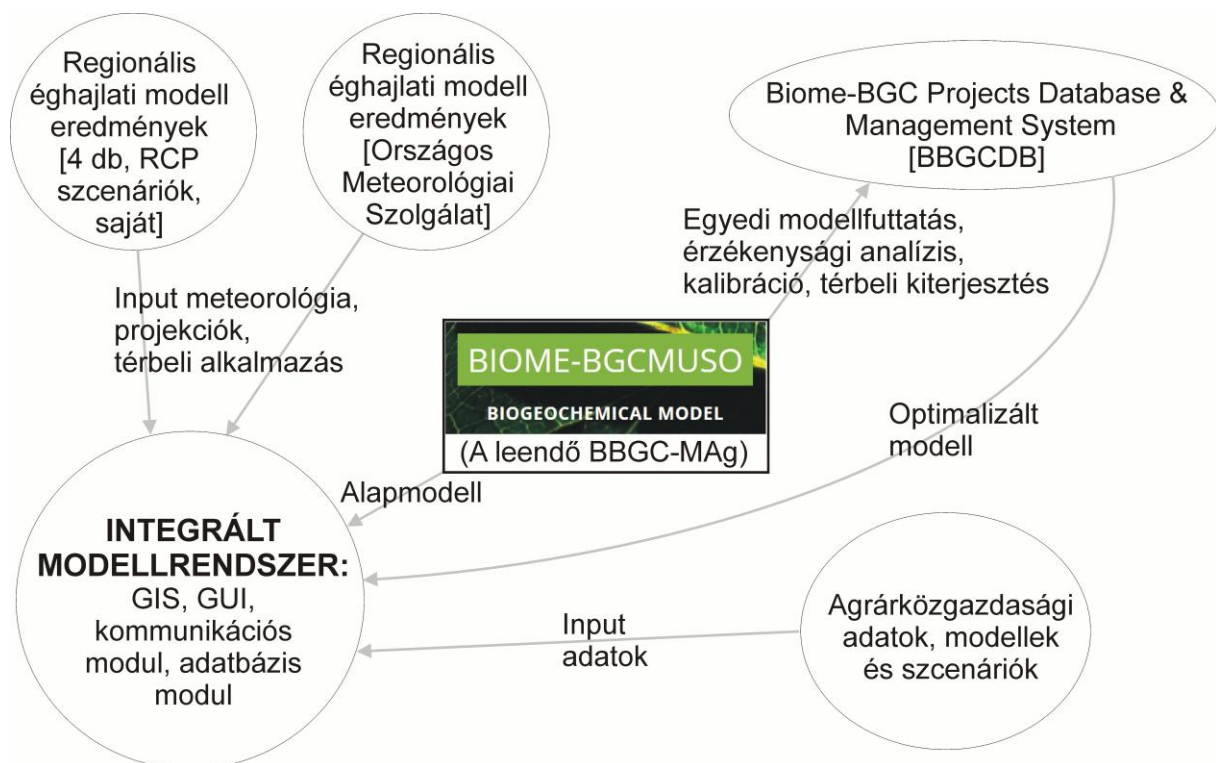
Annak ellenére, hogy a kísérleti parcellák léptéke a műholdas mérés léptéke alatt van, illetve a legegyszerűbb, átlagolós módszerrel jutottunk a mérési párokhoz, maga a mérésösszevetés eredménye nem véletlenszerű (4.87. ábra). A magas LAI érték valamennyi esetben (a parcellaszegélyeket leszámítva) magasabb NDVI értékkel párosult.



4.88. ábra. Sentinel-2A NDVI által mutatott növényfejlődés a Tartamkísérlet parcellán, idősorban.

5. Az Integrált Modellrendszer bemutatása

Az Integrált Modellrendszerek (IM) az agrárszektor eltérő aspektusait leíró modellek összekapcsolásával keletkeznek. Segítségükkel az agro-ökoszisztéma biológia, kémiai és fizikai jellemzőin túl, már közgazdasági jellegű mutatók térbeli és időbeli alakulása is nyomon követhető, előre jelezhető illetve optimalizálható (5.1. ábra). Két fő típusuk elsősorban a leírt rendszer méretében különbözik. Az IM-ek első típusa egy farm működését igyekszik a lehető legtöbb szempontból leírni, míg a második típus egy nagyobb területet (akár kontinens) egyenközű ráccsal (grid) fed le, és a rács celláinak anyag, energia, pénz, stb. forgalmának alakulását írja le. Az AgroMo rendszer a második típusúhoz tartozik.

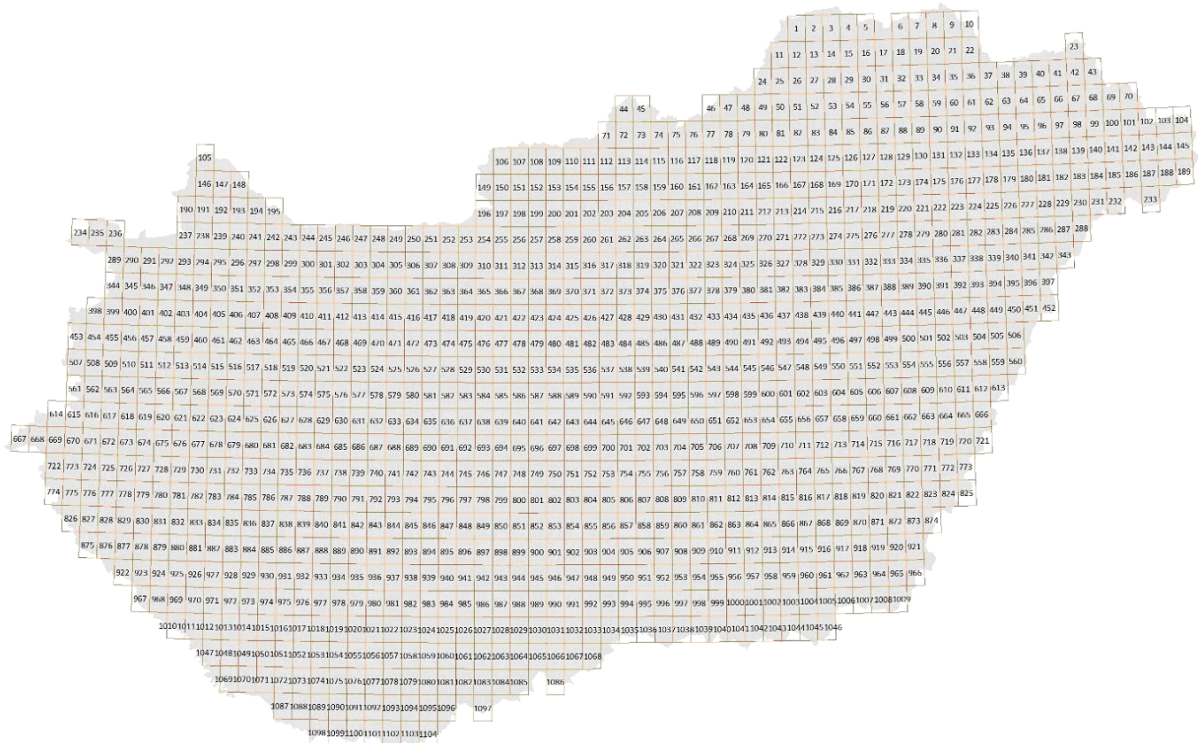


5.1. ábra. Az Integrált Modellrendszer kapcsolódása a különböző modulokhoz. A BBGC-MAg modell kifejlesztésének logikáját az 4.8. ábra szemlélteti

5.1. Az AgroMo integrált modellrendszer tervezett logikája

Az AgroMo modellrendszer alapját egy Magyarországot 1104 db körülbelül 10×10 km-es cellákkal lefedő rács képezi (5.2. ábra). Az AgroMo számításaihoz szükséges valamennyi bemenő adatot a rács valamennyi cellájára előállítjuk és egy adatbázisban tároljuk ún. adatsíkok formájában, amelyek akár térképes formában is megjeleníthetők. A felhasználói felületen (GUI) elvégzett beállításoknak megfelelően egy kommunikációs modul kapcsolja össze az adatbázis megfelelő adatsíkjait a BBGC-MAg modellel. Miután a modell elvégezte a számításait ugyanez a kommunikációs modul dolgozza fel a modell nyers kimenő adatait és készít belőlük egy új adatsíkot, ami eltárolásra kerül az adatbázisban. A modellrendszerbe integrált közgazdasági modul ezeket az adatsíkokat használja majd fel és generál újabb adatsíkokat, amelyek szintén az adatbázisba kerülnek. Az adatsíkokból a kezelő felület

adatfeldolgozó modulja készít táblázatokat, grafikonokat és térképeket elősegítve az eredmények értelmezését és értékelését.



5.2. ábra. Az AgroMo Integrált Modellrendszer adatsíkjainak térbeli felbontása.

Az AgroMo működését az alábbi példán keresztül mutatjuk be. A leírás a Magyarországot lefedő rács egy cellájára vonatkozik. A példa során arra a kérdésre keressük a választ, hogy a század végén mely haszonnövény termesztése esetén maximális a cellán előállítható tiszta haszon (bevétel – költség).

1. A kommunikációs modul a rendelkezésre álló adatokból előállítja a BBGC-MAg modell számára szükséges bemenő adatokat (klímatis adatok esetében pl. a 2071-2100 időszak 30 évről van szó, ráadásul 8 klímaprojekcióra külön-külön 30 évről).
2. A BBGC-MAg modell 8×30 db termésátlagot számít ki minden növényre
3. A kiválasztott közgazdasági modelltől illetve scenáriótól függően a 240 termésátlag adat 240 bevétel (Ft) adatra számolható át.
4. A kiválasztott közgazdasági modell segítségével minden évre kiszámítható a termelési költség. A bevételi és kiadási oldal ismeretében pedig a tiszta jövedelem.
5. Az egyes növényekre kapott jövedelem értékek összehasonlításával megállapítható a cellában leggazdaságosabban termelhető növény.
6. A jövedelmezőség viszony több agrotechnikai feltétel (beállítás) mellett is kiszámolható: korai – késői vetés, öntözött – öntözés nélküli, intenzív – extenzív műtrágyázás, stb. Ennél fogva a leggazdaságosabban termelhető növény kiválasztása nem egyedi értékek összehasonlítása alapján választható ki, hanem inkább a jövedelem értékek eloszlásának összehasonlítása alapján.

5.2. Klímaadatok bemutatása, az eredmények és modelligények összehangolása

A globális és regionális klímaváltozás jövőbeli alakulásához kapcsolódóan napjaink kulcskérdései közé tartoznak az éghajlatváltozás közvetlen következményei, melyek az emberi szervezetet érintő közvetlen hatások mellett a természetes és/vagy az emberi tevékenység által befolyásolt környezetre is hatással vannak.

Az elmúlt évtizedekben egyértelmű melegedő tendencia detektálható Földünkön: mind globális mértékben, mind kisebb térségekre – így Magyarországra – vonatkozóan. Ez az észlelhető klímaváltozási trend az üvegházhatású gázok folyamatos, antropogén eredetű kibocsátás növekedésére vezethető vissza, mely már jelentős koncentráció-növekedést eredményezett az ipari forradalom előtti időszakhoz képest. Például a légköri szén-dioxid koncentráció a néhány évszázaddal ezelőtti 280 ppm-es értékről mára 44%-kal emelkedett (IPCC, 2013), s 2016-ban a globális átlagkoncentráció elérte a 402 ppm-et. A természetes és a mezőgazdasági termelés keretében érintett vegetáció számára a módosuló éghajlati viszonyok és a szén-dioxid koncentráció egyidejű növekedése alapvető változásokat jelent. A következmények vizsgálatának egyik legfontosabb kiindulási eszköze a fizikai törvényszerűségekre épülő éghajlati modellek, s ezek szimulációs eredményei. A múltra vonatkozó modellfuttatások alapján értékelhetjük, hogy a modellek milyen mértékben képesek reprodukálni az elmúlt időszakok éghajlati viszonyait (pl.: Pieczka et al., 2017). A kapott hibák alapján kijelölhetők a fő fejlesztési irányok, melyek a modell javítását célozzák. A jövőre végzett modellszimulációk különféle feltételezett jövőképeket felhasználva adnak becslést az éghajlat jövőbeli alakulására. Mivel ezek a becslések relatíve sok, változó bizonytalanságot tartalmazó feltételezést foglalnak magukba, ezért az így kapott eredmények csupán lehetséges éghajlati viszonyokat írnak le – melyek alapvetően a feltételek teljesüléséhez köthetők. Az elemzések során érdemes minél több modell, minél több szimulációját vizsgálni, így a bizonytalanság becslésére is módunk nyílnak.

Az IPCC legutóbbi Helyzetértékelő Jelentésében (IPCC, 2013) a korábbiakhoz képest újabb közelítést, a sugárzási kényszer megváltozásán alapuló forgatókönyveket alkalmaztak (van Vuuren et al., 2011). A jelentésben a globális klímamodellek (global climate model, GCM) futtatási eredményei alapján készült elemzéseket találunk. A jelenlegi globális éghajlati modellek tipikus térbeli felbontása 100 km és 400 km közötti. Ha ennél finomabb térbeli felbontással kisebb régiókra – például Magyarország térségére – szeretnénk éghajlati becsléseket készíteni, akkor a globális modellek szimulációs eredményeinek statisztikus vagy dinamikus leskalázására van szükség. (1) A statisztikus leskalázás során olyan statisztikai összefüggéseket használunk fel, melyek meghatározása az észlelt adatsorok alapján történt. Ez ugyan kis számítástechnikai kapacitást igényel, de ehhez a közelítéshez nagy mennyiségű, jó minőségű, hosszú időszakot lefedő mért adatsorokra van szükség, melyek általában nem állnak rendelkezésre. A módszer legnagyobb hátránya az a feltételezés, hogy a múltban érvényes statisztikai összefüggések változatlanok maradnak a jövőben esetlegesen változó klíma esetén is. (2) A dinamikus leskalázás során finom (10-25 km) térbeli felbontású regionális éghajlati modelleket (RCM: regional climate model) használunk kisebb térségekre (kontinentális vagy annál is kisebb régiókra), amelyek futtatásához szükséges bemeneti adatokat (ún. kezdeti- és oldalsó peremfeltételeket, ICBC: initial conditions and lateral boundary conditions) a globális éghajlati modellek szolgáltatják. Ezáltal tehát a korlátos tartományt lefedő RCM-et beágyazzuk a teljes Földet leíró GCM-be. Az RCM-ek lehetővé teszik a felszíni domborzat pontosabb reprezentációját, a felszínborítottság és a talajtípusok precízebb megadását, valamint a mezoskálájú nem-lineáris hatások figyelembe vételét. Az RCM-ek alkalmazásának korlátja lehet a nagy számítástechnikai kapacitás igény. Ugyanakkor a fizikai rendszerben lejátszódó folyamatok és kölcsönhatások korrekt leírása miatt az ok-

okozati összefüggések pontosabban elemezhetők. Az alkalmazott éghajlati modellek jövőre vonatkozó szimulációi nem egyszerű fizikai előrejelzések, hanem számos társadalmi, gazdasági folyamat éghajlatra gyakorolt hatását is figyelembe veszik. A lehetséges társadalmi-gazdasági jövőképek következményeképpen alakuló üvegházhatású gázkoncentrációk határozzák meg alapvetően a különböző lehetséges éghajlati forgatókönyveket (optimistábbakat és pesszimistábbakat). Ezek tartalmazzák az éghajlati rendszer válaszait a változó környezeti és antropogén kibocsátási feltételekre. A fentiek miatt a modellbecslések bizonytalanságához jelentős mértékben hozzájárulnak a társadalmi-gazdasági folyamatok bizonytalanságai.

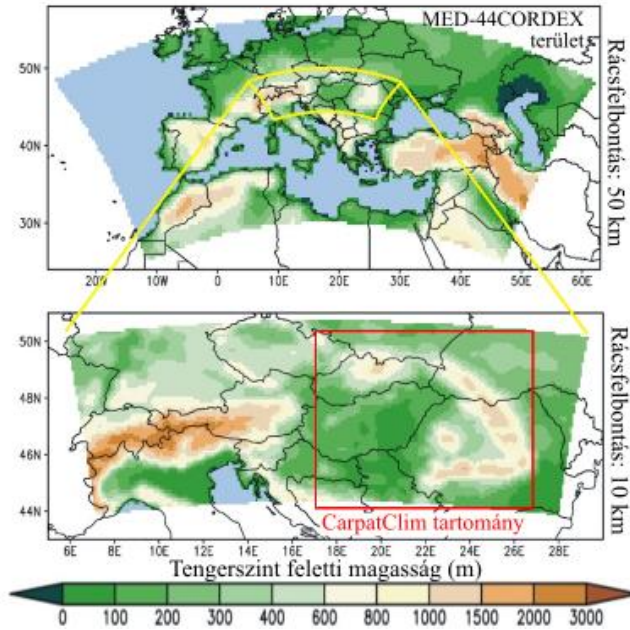
Az AgroMo projekt keretein belül RegCM (Elguindi et al., 2011) klímaszimulációk eredményei lesznek felhasználva. A HadGEM GCM outputjaival meghajtott és az RCP4.5 scenáriót tekintő futtatások korábbi (RCMTér) projekt keretében lettek előállítva. Ezen kívül még *három* modellfuttatást a jelenlegi projekthez kapcsolódóan tervezünk elvégezni:

- (1) HadGEM GCM outputjaival meghajtott és az RCP8.5 scenáriót tekintő szimuláció,
- (2) ECHAM GCM outputjaival meghajtott és az RCP8.5 scenáriót tekintő szimuláció,
- (3) ECHAM GCM outputjaival meghajtott és az RCP4.5 scenáriót tekintő szimuláció.

Az RCP4.5 és RCP8.5 scenáriók esetén a számérték azt fejezi ki, hogy az ipari forradalom előtti időszakhoz képest 2100-ra mekkora sugárzási kényszer változással számolunk W/m^2 egységben kifejezve.

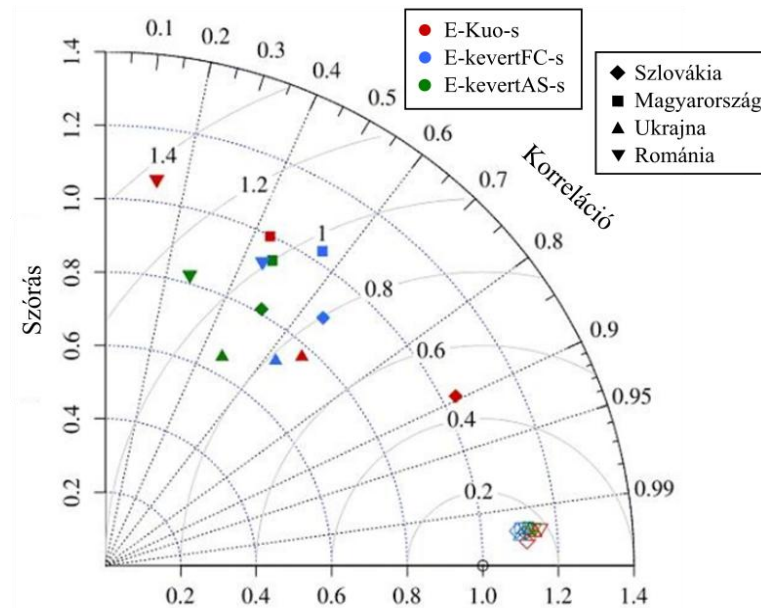
A GCM-ek $1,25^\circ$ -os horizontális felbontása miatt a leskálázást két lépésben szükséges végezni, először 50 km-es felbontással egy nagyobb térségre – ez a regionális klímodellezéshez kapcsolódó nemzetközi együttműködés során definiált ún. MED-44CORDEX terület – futtatjuk az RCM-et, majd a kapott outputokat meghajtó bemenő adatokként felhasználva kisebb területű, 10 km-es felbontású futtatást végzünk. A modellezéshez definiált területeket az 5.3. ábra mutatja be.

Vizsgálataink (Pieczka et al., 2017) alapján a RegCM-szimulációkban az ún. kevert MIT-Emanuel/Grell csapadéksémát választottuk, mely során a tengeri felszínnek esetén az MIT-Emanuel közelítés (Emanuel, 1991; Emanuel and Zivkovic-Rothman, 1999) szerepel, a szárazföldi felszínnek felett viszont a Grell (1993) sémával számolunk a Fritsch & Chappell (1980) lezárás mellett. Az alkalmazott sémák fő tulajdonságai az alábbiakban foglalhatók össze. (i) A Grell sémában a felhők leírására két stabil cirkulációt használnak: egy felszálló, illetve egy leszálló áramlást. Amikor egy telített légréteg emelkedik, akkor megtörténik a kondenzáció. Az alkalmazott Fritsch & Chappell (1980) lezárás a konvektív fluxusok és a légkör instabilitási foka közötti összefüggést használja fel. (ii) Az MIT-Emanuel közelítésben a konvekció akkor következik be, amikor a semleges felhajtóerő szintje a felhőalap felett található. Az MIT-Emanuel séma a szárazföldi felszínnek felett általában felülbecsüli a csapadékot, a Grell séma pedig a (trópusi) óceánok, kiterjedt tengeri felszínnek felett kevésbé pontos (Davis et al., 2009). Emiatt érdemes a két séma kombinációjaként beépített, fent említett kevert MIT-Emanuel/Grell sémát használni.



5.3. ábra. Az adaptált RegCM4 beágyazott regionális modellezési láncolat: az 50 km-es (fent) és a 10 km-es (lent) horizontális felbontású modellszimulációkban alkalmazott tartomány domborzata.

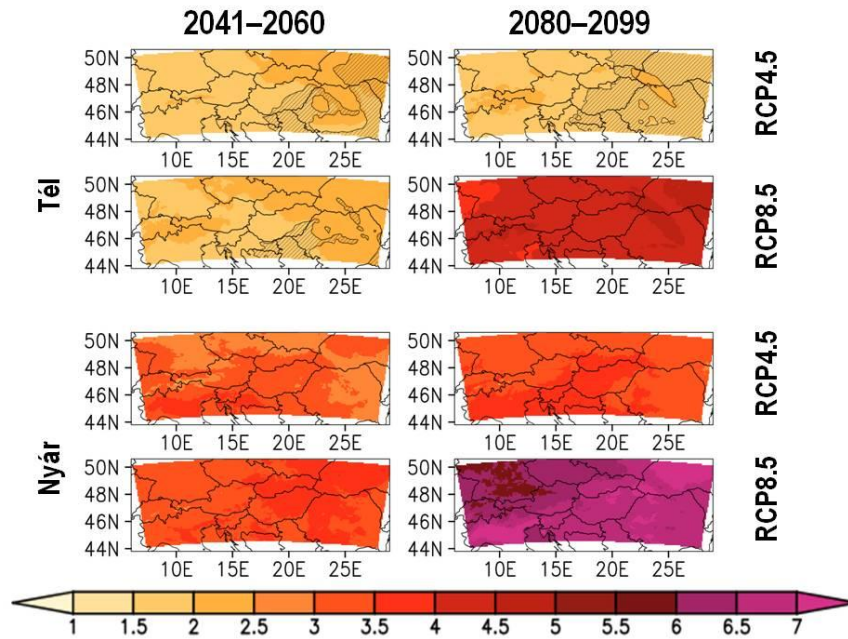
A jövőre vonatkozó szimulációs eredmények értékeléséhez ismernünk kell, hogy az alkalmazott modellbeállítás a múltra vonatkozó futtatás során mennyire pontosan képes reprodukálni az ismert éghajlati viszonyokat. Ezekhez a validációs vizsgálatokhoz többféle jellemző statisztikai tulajdonság összehasonlítását végezhetjük el, melyekhez 10-20-30 évnnyi szimulációs eredményt és valamilyen referencia adatbázist használunk fel ugyanazon időszakra. Például előállítjuk az átlagos hibamezőket – ez lehet az egyszerű különbség képzés, abszolút hiba, négyzetes hiba, stb. – havi, évszakos és éves skálán; összehasonlítjuk az éghajlati elemek (legtöbbször a hőmérséklet és a csapadék) napi értékeinek havi, évszakos eloszlásait; valamint korrelációs együtthatók számolásával az éves menetek egyezésének mértékét elemezzük. Komplex összehasonlítást tesz lehetővé a Taylor (2001) diagram, amin többféle statisztikai tulajdonság együttesen szerepel: a korrelációs együttható mellett a négyzetes hiba és a szórások összehasonlítása. Példaként az 5.4. ábrán a különböző csapadéksémák összehasonlítására készített elemzés (Pongrácz et al., 2015) eredményét láthatjuk a hőmérsékletre és a csapadéokra. Ebből is egyértelműen látszik, hogy a csapadékbecslések pontossága rendszerint elmarad a hőmérsékleti becslésektől a sokkal nagyobb mértékű változékonyság miatt, valamint amiatt is, mert a hőmérséklettel ellentétben a klímamodelben nem prognosztikai változóként, hanem származtatott mennyiségként szerepel, melyhez többféle parametrizációt is fel kell használni.



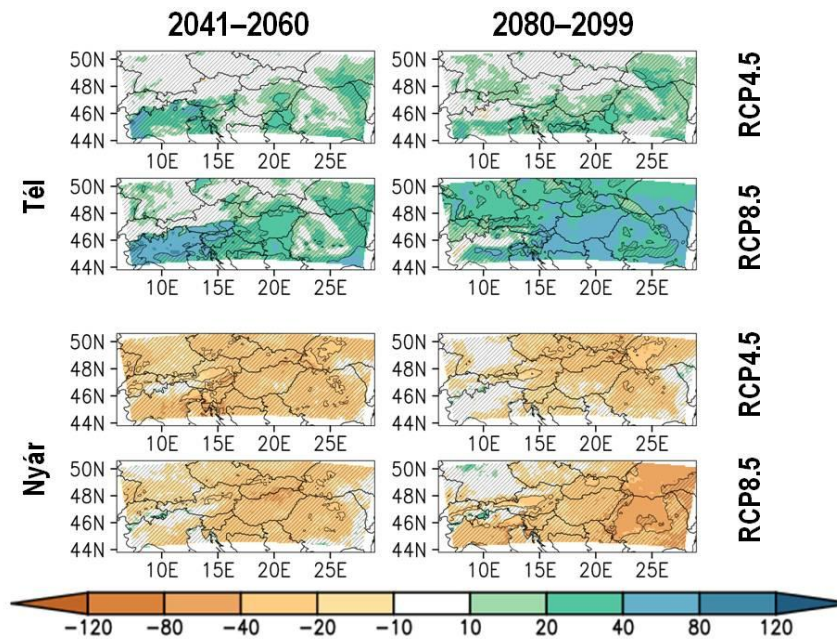
5.4. ábra. A csapadéksémákkal kapcsolatos érzékenységvizsgálat eredményének illusztrációja Taylor-diagramon: a havi átlaghőmérséklet (üres szimbólumok) és csapadékösszeg (teli szimbólumok) időbeli menetére a CarpatClim adatbázison belüli négy nagyobb térségre (1981–1990).

A validáció során megállapítottuk, hogy a RegCM szimulációk általánosságban véve melegebb és szárazabb nyarakat, valamint az év többi részében összességében több csapadékot becsülnek a CarpatClim (Spinoni et al., 2015) referencia adataihoz képest. A szimulációs hibák miatt a különféle – többek között a mezőgazdasági termeléssel összefüggő – hatásvizsgálatokhoz szükséges lehet a nyers modelloutputok hibakorrekciója. Ennek egyik leggyakrabban alkalmazott típusa az eloszlásfüggvények illesztésén alapul, például ilyen alkalmaztunk korábbi csapadékre fókuszáló elemzéseinkben is (Kis et al., 2017). A hibakorrekciók hátránya, hogy a fizikai összefüggéseken alapuló szimulációs eredmények térbeli szerkezetét, s az időbeli folyamatok szokásos lezajlását is módosítják. A hibakorrekció következményeképpen a különböző éghajlati változók közötti fizikai konzisztencia is sérül, emiatt a külön-külön végzett korrekciót mindig jól meg kell fontolni, ha a hatásvizsgálathoz többféle bemenő változó is szükséges.

A jövőre vonatkozó szimulációs eredmények közül néhányat mutatunk be példaként a hőmérsékletre (5.5. ábra) és a csapadékra (5.6. ábra). A XXI. századból két 20 éves időszakra – az évszázad közepére és végére – várható változásokat összegeztünk a térképeken. A globális tendenciákkal összhangban modellszimulációink egyértelműen melegedést valószínűsítenek az évszázad egészére vonatkozóan. A 2041–2060-ra vonatkozó térképeken megfigyelhetjük, hogy jelentős eltérés nem látható a két szimuláció között, azaz a forgatókönyv megválasztása a közeljövőben még nem befolyásolja számottevő mértékben a várható változások mértékét. Ugyanakkor az évszázad végéhez közeledve jóval nagyobb mértékű változások valószínűsíthetők: az RCP8.5 scenárió esetén a legnagyobb átlagos hőmérsékletemelkedés nyáron 6,9 °C, amely az RCP4.5 esetén becsült melegedésnek csaknem a kétszerese. A kapott különbség oka a sugárzási kényszer változása és a melegedés között fennálló egyértelmű kapcsolatban keresendő.



5.5. ábra. A RegCM10/RegCM50/HadGEM szimulációk alapján várható átlagos téli és nyári hőmérsékletváltozás (°C) az RCP4.5 és RCP8.5 scenárió figyelembevételével, referencia időszak: 1981–2000.



5.6. ábra. A RegCM10/RegCM50/HadGEM szimulációk alapján várható átlagos téli és nyári csapadékváltozás (%) az RCP4.5 és RCP8.5 scenárió figyelembevételével, referencia időszak: 1981–2000.

A hőmérséklettel ellentétben a csapadék esetén ellentétes változási tendenciák valószínűsíthetők. Mindkét scenárió esetén télen a csapadék növekedésére, míg nyáron szárazabbá váló éghajlati viszonyokra számíthatunk hazánk térségében. Az évszázad első felében (a 2041–2060 időszakig) nincs jelentősebb különbség a két scenárió között: a becült változások jellemzően csupán néhány százalékban térnek el egymástól. Ez az évszázad

második felében már egyre kevésbé igaz. Ugyan a becsült változások iránya a téli időszakban megegyezik, ám az RCP8.5 esetén valószínűsíthető számottevő mértékű csapadéknövekedés (mintegy 46% az 1981–2000 referencia időszakhoz viszonyítva) jelentősen meghaladja az RCP4.5 esetén becsült értéket (23%).

Eddigi eredményeink alapján egyértelmű, hogy a Magyarországra várható hőmérsékleti és csapadékváltozások olyan mértékűek, melyek érzékenyen érintik – többek között – a mezőgazdaságot, az erdészetet és a vízgazdálkodást. Az AgroMo projekt keretében végzendő vizsgálatok nagymértékben hozzájárulnak a megfelelő felkészülési stratégiák részletes kidolgozásához és azok gyakorlati megvalósításához. A nemzeti és helyi éghajlatváltozási alkalmazkodási stratégiák kiindulási információit a klímamodellek eredményei szolgáltatják. A lehető legsikeresebb tervezés érdekében minél több elérhető modellszimulációt szükséges figyelembe venni.

5.3. Adatbányászat technológiák

Az adatbányászati technológiák mára nagyon felkapott „buzzword”-ok lettek, és sok esetben a divat miatt a „legdivatosabbat” használják a leghatékonyabb helyett. Kétségtelenül a „nagyágyú” ezekben a technológiákban a viharosan fejlődő deep-learning (mesterséges intelligencia) technológia, azonban sok esetben ez kevésbé használható eredményeket adhat, mint a régebbi módszerek.

Az adatbányászat fő feladata a *megfelelően nagy*, és gyakran *hiányos* mérési adatban az összefüggések, korrelációk feltárása. Ezen összefüggések ezután felhasználhatók modellek készítésére, vagy verifikálására, illetve empirikus döntése eljárások kidolgozására. Igazán nagy előnye a magas dimenziós (sok paraméteres) esetekben mutatkozik meg, amikor az általános használt módszerek megpróbálják leszűkíteni a „lényeges” paraméterteret úgy, hogy néhány „magyarázó” változóval kellő pontossággal visszaadják a mérési értékeket. Ezek a változók lehetnek akár az eredeti paraméterek, akár azon valamilyen (lineáris, vagy nem lineáris) kombinációja.

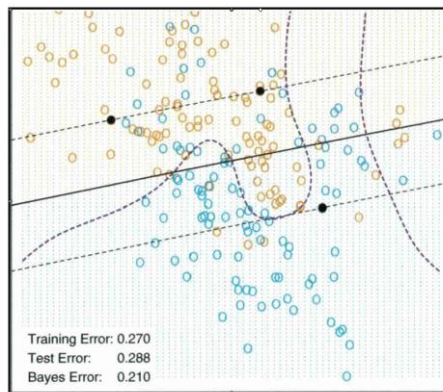
Az adatfeltárásban két nagy eljárás csoportot különböztethetők meg: az *irányított tanítás* (supervised learning), illetve az *irányítatlan tanítás* (unsupervised learning). Az első esetben ismerjük (legalább a tanulóminta) szerkezetét, és az algoritmusnak megtanítjuk, hogy mi a helyes válasz, és mi a helytelen válasz, és a tanulás után az eljárást csoportosításra használja, azaz egy mért eseményt automatikusan behelyez valamilyen csoportba. A második esetben nincsen *a priori* ismeretünk a mért értékekről, és az algoritmusra bízunk, hogy összefüggéseket, csoportokat találjon a mérési adatokban. Ennek tipikus példája a korrelációk keresése; a klaszterizáció, amikor a mérési adatokat csoportokba rendezi az algoritmus.

További osztályozási lehetőség a modell alapú és modellmentes eljárások. Az első esetében valamely modell paramétereit határozzuk meg az algoritmusok segítségével, és az az elképzelésünk, hogy értjük, mi történik a vizsgált rendszerrel, csak a paramétereket nem tudjuk „kívülről” megmondani. Ugyancsak ide tartozik, amikor több lehetséges modellünk van, és a paraméterek becslése mellett még azt is el szeretnénk dönteni, hogy a mérések melyik modellt támogatják inkább, azaz *rangsorolni* szeretnénk a modelleket. A modellmentes esetben a rendszer bonyolultsága miatt feladjuk, hogy megismerjük annak működését, helyette egy algoritmusra bízunk, hogy „tanulja meg” a rendszer viselkedését. Ez utóbbira példa az ideghálózatok, köztük a deep-learning: nem értjük, mit csinál pontosan az ideghálózat, de általában jó válaszokat ad. Maga a deep-learning algoritmus is valamilyen bonyolult, nem-lineáris tömörítést hajt végre a mérési pontokon, keresve egy-egy kategóriának megfelelő mintázatokat.

A modellmentes eset nagy hátránya, hogy megfelelően nagy és jó minőségű tanulóhalmaz szükséges hozzá. Itt külön probléma, hogy az ideghálózat nem „bemagolja” az ismereteket, hanem valóban megtanulja a vizsgált rendszer lényegi viselkedését. Ezt a pontot a legjobban a polinom illesztéssel lehet megérteni: ha N pontra N . rendű polinomok illeszttek, akkor tökéletes az illesztés (a tanulóhalmazon belüli hiba nulla), de igen nagy annak az esélye, hogy egy $N+1$. mérési pontot nagyon el fogok hibázni (a tanulóhalmazon kívüli hiba nagyon nagy). Ahhoz, hogy a következő mérési pontot jól kezelje az algoritmus, nem szabad hagyni, hogy magas fokszámú polinomot illesszen az adatokra, hogy megtanulja a vizsgált rendszer lényeges viselkedését. Ehhez hasonló probléma lép fel az ideghálózatokban, ahol a „magolás” kivédésére számos technikát alkalmaznak: a tanítási folyamat korai megszakítását, a mérési adatok zajjal való elkenését, az ideghálózat belső paramétereire vonatkozó megszorítások alkalmazását. Ebből következik az is, hogy egy ilyen hálózat a legkritikább esetben hibamentes, az esetek többségében jelentős hibával kell számolni.

A következőkben bemutatunk néhány, a projekt szempontjából releváns technológiát:

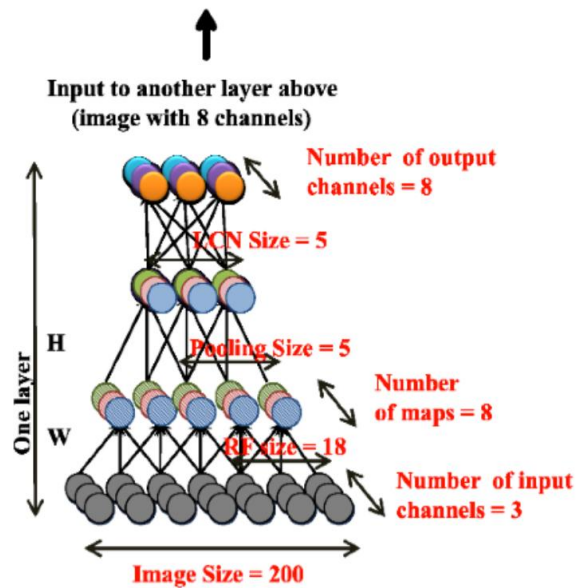
1. modellek verifikálására, a modellek által felvázolt összefüggések igazolására. Ebben az esetben a kísérleti mérésekből kiszámolt mennyiségeket vetjük egybe a modell jóslataival. Nem túl nagy számosságú kísérleti adat esetén a modell összefüggéseket érdemes a mérésekkel megegyező számú véletlen zajjal módosított elméletileg felvett pontra kiszámolni. Ilyen kvázi-kísérletből többet is el kell végezni, és a kapott eredményekből kiszámolható konfidencia intervallum segítségével lehet számszerűsíteni a modell jóságát.
2. Bayesi illesztések: ez az 1. ponthoz hasonlít, azzal a különbséggel, hogy vannak a priori becsléseink a modell paramétereinek eloszlására, és a mért adatok alapján az algoritmus módosítja ezeket az eloszlásokat. A módszer informatívabb a fenti módszernél, mivel a paramétereket eloszlásként, és nem adott értéként kezeli, ezáltal feltárja a paraméterekre való érzékenységet is.
3. „Lényeges” paraméterek kiszűrése: SVD (singular value decomposition) technikák. Ezek lényege, hogy a mérési eredményekből korrelációs mátrix(ka)t állítunk elő, és főkomponens analízis segítségével meghatározzuk azokat az „irányokat”, melyek a legérzékenyebbek a minta változásra. Általában az első 3-5 főkomponens már kellő pontossággal le szokta írni a vizsgált minta viselkedését. Előnye, hogy egyszerű eljárás, hátránya, hogy lineáris, azaz bonyolultabb összefüggések feltárására nem alkalmas (csak a kutató által heurisztikusan alkalmazott változótranszformációk alkalmazásával).
4. Nemlineáris összefüggés-vizsgálat: SVM (support vector machine; 5.7. ábra). Az egyik legjobb eszköz egy kategorizálási feladatban, amikor meg kell találni a kétféle minta közötti elválasztó felületet. Az algoritmus szakaszonkénti illesztés segítségével találja meg a legjobb elválasztó felületet.



5.7. ábra. A Support Vector Machine algoritmus működés közben. A cél a "legjobban" elválasztó felület meghatározása a paramétertérben.

5. Deep-learning algoritmusok (5.8. ábra): szerencsére számos szabad, igen jól támogatott fejlesztőrendszer létezik (pl. a Google TensorFlow), melyekkel gyorsan összeállítható egy deep-learning program. A legnagyobb kihívás a tanítással kapcsolatos, mivel kellően nagy, jó minőségű adat szükséges a tanításhoz, és a rendelkezésre álló minta 10-20%-át fenn kell tartani tesztelési célra. Ugyanakkor számos konkrét feladathoz le lehet tölteni egy már előre felprogramozott rendszert, és azt lehet finomhangolni lényegesen kevesebb adat segítségével. A projektben használt

adatmennyiséget tekintve, ezt a „végső eszköznek” ajánlom csak, mivel a pontossága 60-80%-os tartományba várható.



5.8. ábra. A Deep Learning ideghálózat felépítése: a legalsó réteg kapja a paramétereket, a legfelső réteg osztja be kategóriákba az információt. A közbenső rétegek nemlineáris módon vannak összekötve az alattuk és a felettük levő rétegekkel.

A deep-learning programok alkalmasak GPU processzorokon való futtatásra, amire komoly számítások esetében szükség is van, mivel igen sok ideig tart egy betanítás. A projekt ismeretében azt vélelmezzük, hogy nem lesz szükség akkora számítási kapacitásra, hogy GPU klaszterre legyen szükségünk.

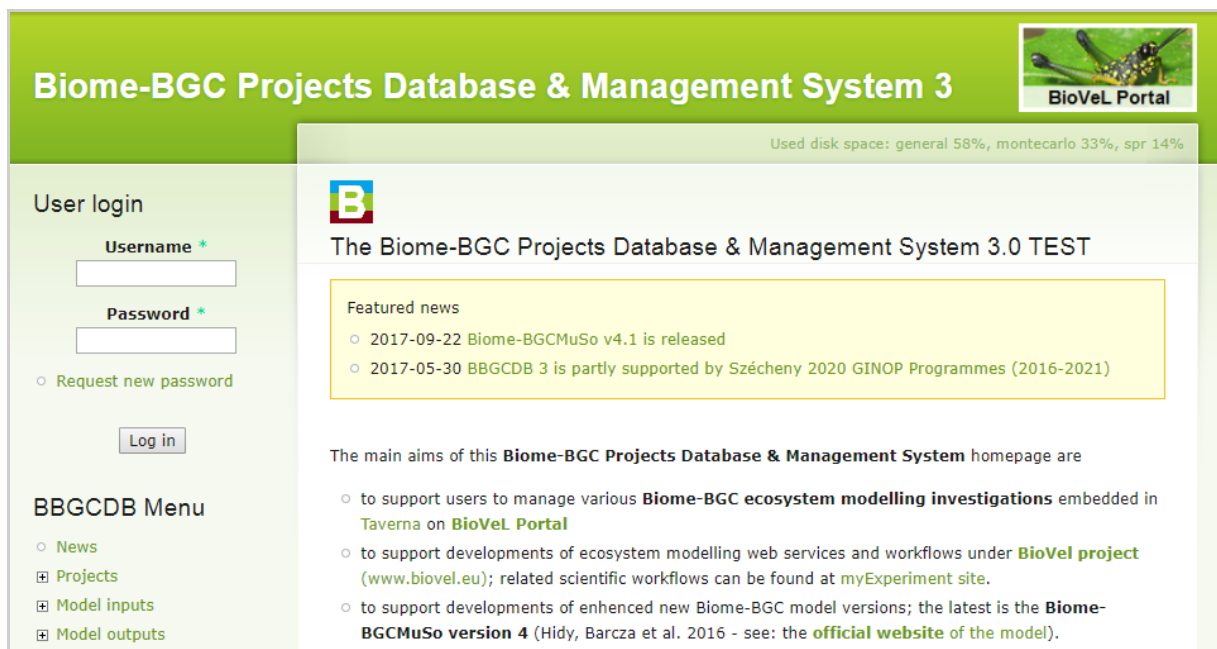
Az ideghálózat működését úgy képzeljük el, hogy az megkapja a bemeneten a mérés körülményeit (annyi „neuron” van, ahány paraméter, melyek tetszőleges értéket vehetnek fel), a kimenetén pedig meg kell jelennie, hogy ennek alapján melyik kategóriába sorolta a mérést (tipikusan valószínűségeket ad a különböző kategóriákra). A tanítás során megkapja a bemeneti adatokat, és a kimeneten megjelenő értéket „korrigáljuk” a „backpropagation” algoritmussal, mely az egyes neuronok közötti kapcsolat erősségét húzzák el abba az irányba, hogy a rendszer a megtanulandó eredményt adja. Mivel igen sok kapcsolat van, ezért szükséges a nagy tanulóhalmaz.

6. Az összes adatbányászati technológia hatékony alkalmazásához szükséges az adatok jól strukturált tárolása, és könnyű elérhetősége. Ezt valamilyen adatbázis-kezelő segítségével lehet jól megoldani (mysql, postgres, MS-sql, Oracle), de sok energiát kell fektetni az adatbázis struktúrájának kialakításába. Külön erőfeszítést igényelhetnek a mérésekhez (ld. 4.1 fejezet) tartozó geolokációs adatok kezelése. Ezek tipikusan hagyományos adatbázisokban nem reprezentálhatók jól (főleg a területeket behatároló ívek), vagy Voronoi hálók, vagy speciális, erre a célra kifejlesztett adatbázisok szükségesek leírásukhoz.

5.4. Tudományos célú informatikai környezet kialakítása, a BBGCDB szerepe

A Biome-BGC modellek (Biome-BGC 4.1.1, Biome-BGCMuSo 4 és a Biome-BGCMuSo korábbi munkaverziói) önálló számítógépen való futtatásra alkalmas programok. A komolyabb kihívásokat jelentő adat-modell harmonizációs (más szóval kalibrációs vagy optimalizációs), modell szimulációs, több felhasználós futtatások és automatizált feladatok kielégítésére egy keretrendszert fejlesztettünk a korábbi BioVeL projekt során (2011-2014, <http://www.biovel.eu/about-biovel>), amelyet az MTA Ökológiai Kutatóközpont (MTA ÖK) üzemeltet. A rendszer továbbfejlesztését és tudományos hasznosítását az MTA ÖK, az MTA ATK és az ELTE TTK Kiválósági Tudásközpont együttműködése biztosítja.

A keretrendszer neve: Biome-BGC Project Database and Management System, röviden BBGCDB (<http://ecos.okologia.mta.hu/bbgcdb/>), amelynek fejlesztését Drupal tartalomkezelő rendszerrel végezzük (5.9. ábra).



5.9. ábra. A BBGCDB keretrendszer továbbfejlesztett, 3-as verziójának kezdő Internetes oldala (<http://ecos.okologia.mta.hu/bbgcdb/node/4527>).

A BBGCDB keretrendszer a következő hozzáadott képességeket biztosítja a projekt számára:

I. **több felhasználós web-es platform** – a modell és a kapcsolódó szolgáltatások egy távoli szerveren futnak, amely egyszerre több felhasználót is ki tud szolgálni. Ezzel párhuzamos futtatásokat, csoportmunkát és/vagy oktatási/továbbképzési projekteket támogat. A BBGCDB keretrendszerbe eddig a Biome-BGC 4.1.1 Max Plank Institute és a Biome-BGCMuso 4 modellváltozatokat integráltuk. A felhasználótól ez a megoldás csak minimális helyi erőforrást (egy böngészőt) igényel, ugyanakkor elég nagy számítási kapacitást biztosít a távoli szerveren. Ilyenkor a modell telepítésére és a futtatási környezet helyi kialakítására nincsen szükség, csak a BBGCDB használatához szükséges hozzáférésre.

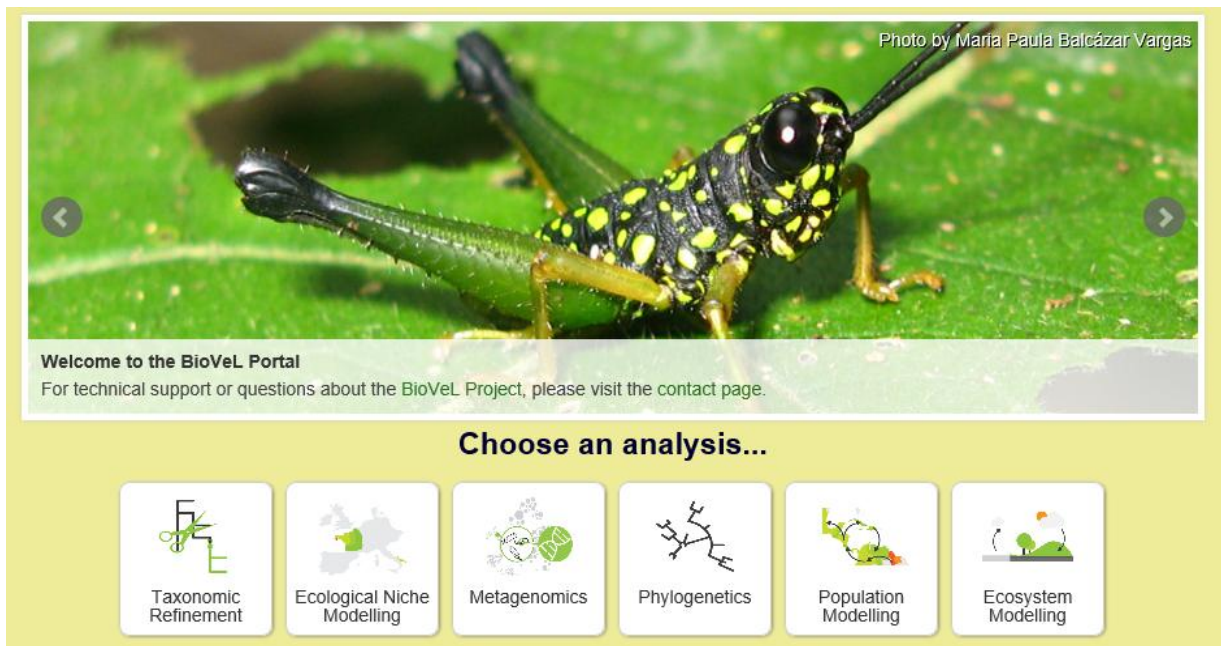
II. modell paraméterek és bemenő adatsorok közös adatbázisa – az ökoszisztéma modellezés lelke a modell, a paraméterezések és a bemeneti adatsorok együttese. Egy sikeres futtatáshoz általában hosszas előkészítő munka szükséges, amely során össze kell állítani az adott 'Biome-BGCMuSo' ökofiziológiai paraméter együttesét (EPC – EcoPhysiology Constant parameters), az adott földrajzi helyre vonatkozó napi meteorológiai adatsorokat (METDATA), a légköri CO₂ koncentráció (CO₂) és nitrogén ülepedés (NDEP), továbbá a termőhelyet jellemző és a kezeléseket (pl. management és mortalitás) leíró adatsorokat, tulajdonságokat. Ezeket a BBGCDB rendszer saját adatbázisában kezeli, amelyek a felhasználók között megoszthatók és kiválaszthatók, ezzel támogatva a csoportmunkát és hatékonyabbá téve az együttműködést, ill. a már beállított projektek újrafuttatását, módosítását, továbbfejlesztését.

III. nagy számítási kapacitás – az adat-modell harmonizációs (kalibrációs) feladatokat, a párhuzamos és/vagy nagyszámú modellfuttatásokat igénylő számításokat a rendszer a BOINC 'desktop grid' rendszeren keresztül több, dedikált számítógépre elosztva menedzseli, megsokszorozva ezzel a rendszer feldolgozási kapacitását. A gridbe kapcsolt számítógépek száma szükség szerint bővíthető. A BOINC desktop grid rendszert a BioVeL projekt során az MTA SZTAKI Párhuzamos és Elosztott Rendszerek Kutatólaboratóriuma szolgáltatta (SZDG). Ebben a projektben ezt továbbfejlesztettük és leváltottuk az MTA ÖK által kiépített új desktop grid rendszerrel. Mivel ennek minden elemét az MTA ÖK szerverparkjában alakítottuk ki, mely nagy belső adatkapcsolati sávszélességgel rendelkezik, a rendszer teljesítménye és válaszideje kedvezőbb a korábbi megoldásnál.

IV. Munkafolyamatba integrált elemzőképességek – a BioVeL projekt során kialakítottunk több tudományos elemző munkafolyamatot (angolul scientific workflow). A fontosabbak, a Biome-BGC CARBON, SA – Sensitivity Analysis, MCE – Monte Carlo Experiment és a GLUE - Generalized Likelihood Uncertainty Estimation, amelyeket Taverna Scientific Workflow rendszerbe integráltuk. Ez a fejlesztés a tudományos elemzés teljeskörű megismételhetőségét vagy módosított újrafuttatását (újrahasznosítását) teszi lehetővé. A BioVeL projekt során még csak a Biome-BGC 4.1.1 verzióval dolgoztunk, de jelen projekt keretében a Biome-BGCMuSo 4 modellel is alkalmazhatjuk a CARBON, SA, MCE és GLUE workflow-kat. A Taverna workflow fejlesztések használatát a BioVeL portál 'Ecosystem Modelling' szolgáltatásai biztosítják számunkra (5.10. ábra).

A Biome-BGCMuSo modell lényegesen továbbfejlesztett, 5-ös verzióját is integrálni fogjuk a BBGCDB rendszerbe. Az 5-ös verzió biztosítja majd a BBGC-MAg modell alapját, így a BBGCDB fejlesztések jóvoltából lehetőség nyílik a modell optimalizálására a projekt keretén belül mért nagyszámú mérési adat segítségével. Ez biztosítja az eddig kifejlesztett elemző képességek további hatékony tudományos alkalmazását és kihasználását.

A BBGCDB a fentiek értelmében egy olyan kiegészítő szolgáltatást nyújt a projektben, amely nagyban megkönnyíti a modellel való munkát. Terveink között szerepel a BBGCDB környezet közzététele is a nemzetközi kutatói közösség felé. Ez oly módon valósítható meg, hogy a különböző tudományos fórumokon (pl. FluxNet, MACSUR ill. AgMIP levelezőlisták) bemutatjuk a szolgáltatást a kutatóknak, és felkínáljuk a BBGCDB ingyenes használatát Természetesen ez komoly kihívást fog jelenteni a projekt munkatársai részére.



5.10. ábra. A BioVeL portál (<https://portal.biovel.eu/>) által biztosított szolgáltatások között az 'Ecosystem Modelling' elemzések keretében a legújabb Biome-BGCMuSo modellel is végezhetünk szimulációkat, érzékenység- vagy GLUE elemzést.

5.5. Az Integrált Modellrendszer talajtani adatigényeinek kielégítése az eredmények térbeli kiterjeszhetőségének figyelembevételével

Jelen projekt igényeihez hasonlóan számos szakterület és társadalmi kihívás kezelése támaszkodik a talajtakaró megbízható térbeli jellemzésére (agrárkörnyezet-gazdálkodás, élelmiszerbiztonság, klímaváltozás, környezetvédelem, környezeti kockázat becslés, természetvédelem, területi tervezés, vidékfejlesztés, vízgazdálkodás). A talajokra vonatkozó információigény korábban is jelentős volt, napjainkban azonban amellet, hogy erőteljesen bővül, egyidejűleg jellege is változik. Az utóbbi évtizedben a térbeli talajinformációk értelmezésében és előállításában paradigmaváltás következett be. A talajjellemzők térképi megjelenése kvantitatív térbeli becslés eredménye, melyet kiegészít a predikció globális és lokális bizonytalansága.

A digitális talajtérképezés alapjai és szerepe a talaj téradatok fejlesztésében

A talajtérképezés célja a talajtakaróra vonatkozó tematikus ismeretek térbeli viszonyainak feltárása és megjelenítése. A talajtérkép olyan tematikus térkép, amelyen a tematikát valamely, a talajokra vonatkozó információ határozza meg. Ez lehet elsődleges vagy másodlagos (származtatott) tulajdonság, illetve osztály, valamint a talaj funkcióira, folyamataira, szolgáltatásaira vonatkozó ismeret. Az elsődleges (akár kvantitatív, akár kvalitatív) talajtulajdonságokat, osztályokat megjelenítő térképek szerkesztésének legnagyobb és megkerülhetetlen kihívása a lokális ismeretek térbeli kiterjesztése.

A mintavételezésen alapuló térképezés inherens módon prediktív, a fel nem keresett helyekre vonatkozóan csak becsülhető az aktuális változó értéke, illetve osztálya. A térbeli becslés történhet: 1. kizárólag a térképezendő változó figyelembevételével, annak térbeli tulajdonságai alapján; 2. szintén a térképezendő változó alapján, de a kiterjesztés érvényességének korlátait egyéb térképi alapú kiegészítő információk szolgáltatják; illetve 3. minden becslési pontban kiegészítő környezeti segédváltozó(k)ra támaszkodva.

A talajok térbeli változékonyságának leírására alapvetően két, egymásnak látszólag ellentmondó, de egymást kiegészítő koncepció használatos. Az egyik megközelítés lényegében a hasonlóságra épít és alapvetően objektum alapú. Homogén, vagy becsülhető összetételű aggregátumokból álló térképi egységekkel, talajfoltokkal reprezentálja a talajtakarót. Ennek térképi megjelenése a jelentősen nagyobb hagyományokkal rendelkező klasszikus talaj(folt)térkép. E talajtérképekbe foglalt modell szerint a talajtulajdonságok a térképi egységeken belül az adott felbontásban homogének vagy kartográfiailag tovább nem bontható formában heterogének; a folthatároknál pedig a térképezendő talajtulajdonság(ok)ban szakadás van. A másik megközelítés a talajtulajdonságok folytonos térbeli változását hangsúlyozza. A térképezendő talajtulajdonságot cellánként becsüljük, a térbeli felbontást pedig a cella mérete határozza meg. A térinformatikai raszteres adatmodellek ezen reprezentációhoz ideális keretet biztosítanak. Megemlítendő, hogy léteznek a két koncepció közötti kompromisszumos megoldások, pl. a fuzzy modellezés által a talajtérképezés számára nyújtott lehetőségek.

A tematikus térképek jellemzően a tematikus ábrázolásból és a topográfiai alapinformációkat szolgáltató térképi alapról állnak. A talajtérképezés is hagyományosan támaszkodik alaptérképi támogatásra egyrészt az ábrázolandó talajtulajdonság térbeli változékonyságának értelmezésére, modellezésére és főképp a talajfoltok lehatárolására; másrészt a véglegesített tematikus térképi információ megjelenítésének is keretét, illetve háttérét adják.

A talajtérkép a talajtakaró célspecifikus térbeli modellje, melynek megalkotása a talajképző folyamatok szem előtt tartásával történik. Ezen definíció három központi tényezőjét érintően jelentős és lényegében egyidejű változások történtek, amelyek hatásának köszönhető a digitális talajtérképezés megerősödése, majd elterjedése az utóbbi évtizedben.

- A talajképző folyamatok egyes szegmenseire közvetve vagy közvetlenül vonatkozó térinformatikai (térbeli és egyben digitális) információk egyre nagyobb mennyiségben, egyre nagyobb térbeli felbontásban és egyre olcsóbban váltak elérhetővé.
- Az így elérhető ún. környezeti segédinformációk és a talajok egyes jellemzői közti, néha igen bonyolult és áttételes kapcsolatok számszerűsítésére determinisztikus modellek híján is hatékony alkalmazható matematikai (geo-)statisztikai és adatbányászati eszközök jöttek létre. Ezeket ugyan eltérő szakterületek problémáinak kezelésére fejlesztették ki, de jelen projekt során is számos esetben jól használhatók.
- A globalizációs folyamatokkal párhuzamosan nyilvánvaló vált, a világ talajtakarójának ismerete mily nagymértékben inhomogén. Ez egyrészt a Világ nagy részén csak igen korlátozott konkrét talajtani adatok alapján is viszonylag megbízható talajtérképek előállítását és ezzel ezen területek talajtérképi információkkal való legalább minimális lefedettségének elérését indukálta. Másrészt az egységesítés alapjainak kidolgozását, hiszen (legalábbis ahol volt ilyen) a korábbi térképezések nemzetállamok szintjén, független módszertanok alapján történtek, melynek eredményeképpen a természet földrajzilag folyamatosan változó talajtakaró leképezésében az országhatárok mentén mégis mesterséges törések mutatkoznak.

A talajtérképezésben hatalmas változást hozott az egyes talajképző tényezők szerepének numerikus formalizálása. A digitális talajtérképezés (DTT) térinformatikai környezetben integrálja a talajtani és környezeti adatokat, a klasszikus talajtani tudást és a modern adatbányászati, geostatisztikai módszereket. További lehetőség a cél-specifikusan, feladat-orientáltan elvégzett elemzések eredményeként a felhasználói igényeket célzottan és optimálisan kielégítő talajtérképek megalkotása.

A digitális talajtérképezés (DTT) lényege (5.11. ábra): a talajra vonatkozó, mintavételből származó információk térbeli kiterjesztése a térképezendő területre teljes fedettséget biztosító, a talajképződési folyamatokkal, illetve azok következményeivel kapcsolatban álló, környezeti tényezőkre vonatkozó térbeli változók segítségével. A DTT az úgy nevezett SCORPAN egyenlet segítségével formalizálható:

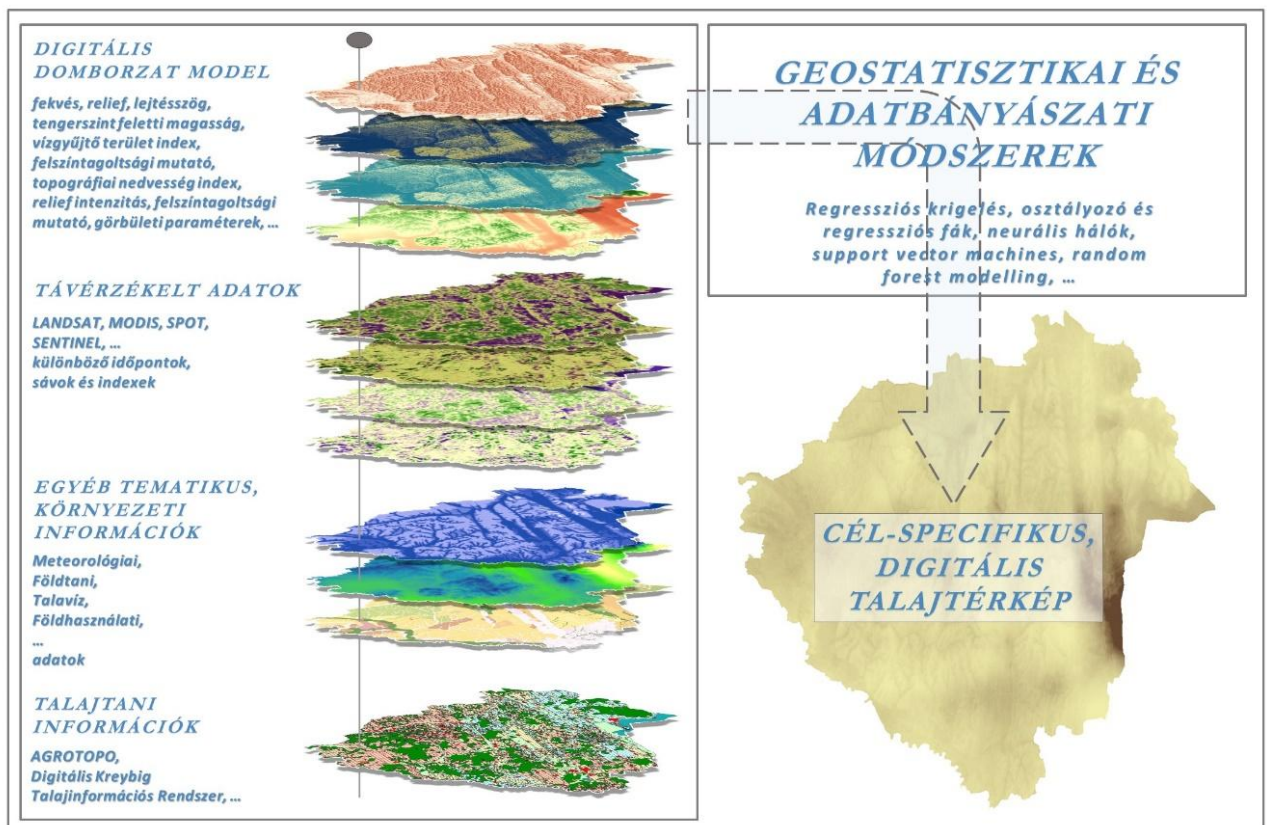
$$S_{\text{tulajdonság vagy osztály}} = f(S, C, O, R, P, A, N),$$

ahol a bal oldalon a térképezendő kvantitatív vagy kvalitatív talajtulajdonság vagy általánosabban vett talajtani jellemző szerepel, a jobb oldalon pedig a talajképző folyamatok (Climate, Organisms, Relief, Parent material, Age and geographic position; azaz: Klíma, Növényzet, Domborzat, Alapkőzet, Kor, Földrajzi helyzet) az adott célváltozóra prediktív változói, kiegészítve a talajra vonatkozó (S) egyéb hasznosítható és rendelkezésre álló térképi alapú adatokkal. A leggyakrabban használt környezeti segédváltozók egyrészt a digitális domborzatmodellekből származtatott morfometriai deriváltak, másrészt a távérzékelés által szolgáltatott többidőpontú, multi-, illetve hiperspektrális képi információk. A függő (térképezendő) és a független (a térképezést segítő) változók közti kapcsolat funkcionális realizációjára (f) számos módszert vetettek be a DTT rövid története során.

- Amikor a prediktív térképezés kizárólag a térképezendő változóra rendelkezésre álló adatok alapján történik, térbeli interpolációról beszélünk, aminek háttérében Tobler Első Földrajzi Törvénye áll, mely szerint „Minden mindennel összefügg, de az egymáshoz közelebbi dolgok közti kapcsolatok erősebbek”, ami a térbeli autokorreláció koncepciójának egy alternatív megfogalmazása. Az ide tartozó

módszerek lényege, hogy a földrajzi (geometriai) térben működnek. A különböző interpolációs eljárások azon elemei, amelyeket a környezeti elem sztochasztikus modellezése dominál, geostatisztikai módszereknek hívjuk.

- Amikor a predikciót környezeti segédváltozókra alapozva próbáljuk kivitelezni, a legfőbb kihívást a térképezendő változó és a térképezésben használt prediktor változók közti kapcsolat kvantifikálása jelenti. Különböző általánosított osztályozási, azaz adatbányászati módszerek ezen feladat megoldására megfelelőnek bizonyultak. Ezen eljárások alapvetően a fázisteret vizsgálják, annak szerkezetét elemezve a rejtett és/vagy komplex kapcsolatok feltárása érdekében. Regressziós és osztályozó fákat, véletlen erdőket, neurális hálókat, különböző Bayesi módszereket, support vector machines-t és egyéb további módszereket próbáltak ki és használtak sikerrel különböző digitális talajtérképezési feladatokban.
- Vannak továbbá olyan módszerek, amelyek nem kizárólag a földrajzi vagy a fázistérre koncentrálnak. A két leggyakrabban használt eljárás a ko-krigelés, illetve a regresszió krigelés. A ko-krigelés során a geostatisztikai interpolációt egy sűrűbben mintavételezett és a térképezendő változattal térben korreláló segédváltozó teszi hatékonyabbá. A regresszió krigelés során a térképezendő változó varianciáját két részre osztjuk: a trendet a segédváltozók segítségével elvégzett többváltozós lineáris regresszió eredményével becsüljük; a magyarázott részen felül megmaradó reziduálokat aztán krigelés révén interpoláljuk. A végeredmény a determinisztikus és a sztochasztikus tényező eredőjeként áll elő.



5.11. ábra. A digitális talajtérképezés koncepciója.

A térbeli kiterjesztés lehetőségeinek és a potenciálisan elérhető környezeti segédváltozók tárházának köszönhetően egynél jellemzően jóval több lehetőség adódik egy adott talajtérkép származtatására. Azaz nem csak egy és kizárólagos módszer alapján

készíthető el egy adott adatigényt kielégítő térképi állomány, hanem kompetitív módszercsaládok és háttér információk számos kombinációja szerint. Másképp fogalmazva egy adott célt kielégítő térkép maga is számos realizáció formájában születhet meg, amelyek tematikus tartalmuk, felbontásuk, pontosságuk, megbízhatóságuk szerint különböznek. Az eredmények pontossága és megbízhatósága nagyban függ a felhasznált talajinformációs nyersanyag mennyiségétől és minőségétől, illetve az alkalmazott módszer relevanciájától. A DTT környezet inherens lehetőséget biztosít a tematikus térképek térbeli pontosságának, megbízhatóságának térbeli jellemzésére is, így az eredmény optimális kiválasztására. Térképezési munkáink során központi szerepet játszik a térbeli modellezési módszerek pontosságának, megbízhatóságának lokális és globális becslése, az előállított térképek térbeli bizonytalanságának értékelése és annak széleskörű, ugyanakkor cél-specifikus kommunikációja, illetve ezekre alapozva a térbeli predikciók javítása és optimalizálása.

A hagyományos talajtérképek robosztus információkat jelenítettek meg. A DTT keretében azonban a célváltozók kiválasztása sokkal több szabadsági fokkal történik. A térképezendő jellemző vonatkozhat a teljes szelvényre, annak egy bizonyos standard mélységi, diagnosztikai avagy genetikus rétegére. Lehet numerikus, vagy kategória típusú alap-, avagy levezett tulajdonság, standard vagy egyedi jellegű paraméter (5.12. ábra). A sokszínűség mellett, illetve a lehetőségek túlságosan is széles tárházának ellenpontosításaként bizonyos szabványosítási törekvések is megindultak. Ezek közül a legfontosabb a GlobalSoilMap.net nemzetközi kezdeményezés, mely jól definiált geometriai, mélységi, tematikus és pontosság meghatározási specifikáció alapján tervezi lefedni a szárazföldek teljes területét talajtani alapinformációkkal. A GSM specifikáció szerinti standard talajrétegek: 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, 60-100 és 100-200 cm.

CÉLVÁLTOZÓ					
Elsődleges talajtulajdonság			Talaj típus/osztály		
teljes szelvény	szint		teljes szelvény	szint	
	GSM.net standard	specifikus mélység réteg		GSM.net standard	specifikus mélység réteg
standard vagy egyedi jellemző			standard vagy egyedi jellemző		
Másodlagos talajtulajdonság			Másodlagos talaj típus/osztály		
teljes szelvény	szint		teljes szelvény	szint	
	GSM.net standard	specifikus mélység réteg		GSM.net standard	specifikus mélység réteg
standard vagy egyedi jellemző			standard vagy egyedi jellemző		
Talaj funkciók, szolgáltatások					

5.12. ábra. A DTT során térképezhető talajtani célváltozók csoportosítása.

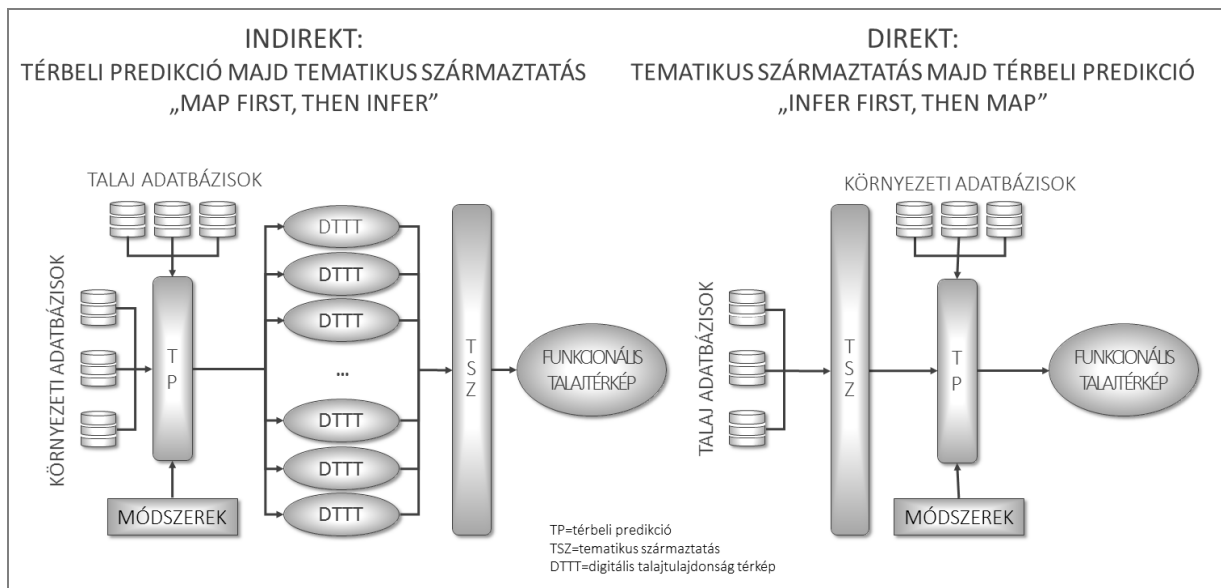
A hagyományos talajtérképek megalkotása hosszadalmas folyamat eredménye, kezdve a felvételezéstől, a talaj-táj modellek adott környezetben való leképezésén át, a végtermékek kartografálásáig. Ezért a klasszikus térképek kapcsán fel sem merülhetett gyorsan változó

talajjellemezők regionalizálása, illetve a térképek gyakori felülvizsgálata, reambulációja, horribile dictu utólagos javítása, pontosítása. A térképek robosztus információk megjelenítésével hosszabb távú felhasználásra készültek. A digitális talajtérképezés jelentősen lerövidítette az adattól a térképig vezető folyamat időtartamát, lehetővé tette továbbá a felhasználói igények nagyságrendekkel rugalmasabb figyelembevételét. A digitális talajtérképeket a tematikus robosztussággal szemben a feladat-orientáltságban, a célspecifikusságban megmutatkozó funkcionalitás jellemzi.

A nemzetközi irányokkal szinergiában a hazai talaj téradat infrastruktúra megújulása is megkezdődött a rendelkezésre álló erőforrások és lehetőségek maximális kiaknázásával, valamint a társadalmi igények figyelembevételével. A DOSoReMI.hu (Digital, Optimized, Soil Related Maps and Information in Hungary; azaz Digitális, Optimalizált, Általános értelemben vett Talajtérképek és Térbeli Információk) kezdeményezés kimondott célja a hazai talaj téradat infrastruktúra megújítása. Ennek során újragondoltuk a talaj téradatok előállításának és szolgáltatásának kereteit. Az elmúlt két-három évben folyamatosan születtek országos fedettségű, tematikus talajtulajdonság térképek a talaj egyes rétegeire vonatkozóan, különböző digitális talajtérképezési módszerek felhasználásával. Az egyes célváltozók modellezése különböző térbeli kiterjesztési eljárások sorával történt (a módszerek, referencia és prediktor adatok változtatásával), melyek közül az eredménytérképekre elvégzett pontossági vizsgálatok alapján választottuk ki a legjobban teljesítőt és egyben az azt szolgáltató paraméter együttest (referencia talajadat, segédváltozó sokaság, módszer). Az eddig elkészült országos termőréteg vastagság, textúra, szemcse frakciók, szabadföldi vízkapacitás, szervesanyag-tartalom, mész-tartalom, pH térképek részben a GlobalSoilMap.net specifikációi szerint, részben azok kisebb-nagyobb mértékű változtatásával születtek a felhasználói igények figyelembevételével.

Országos, térbeli lehatárolást igénylő problémák támogatására speciális, diagnosztikus talajjellemezőkre vonatkozó nagy térbeli felbontású, unikális, országos térképek születtek (pl.: maximális pH a talaj felső 150 centiméterében, a szelvény súlyozott sótartalma, vertic tulajdonság megjelenési valószínűsége a felső 100 centiméterben, a durva homok textúra típus kumulatív vastagsága a felső 100 centiméterben). Az adott jellemzőkről soha korábban nem születtek térképi alapú elemzések, főképp nem az ország teljes területére vonatkozóan.

Az elsődleges talajtulajdonságok térbeli becsléseinek kidolgozása közben folyamatosan foglalkoztat minket a másodlagos tulajdonságokat, funkciókat, szolgáltatásokat, folyamatokat regionalizáló, általánosabb értelemben vett talajtérképek szerkesztése akár az elkészült talajtulajdonság térképek tovább hasznosítása révén, akár az ezek elkészítése során kidolgozott eljárások továbbfejlesztésével. Az 5.13. ábrán összefoglaltuk elképzeléseinket a digitális talajtulajdonság térképek környezeti modellekbeli integrációjáról és tematikus származtatásáról, általánosabb értelemben vett talajjellemezők térképezése céljából.



5.13. ábra. Általánosabb értelemben vett talajjellemzők térképezésének meghatározó lehetőségei.

Összegzés

Egy meghatározott területre vonatkozó, talajtani céltérkép előállításához a következőkre van szükség:

- A céltérkép paramétereinek megadására (tematikus tartalom, felbontás, pontosság, megbízhatóság).
- Az adott területre teljes fedettséget biztosító, a cél tematika szempontjából releváns talajképződési folyamatokra vonatkozó, térképi alapú környezeti segédadatokra a céltérkép felbontásával összemérhető térbeli felbontású reprezentációban.
- A SCORPAN egyenlet funkcionális végrehajtását lehetővé tevő módszer(ek) kiválasztására.

A térbeli talajinformációk (alap és általánosabb értelemben vett talajtérképek) értelmezésének és előállításának új paradigmája a következőkre épül:

- A talajjellemzők térképi megjelenése térbeli becslés eredménye.
- A térbeli becslés alapja a térképezendő területre teljes fedettséget biztosító, a talajképződési folyamatokkal, illetve azok következményeivel kapcsolatban álló, környezeti tényezőkre vonatkozó térbeli változók és a térképezendő talajtulajdonság kapcsolatának modellezése.
- A térbeli modellezés geoinformatikai környezetben történik geostatistikai és adatbányászati módszerek, illetve ezek kombinációinak felhasználásával.
- A korszerű módszerek a térképi eredményen túl a térbeli becslések globális és lokális pontosságát és megbízhatóságát is szolgáltatják.
- A térképi végtermék a felhasznált referencia és segédadatok, illetve a módszer(ek) hármásának eredménye; minősége és használhatósága ezek függvényében alakul.
- A térbeli becsléshez a legteljesebb és egyben az aktuálisan elérhető legpontosabb adatok felhasználása mind a térképezendő változó, mind a modellezésben használt segédváltozók részéről.

- Az új környezetben előállított talaj téradatak (talajtérképek) tematikájukban, azok reprezentációjában, mélységi vonatkoztatási lehetőségeikben messze túl mutatnak a korábbi térképek által közvetített tematikus tartalmakon.
- Az újonnan előállított talaj téradatak és az azok alapján szerkesztett, kartografált térképek az adott tematikán túl az elkészítésükre és a pontosságukra vonatkozó információkkal együtt alkotnak egységes adatrendszert.
- A térképezett talajtani változókat a tematikai robusztussággal szemben a feladat-orientáltságban, a célspecifikusságban megmutatkozó funkcionalitás jellemzi.

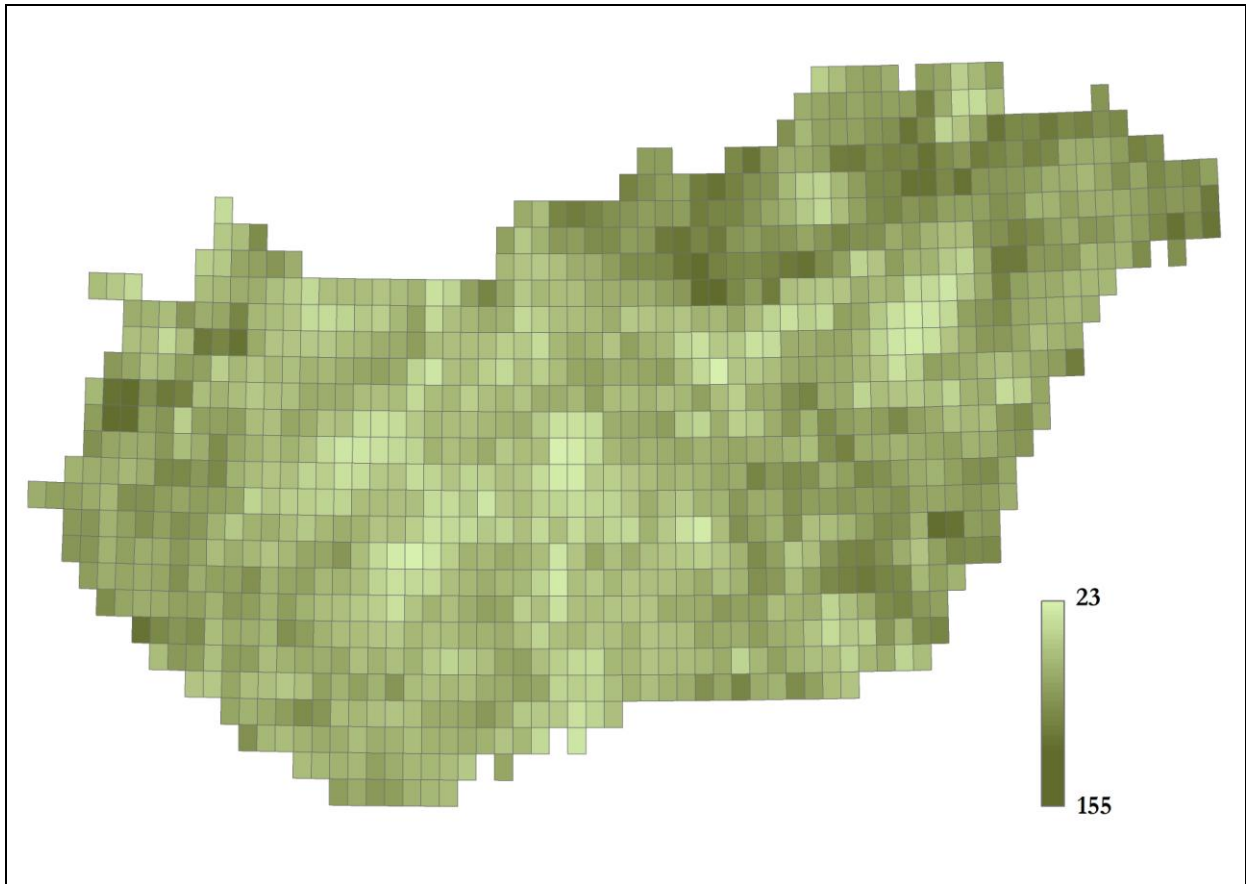
Az AgroMo számára előállított tematikus talajtani rétegek

A fejlesztés alatt álló integrált biogeokémiai és mezőgazdasági modellrendszer talajtani adatigényének kielégítése a fent bemutatott digitális talajtérképezési környezetben történik. A 4M agrometeorológiai modell korábbi futtatásai öt tematikus alap talajtérképen alapultak:

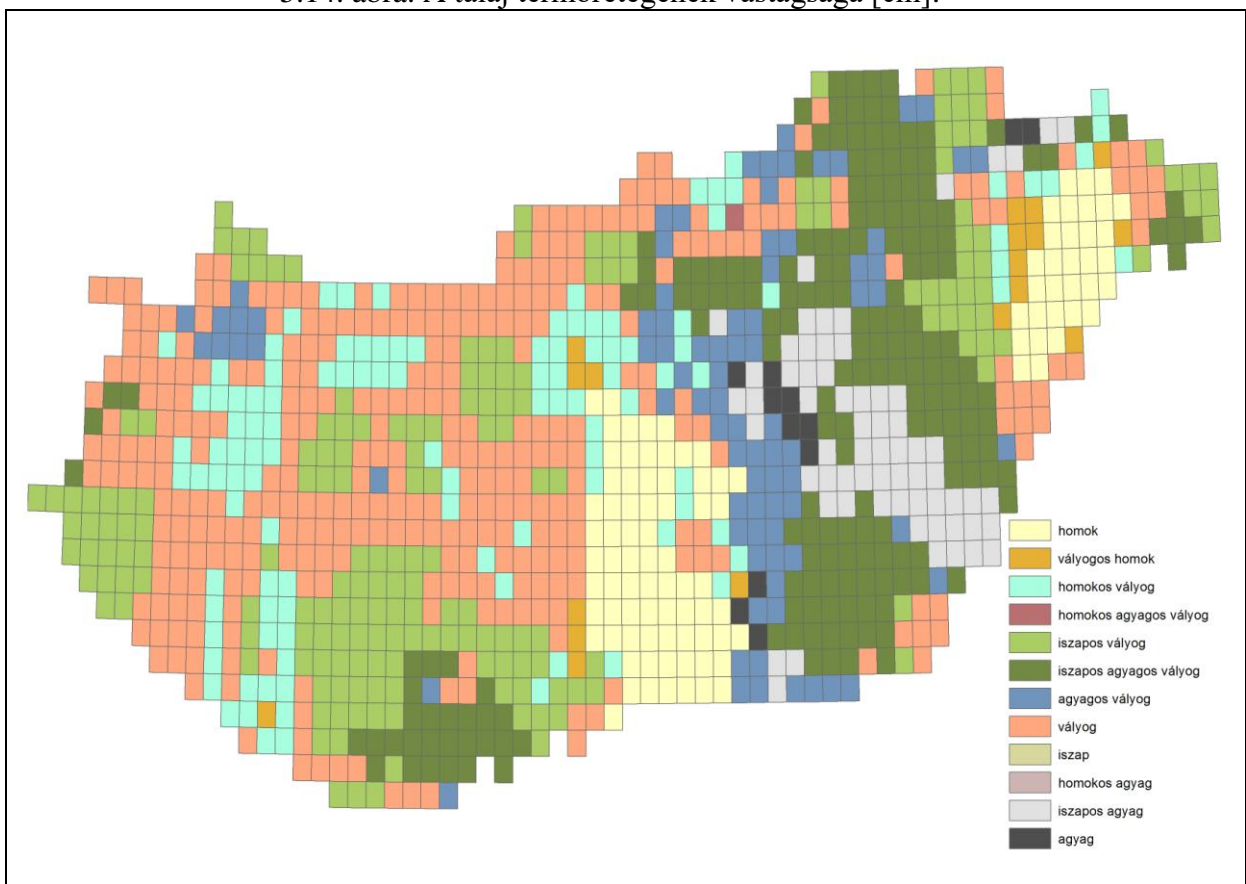
- 12 kategóriás USDA talajtextúra, külön a feltalajra (0-30 cm) és az altalajra (> 30 cm) vonatkozóan;
- humusztartalma hat kategóriára bontva (< 1%,; 1-1,5%; 1,5-2%; 2-3%; 3-5%; > 5%) külön a feltalajra (0-30 cm) és az altalajra (> 30 cm) vonatkozóan;
- termőréteg vastagsága három kategóriára bontva (< 50 cm; 50-100 cm; > 100 cm).

A talaj téradatak előállítása azonban, mint bemutattuk, ennél sokkal többre képes. A talajtakaró a modellben tematikailag sokkal részletesebben és mélységi reprezentációjában is jóval finomabban megjeleníthető, hiszen az eredmények térbeli kiterjesztéséhez szükséges térbeli talajinformációk akár nagy térbeli felbontással is előállíthatók. Ez utóbbi során a legfőbb kényszerfeltétel a meteorológiai adatok térbeli felbontása. Első verzióban a tematikus talajtani adatréteget a CarpatClim rács felbontásában, illetve magának a rácsnak az objektumaira vonatkoztatva állítottuk elő. Tervezzük azonban olyan eljárások kidolgozását, amelyek a későbbiek folyamán a származtatott eredmények térbeli felbontásának növelését a meteorológia adatok jelen felbontása mellett is lehetővé teszik.

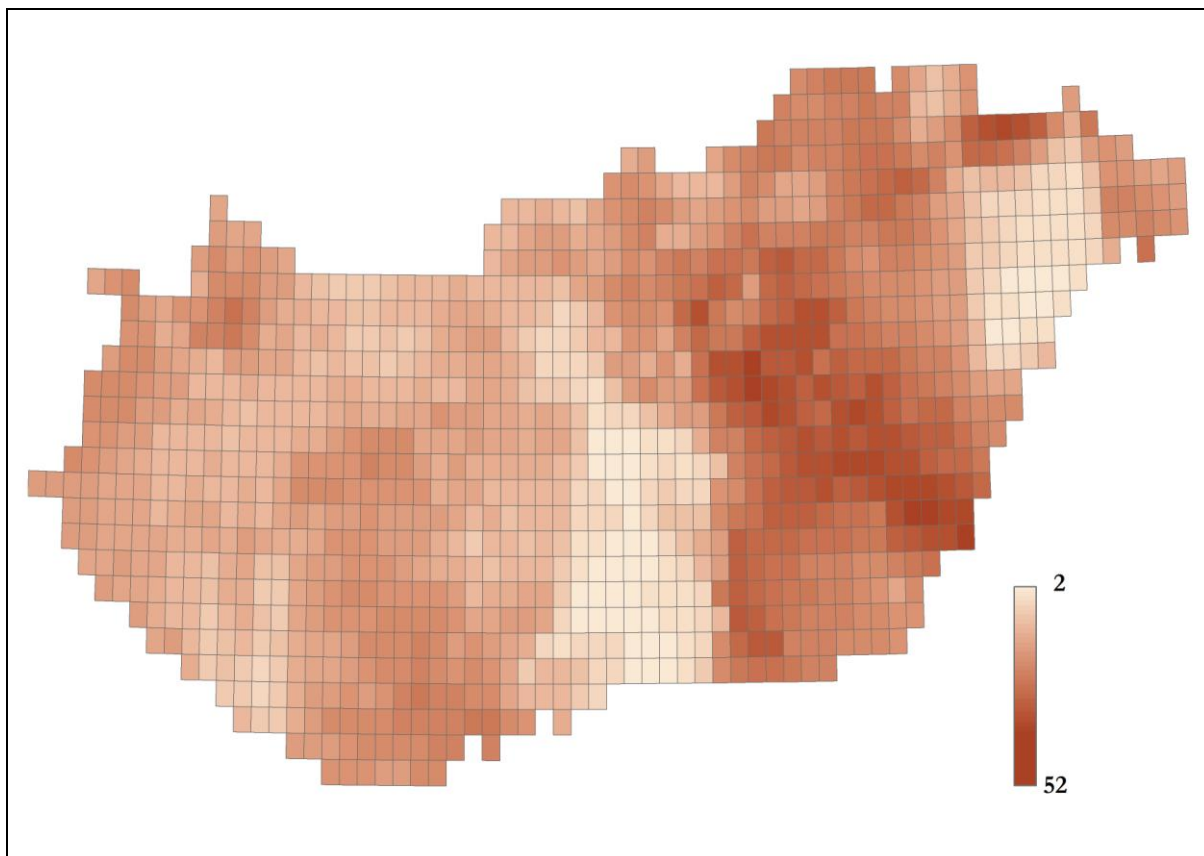
Az alábbiakban textúra térkép mellett bemutatjuk az egyes rétegekre készült, natív, numerikus frakció térképeket, amelyek együttesen sokkal pontosabban képezik le a talajok (hidro)fizikai tulajdonságait (5.14.-5.22. ábra). A feltalaj (0-30 cm; láptalajok esetén 0-100 cm) szervesanyag készletének példáján bemutatjuk a különböző digitális talajtérképezési eljárások által szolgáltatott eredmények hasonlóságait és különbözőségeit, melyek bizonytalansági vizsgálatait jelenleg is folyamatban vannak.



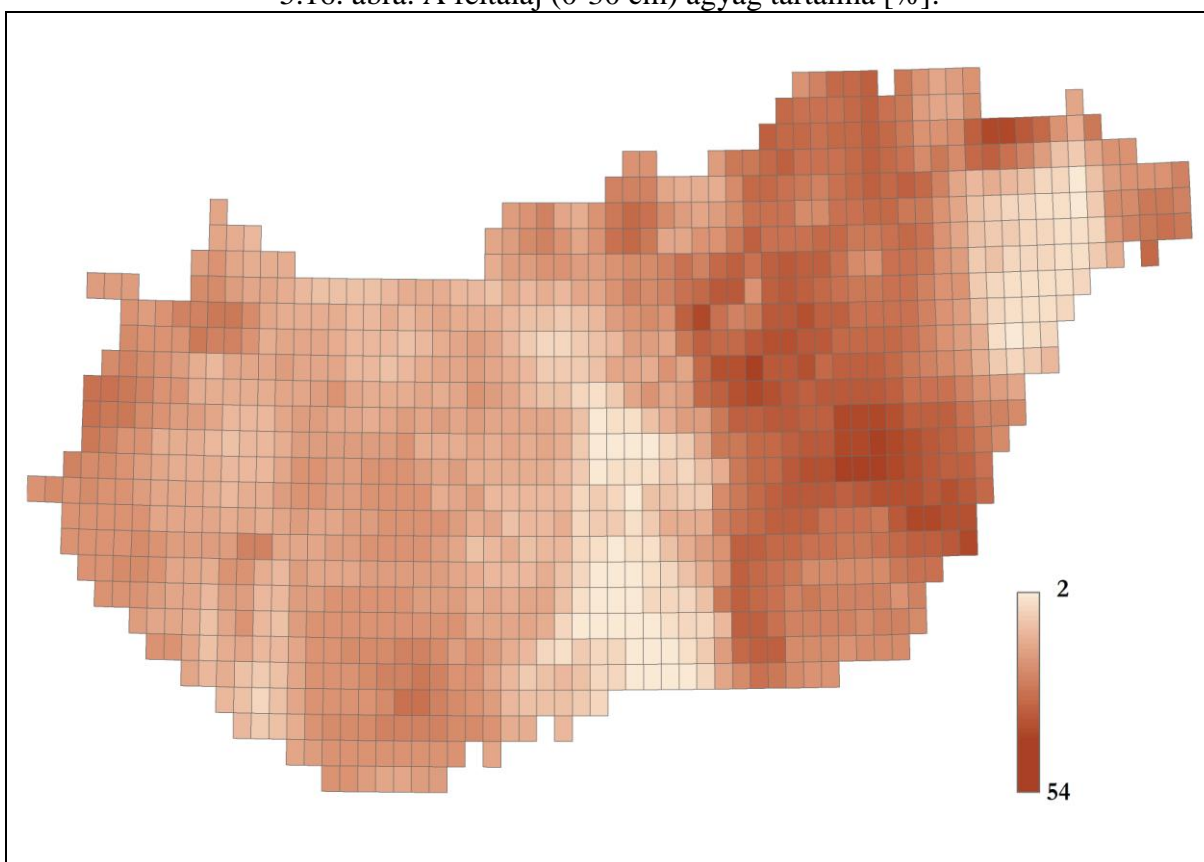
5.14. ábra. A talaj termőrétégének vastagsága [cm].



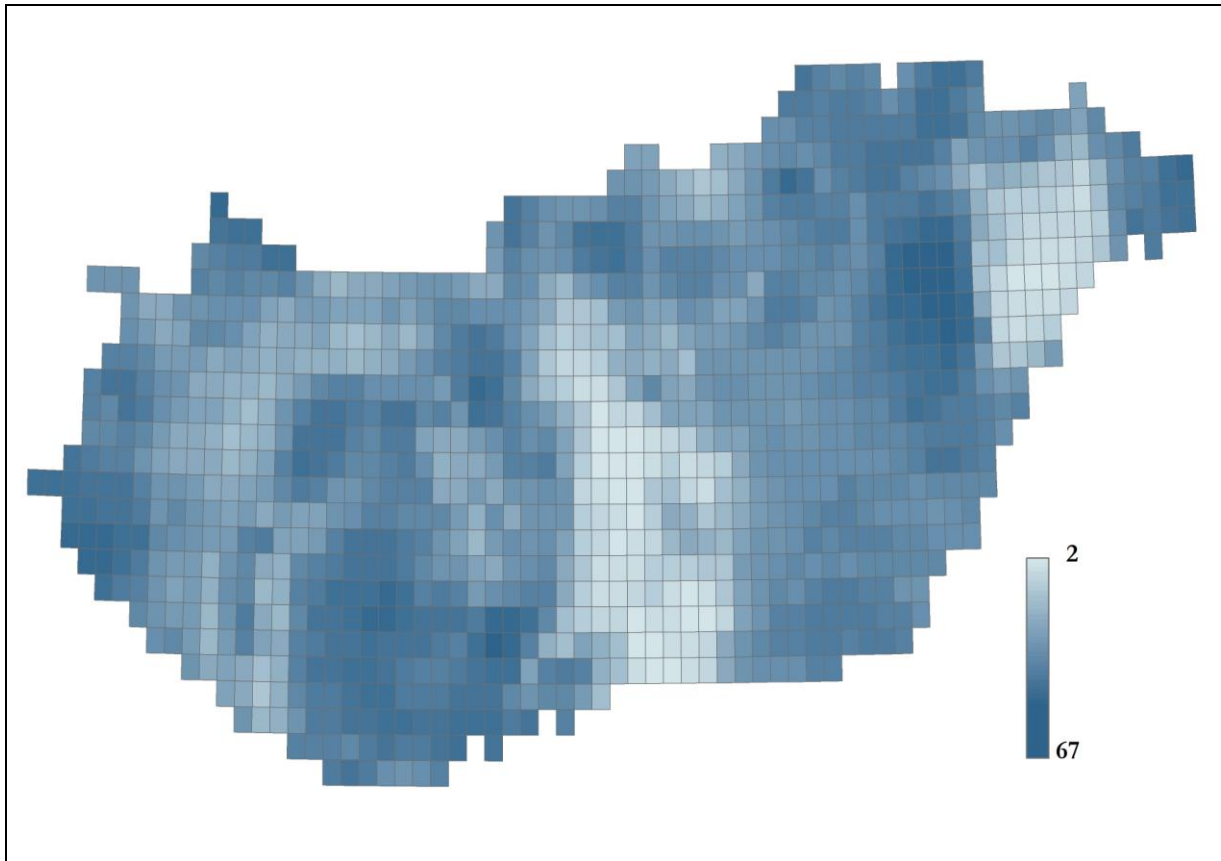
5.15. ábra. A feltalaj (0-30 cm) fizikai félesége az USDA osztályozás szerint.



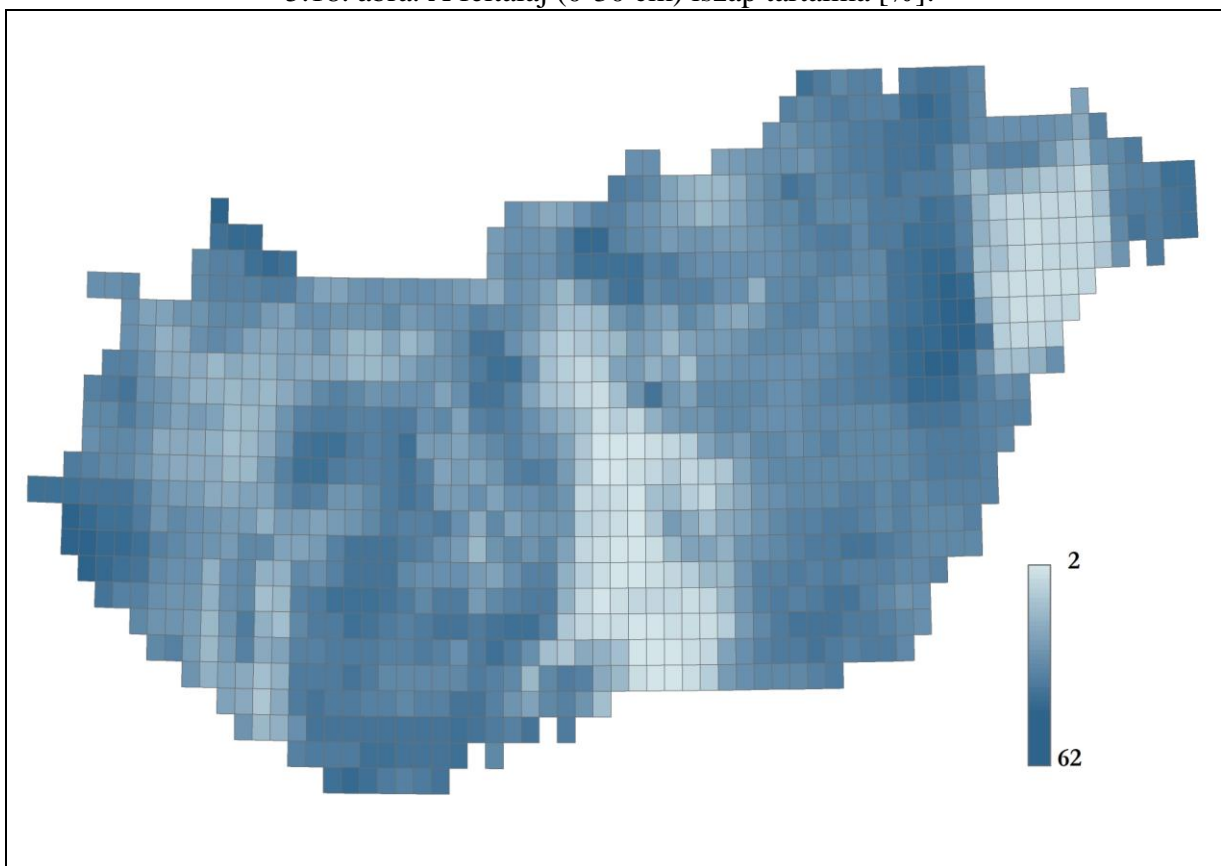
5.16. ábra. A feltalaj (0-30 cm) agyag tartalma [%].



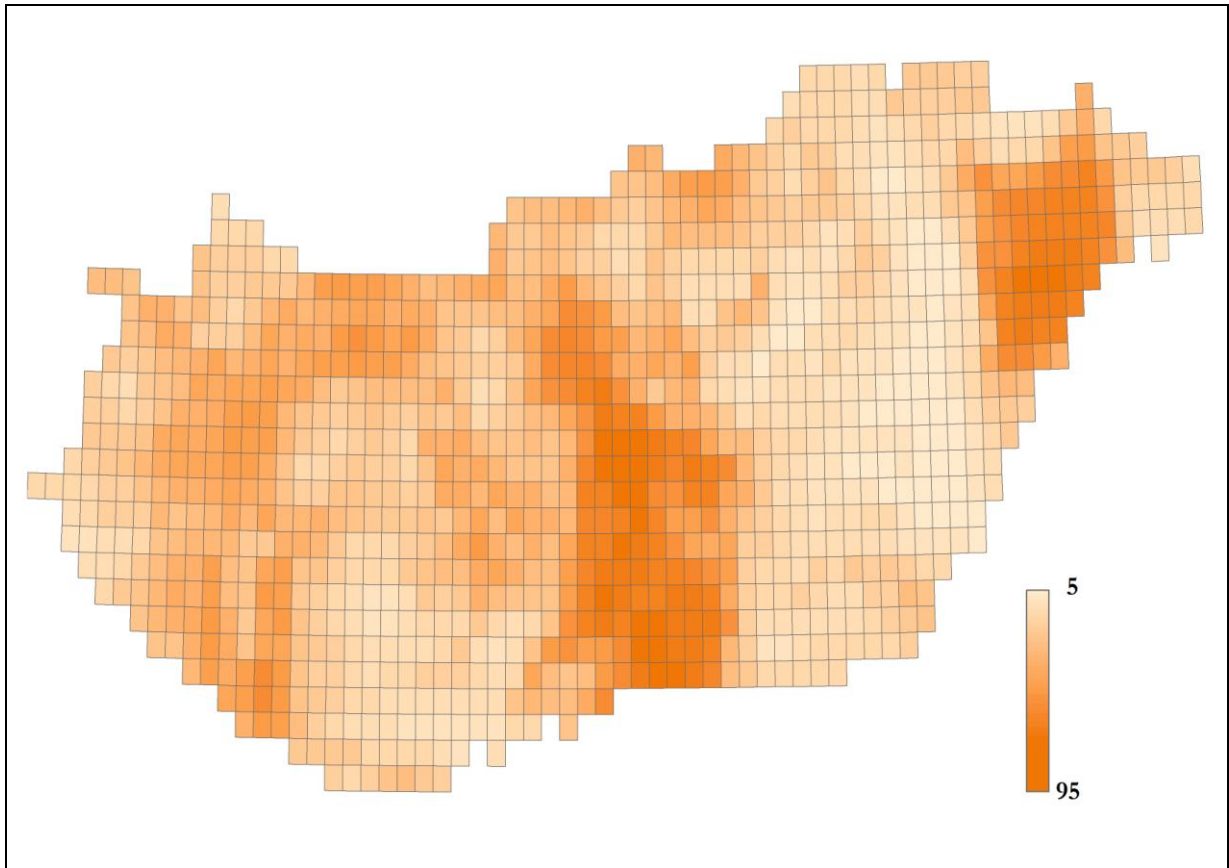
5.17. ábra. Az „altalaj” (30-60 cm) agyag tartalma [%].



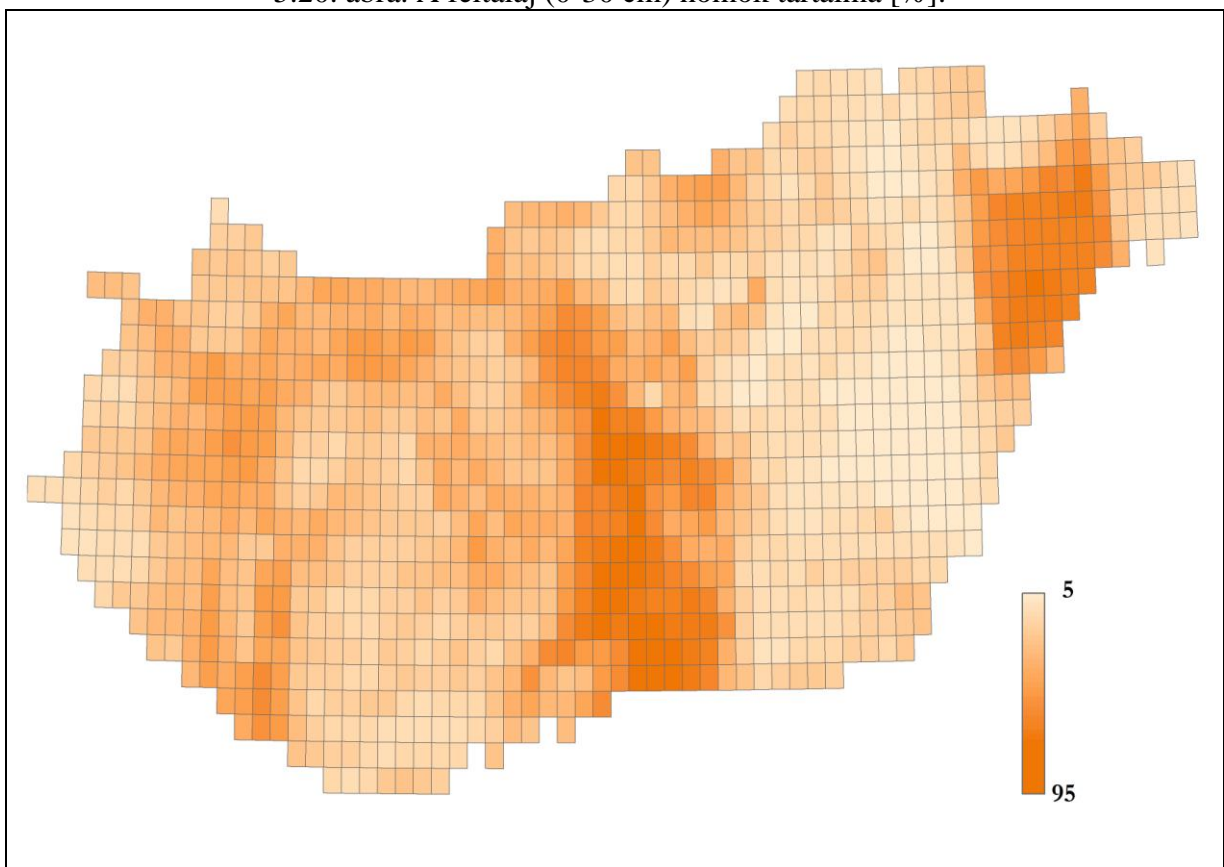
5.18. ábra. A feltalaj (0-30 cm) iszap tartalma [%].



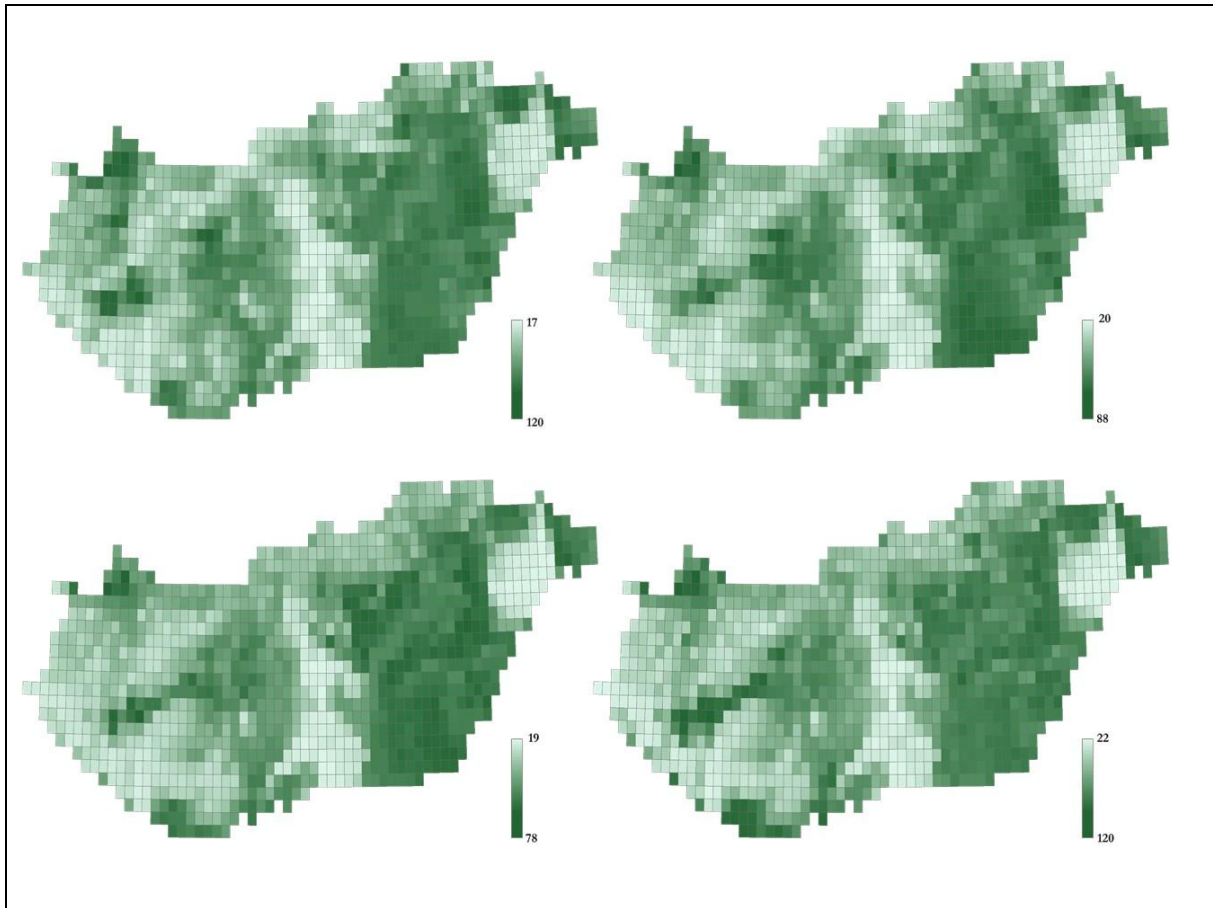
5.19. ábra. Az „altalaj” (30-60 cm) iszap tartalma [%].



5.20. ábra. A feltalaj (0-30 cm) homok tartalma [%].



5.21. ábra. Az „altalaj” (30-60 cm) homok tartalma [%].



5.22. ábra. A feltalaj (0-30 cm; láptalajok esetén 0-100 cm) szervesanyag készlete négy különböző modell szerinti térbeli becslés alapján [t/ha].

6. Agrárközgazdasági vonatkozások

A bevezetőben már említett, az agrárium egészét érintő globális klimatikus kihívások nagy hatással vannak a jövő élelmiszerbiztonságára. Habár Magyarország elhelyezkedése miatt nem a legveszélyeztetettebb országok egyike, mégis szükségszerű vizsgálni, hogy a különböző klímaadaptációs forgatókönyvek milyen mikro- és makrogazdasági hatással bírnak. Célunk a magyar agrár-erőforráskészlet gazdaság-orientált modellezése, mellyel jól körülhatárolt becslést adhatunk a piaczgazdasági modellt követő állam döntéshozói számára. Egyfelől ajánlásokat kívánunk megfogalmazni a kormányzat számára, hogy a környezeti változások hatására milyen ösztönzőkkel tehetik érdekeltté a gazdákat a folyamatos és növekvő arányú beruházásokra (pl. öntözés-támogatási rendszerek, klíma adaptációs anomáliák kiküszöbölésének szubvenciója, stb.) annak érdekében, hogy a maximális profit előállítására legyenek képesek. Másfelől vizsgáljuk a gazdák jelenlegi hajlandóságát, ösztönözhetőségét és képességét ezen folyamatok végrehajtásának lehetséges elfogadásáról és végrehajtásáról (ARMS⁵). A Nemzeti Vidékstratégia (2012-2020) átfogó célkitűzése a „*vidéki térségek népességeltartó és népességmegtartó képességének javítása*” végső soron úgy érhető el, ha a magyar agrárium illetve az élelmiszer-feldolgozó ipar versenyképességét jelentős mértékben sikerül növelni.

Alapmodellünk, az **AgroMo** segítségével (ami a Biome-BGCMuSo modellre épül) - a szimulációk során keletkezett eredmények felhasználásával - képesek vagyunk „megsejteni” hosszútávon a magyar mezőgazdaság termelékenységének alakulását (hozamok, előállított biomassza, stb.) a klímaváltozás tükrében. Ez a modell a biofizikális és környezeti változások függvényében rögzíti a különböző szántóföldi növények feltételezett hozamait. Ezen termelési eredményeket használjuk fel a **HAREM modellben** (Hungarian Agricultural Resource Economic Model⁶), amely a közép- és hosszú távú gazdasági összefüggéseket vizsgálja. A projekt gazdasági szekciójának érdeklődése középpontjában a modellezett farm-menedzsment döntések hatásfolyamatai (trajectories) állnak és keresi a stratégiai választ arra a kérdésre, hogy mikor, hol, és milyen változtatást (tőkebefektetést, struktúra-váltást) kell alkalmazni annak érdekében, hogy a klimatikus kihívásokkal szemben hatékony és kifizetődő válaszokat adjanak a gazdák.

Kétszintű agrárgazdasági elemzési rendszer

Mikro-gazdasági szinten a magyar agráriumot alkotó egyének és társas vállalkozások viselkedésének, a rendelkezésükre álló erőforrások optimális felhasználását tanulmányozzuk. Az Agrárgazdasági Kutatóintézet (AKI) által gyűjtött, EU-s gondozásban álló Farm Accountancy Data Network (FADN) adatbázisainak felhasználásával a jelenlegi termelékenység (productivity), hatékonysági (efficiency) és méretgazdaságossági (economies of scale) mutatók számításával viszonyszámokat képzünk (benchmarking) annak érdekében, hogy explicit módon értékelhessük a jövőbeli klímaadaptációs farm-menedzsment gazdasági hatásait. A klímaváltozás negatív hatásait csökkentő forgatókönyveket megvalósíthatósági kritériumrendszer alapján dolgozzuk ki, melyekben a fenntarthatósági szempontokra – tájaink természeti értékeinek, erőforrásainak megőrzésére – külön hangsúlyt fektetünk. Könnyen

⁵ ARMS – Agricultural Resource Management Survey: A FADN-típusú adatbázis mellett, tervezzük, hogy amerikai mintára (ARMS) létrehozunk egy pár pontból álló kérdőívet a klímaváltozás tárgykörében. Kíváncsiak vagyunk, vajon a magyar gazdák érzik-e a klímaváltozás pozitív/negatív hatását. Proaktívak és készülnék valamilyen adaptációs változtatásra, portfolio-diverzifikációra? Miben lenne szükségük segítségre, milyen anyagi erőforrással rendelkeznek? Hajlandóak-e áttérni például a szántóföldi növénytermesztésről intenzívebb, magasabb hozzáadott értéket képviselő mezőgazdasági termelésre (pl. vetőmag előállítás, zöldség-gyümölcs termelés)?

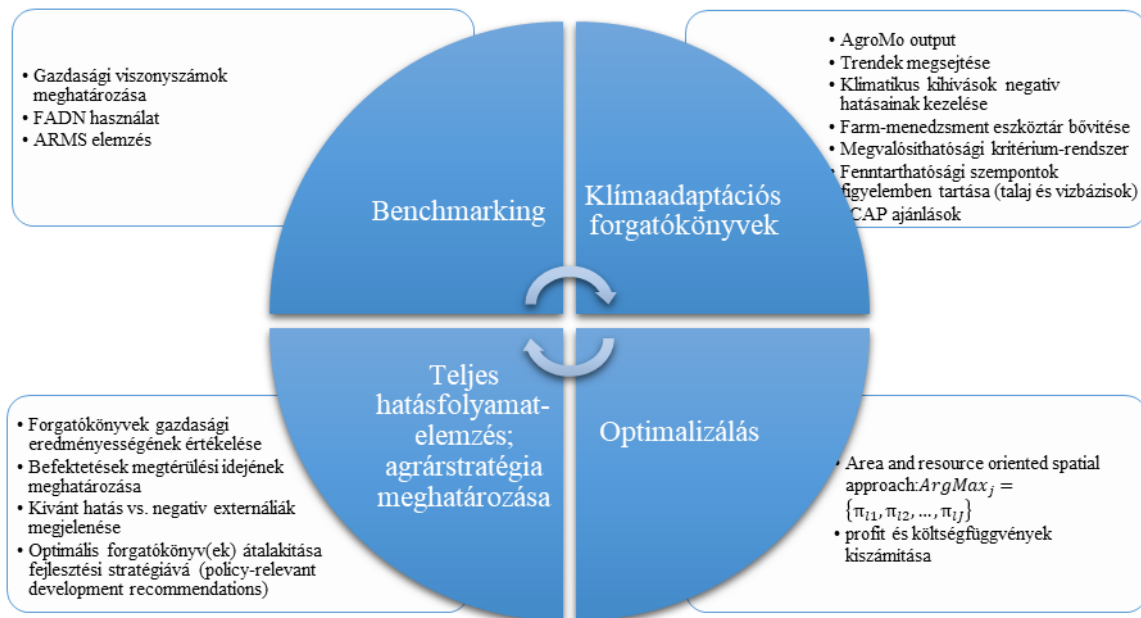
⁶ Magyar agrár-erőforrás gazdasági modell

belátható, hogy nagy a bizonytalanság a majdani működési környezettel kapcsolatban, hiszen a jövőbeli input-output árakat, agrártámogatási rendszert, illetve a világgazdasági helyzetet nem ismerjük. Éppen ezért döntő jelentőségű az életszerű környezeti feltételek tervezése, modellezése, melyeket historikus adatfelhasználással mozgóátlagú trendszámítási formával fogunk meghatározni.

A HAREM következő fázisa az optimalizálás. A klímaadaptációs forgatókönyvek szerint az AgroMo modell input értékeit megváltoztatjuk és újraszámoljuk a várható termelési hozamokat. Ezzel feltételezzük, hogy az ajánlott fejlesztések és strukturális változások a jövőben megvalósításra kerülnek. Mivel az AgroMo számítási egysége területalapú (10x10 km cellák), ezért mi is erre a bázisra számítjuk a profit és költségfüggvényeket (melyeket maximalizálunk és minimalizálunk). Így területi bontásban megtaláljuk azokat a farm-menedzsment eszközöket, melyek a gazdaságilag optimális agrár-termelést párosítják a klimatikus viszonyok változásához. A jövőbeli benchmark számokat pedig 2020-tól minden 10-dik évre kiszámítjuk, így megkapjuk az agrár-konvergencia hatására bekövetkező termelékenység- és hatékonyság növekedési eltéréseket (productivity and efficiency gap).

A modell utolsó szakaszában kiértékeljük a forgatókönyvek gazdasági eredményességét jövedelmezőségi és hatásossági szempontok alapján. Pontosítjuk a 2020-2100 közötti időszak befektetési ütemezését. Megbecsüljük a tőkeinvestíciók (governmental- and private capital investment) megtérülési idejét, valamint stratégiát fogalmazunk meg az optimális forgatókönyvek alapján a *mikor, mit, hol kell támogatni* annak érdekében, hogy a kitűzött célok valóban megvalósuljanak. Végül a modell outputjaként létrejövő eredményeket egy másik ún. Fehér Könyvben (White Book) összesítjük, amiben konkrét fejlesztési ajánlásokat fogalmazunk meg a döntéshozók számára (“policy-relevant development recommendations”).

A 6.1. ábrával illusztráljuk a HAREM modell formai felépítését és logikáját.



6.1. ábra. HAREM mikrogazdasági szint.

Átfogó makro-gazdasági szintű elemzésre nem vállalkozunk, mert az előre nem látható gazdasági és geopolitikai események még nagyobb bizonytalansággal bírnak itt, mint mikro-szinten. Ugyanakkor néhány fontos kérdésben igyekszünk becslést adni, hogy a fentebb említett farm-menedzsment változtatásoknak milyen nemzetgazdasági hatásai

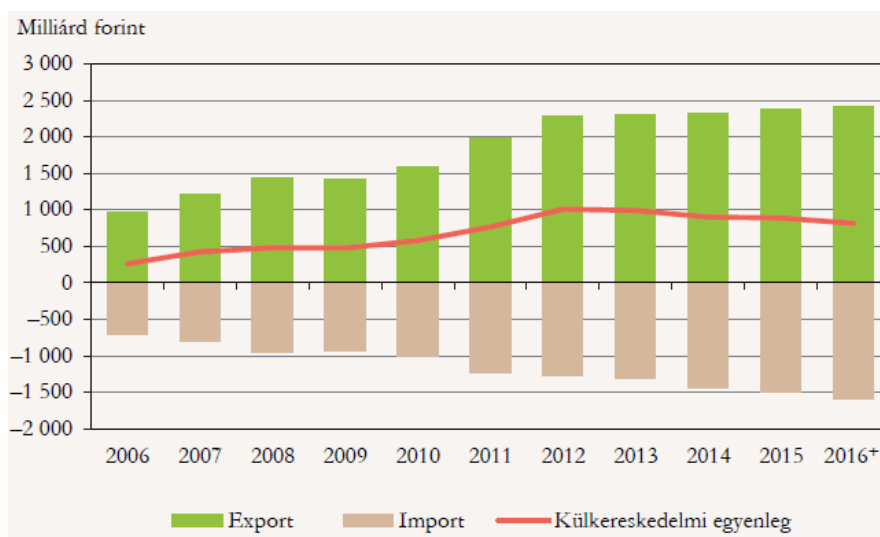
lehetnek. Mivel a klímaadaptációs forgatókönyvekben – modellezett jövőbeli tényezőellátottság mellett – magasabb hozzáadott értékű javak előállításának növelését célozzuk, kézenfekvő, hogy az agrárium potenciális kibocsátási szintjét is meghatározzuk.

A következőkben kiemelünk pár fontos adatot, összefüggést, melyek végiggondolása, vizsgálata szükségszerű lesz a projekt eredményeinek értékeléseként végzett összehasonlító elemzésben:

- 2016-ban az Európai Unió mezőgazdasági kibocsátásának értéke 401 milliárd euró volt, ami 3,2%-kal maradt el az egy évvel korábbi szinttől. A növénytermesztés és az állattenyésztés kibocsátása sem változott jelentősen, előbbi 1,8%-kal csökkent, utóbbi 1,4%-kal nőtt.
- Magyarország az Európai Unió mezőgazdasági kibocsátásának 2,1%-át állította elő, 0,2 százalékponttal növelte a részesedését 2015-höz képest.
- Előzetes adatok szerint a mezőgazdaság a bruttó hazai termék (GDP) termeléséhez 3,8%-os aránnyal járult hozzá 2016-ban. A hazai bruttó hozzáadott értékből 4,5%-ot adott az agrárium, a beruházásokban 5,5, a foglalkoztatásban 5,0% volt az aránya (KSH, 2017).

Magyarország alapvető célja, hogy az EU mezőgazdasági kibocsátásán belül növelje részesedését. A magyar népesség az Európai Unió 2%-át teszi ki, következésképpen, csupán népességarányosan járulunk hozzá a mezőgazdasági javak megtermeléséhez, ami középszerűsége utal. Nyersanyagokban, például, gabonafélék és ipari növények előállításában elérjük az 5,2, illetve 6,4%-ot, de a magasabb kultúrájú, nagyobb ráfordítás igényű zöldség-gyümölcs termelésben ugyanez az arány mindössze 1,4 és 1,5%.

A jó hír az, hogy a mezőgazdasági eredetű áruk külkereskedelme az elmúlt tíz évben két és félszeresére nőtt, valamint a külkereskedelmi egyenleg mindvégig pozitív volt. 2006 és 2012 között az exporttöbblet jelentősen növekedett, azonban 2012 óta stagnál vagy enyhén csökken (6.2. ábra).



6.2. ábra. Magyar mezőgazdaság külkereskedelmi egyenlege (2006-2016).

A magyar mezőgazdasági főbb számait, például a bruttó kibocsátás volumenének változását, a munkaerő-felhasználás, vagy az agrárbefektetések alakulását az ajánlott

foratókönyvek feltételezett megvalósulásával párhuzamosan tudjuk megbecsülni. Kutatási döntés lesz, hogy ezeket az adatokat milyen időciklusokra számoljuk ki.

A makro-szintű megközelítés rögzíti a jövő generációi számára, hogy a századelőn hogyan gondolták megreformálni a magyar mezőgazdaságot annak érdekében, hogy minél hatékonyabb, jövedelmezőbb és fenntartható legyen. Számunkra is segítség Darányi Ignác egykori agrárminiszter 1905-ös munkája, a „The State and Agriculture in Hungary” melyben részletezi az azonnali technológiai fejlesztés szükségességét és egyfajta szemléletmód váltást szorgalmaz a döntéshozóknál és a farmereknél egyaránt.

Irodalomjegyzék

Árendás, T., 1995. Őszi búza tápláltsági állapotának értékelése különböző trágyázási rendszerekben. *Agrokémia és Talajtan* 44, 18-30.

Árendás, T., Berzsenyi, Z., Bónis, P., Sugár, E., Bedő, Z., Marton, L.Cs., Fodor, N., 2016. Tartamkísérletek Martonvásáron: az agroökoszisztéma szabadföldi laboratóriumai. In: Felmelegedés, ökolábnyom, élelmiszerbiztonság (Szerk.: Nagy, Z.B.), p 21-29, LVIII. Georgikon Napok, Keszthely, 2016. szeptember 29-30.

Árendás, T., 2017. A tápanyag-gazdálkodás, növénytáplálás tervezése. A trágyázás gyakorlata. In: Földművelés és földhasználat (Szerk.: Birkás, M.), p 242-253, Mezőgazda Kiadó, Budapest.

Barcza, Z., Haszpra, L., Kondo, H., Saigusa, N., Yamamoto, S., Bartholy, J., 2003. Carbon exchange of grass in Hungary. *Tellus B* 55, 187-196.

Barcza, Z., Bondeau, A., Churkina, G., Ciais, Ph., Czóbel, Sz., Gelybó, Gy., Grosz, B., Haszpra, L., Hidy, D., Horváth, L., Machon, A., Pásztor, L., Somogyi, Z., Van Oost, K., 2011. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases. Part III, Chapter 13: Model Based Biospheric Greenhouse Gas Balance of Hungary. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.), p 295-330, Dordrecht; London; New York: Springer-Science. ISBN:978-90-481-9949-5.

Bartoń, K., 2015. MuMIn: Multi-model inference. R package version 1.10.0 Letöltve: 2017. március 11. <http://cran.r-project.org/package=MuMIn>.

Bond-Lamberty, B., Gower, S.T., Ahl, D.E., Thornton, P.E., 2005. Reimplementation of the Biome-BGC model to simulate successional change. *Tree Physiology* 25, 413-424.

Bradford, M.M., 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry* 72, 248-254.

Carslaw, K.S., Lee L.A., Reddington, C.L., Pringle, K.J., Rap, A., Forster, P.M., Mann, G.W., Spracklen, D.V., Woodhouse, M.T., Regayre, L.A., Pierce, J.R., 2013. Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing. *Nature* 503(7474), 67.

Churkina, G., Tenhunen, J., Thornton, P., Falge, E.M., Elbers, J.A., Erhard, M., Grünwald, T., Kowalski, A.S., Rannik, Ü., Sprinz, D., 2003. Analyzing the ecosystem carbon dynamics of four European coniferous forests using a biogeochemistry model. *Ecosystems* 6, 168-184.

Csathó, P., Lásztity, B., Sarkadi, J., 1991. Az "évjárat" hatása a kukorica termésére és terméselemeire P-műtrágyázási tartamkísérletben. *Növénytermelés* 40, 339-351.

Darányi, I., 1905. *The State and Agriculture in Hungary*. Macmillen and Co., Limited, London, Egyesült Királyság.

- Davidson, E.A., Janssens, I.A., 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173.
- Davis, N., Bowden, J., Semazzi, F., Xie, L., Öno, B., 2009. Customization of RegCM3 regional climate model for eastern Africa and a tropical Indian Ocean domain. *Journal of Climate* 22, 3595–3616.
- Decagon 2010. Mini Disk Infiltrometer User's Manual. Decagon Devices, Inc., Pullman.
- Dekker, L.W., Ritsema, C.J., 1996. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89-105.
- Dekker, L.W., Oostindie, K., Ziogas, A.K., Ritsema, C.J., 2001. The impact of water repellency on soil moisture variability and preferential flow. *International Turfgrass Society Research Journal* 9, 498-505.
- Dekker, L.W., Oostindie, K., Ritsema, C.J., 2005. Exponential increases of publications related to soil water repellency. *Australian Journal of Soil Research* 43, 403-441.
- Doerr, S.H., 1998. On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 663-668.
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51, 33–65.
- Doerr, S.H., Thomas, A.D., 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* 231-232, 134-147.
- Elguindi, N., Bi, X., Giorgi, F., Nagarajan, B., Pal, J., Solmon, F., Rauscher, S., Zaakey, A., Giuliani, G., 2011. Regional climatic model RegCM user manual version 4.3, 32. ITCP, Trieste, Italy.
- Emanuel, K.A., 1991. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences* 48, 2313–2335.
- Emanuel, K.A., Zivkovic-Rothman, M., 1999. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *Journal of the Atmospheric Sciences* 56, 1766–1782.
- Ewert, F., Rötter, R.P., Bindi, B., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, S., Semenov, M.A., Wallach, D., Porter, J.R., Stewart, D., Verhagen, J., Gaiser, T., Palosuo T., Tao, F., Asseng, S., 2015. Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environmental Modelling & Software* 72, 287-303. doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003
- Fodor, N., Pásztor, L., Németh, T., 2014. Coupling the 4M crop model with national geo-databases for assessing the effects of climate change on agro-ecological characteristics of Hungary. *International Journal of Digital Earth* 7, 391-410.

Fritsch, J.M., Chappell, C.F., 1980. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences* 37, 722–1733.

Füzy, A., Biró, I., Kovács, R., Takács, T., 2015. Estimation of AM fungal colonization-comparability and reliability of classical methods. *Acta Microbiologica et Immunologica Hungarica*. 62(4), 435-452.

Grell, G.A., 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review* 121, 764–787.

Hallett, P.D., Baumgartl, T., Young, I.M., 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society of American Journal* 65, 184-190.

Haszpra, L., 2011. *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective*. Springer Dordrecht Heidelberg, London, New York, ISBN 978-90-481-9949-5.

Hidy, D., Machon, A., Haszpra, L., Nagy, Z., Pintér, K., Churkina, G., Grosz, B., Horváth, L., Barcza, Z. 2011. Modeling of biosphere–atmosphere exchange of greenhouse gases – Grasslands. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Szerk.: Haszpra, L.), p 393, Dordrecht; London; New York: Springer-Science. pp. 229-251, ISBN:978-90-481-9949-5.

Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Pintér, K., Nagy, Z. 2012. Development of the Biome-BGC model for simulation of managed herbaceous ecosystems. *Ecological Modeling* 22, 99-119.

Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M.Z., Dobor, L., Gelybó, Gy., Fodor, N., Pintér, K., Churkina, G., Running, S., Thornton, P., Bellocchi, G., Haszpra, L., Horváth, F., Suyker, A., Nagy, Z., 2016. Terrestrial Ecosystem Process Model Biome-BGCMuSo: Summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development* 9, 4405-4437.

Hunter, A.E., Chau, H.W., Si, B.C. 2011. Impact of tension infiltrometer disc size on measured soil water repellency index. *Canadian Journal of Soil Sciences* 91, 77-81.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.), 1535p, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems* 155, 240–254. doi:10.1016/j.agsy.2016.05.014.

Kimball, J.S., White, M.A., Running, S.W., 1997. BIOME-BGC simulations of stand hydrologic processes for BOREAS. *Journal of Geophysical Research* 102, 29043-29051.

Kis, A., Pongrácz, R., Bartholy, J., 2017. Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian Region. *International Journal of Climatology* 37, 4543-4560.

Korol, R.L., Milner, K.S., Running, S.W., 1996. Testing a mechanistic model for predicting stand and tree growth, *Forest Science* 42, 139–153.

KSH, 2017. A mezőgazdaság szerepe a nemzetgazdaságban, 2016. Letöltve: 2017. október 11. <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/mezo/mezoszerepe16.pdf> Központi Statisztikai Hivatal, Budapest, Magyarország.

Kulmala, M. Kontkanen, J., Junninen, H., Lehtipalo, K., Manninen, H. E., Nieminen, T., Petäjä, T., Sipilä, M., Schobesberger, S., Rantala, P., Franchin, A., Jokinen, T., Järvinen, E., Äijälä, M., Kangasluoma, J., Hakala, J., Aalto, P.P., Paasonen, P., Mikkilä, J., Vanhanen, J., Aalto, J., Hakola, H., Makkonen, U., Ruuskanen, T., Mauldin III, R.L., Duplissy, J., Vehkamäki, H., Bäck, J., Kortelainen, A., Riipinen, I., Kurtén, T., Johnston, M.V., Smith, J.N., Ehn, M., Mentel, T.F., Lehtinen, K.E.J., Laaksonen, A., Kerminen, V.M., Worsnop, D.R., 2013. Direct observations of atmospheric aerosol nucleation. *Science* 339(6122), 943-946.

Lichner, L., Holko, L., Zhokova, N., Schacht, K., Rajkai, K., Fodor, N., Sándor, R., 2012. Plants and biological soil crust influence the hydrophysical parameters and water flow in an aeolian sandy soil. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 60, 309-318.

Lichner, L., Hallett, P.D., Drongová, Z., Czachor, H., Kovacik, L., Mataix-Solera, J., Homolák, M., 2013. Algae influence hydrophysical parameters of a sandy soil. *Catena* 108, 58–68.

Lovász, L., 2016. „Nem riadtunk vissza a vitáktól” – Lovász László elnöki beszámolója. 2016. május 2. Letöltve: 2017. szeptember 23. <http://mta.hu/kozgyules2016/lovasz-laszlo-elnoki-beszamolo-2016-106425>.

Merikanto, J., Spracklen, D.V., Mann, G.W., Pickering, S.J., Carslaw, K.S., 2009. Impact of nucleation on global CCN. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 8601-8616.

Micskei, Gy., Fodor, N., Marton, L.Cs., Bónis, P., Árendás, T., 2016. Using long-term field experiment data to prepare a crop simulation model for climate impact studies. *Applied Ecology and Environmental Sciences* 14, 263-280.

Moncrieff, J.B., Massheder, J.M., de Bruin, H., Elbers, J., Friborg, T., Heusinkveld, B., Kabat, P., Scott, S., Soegaard, H. Verhoef, A., 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, 188–189, 589–611. doi:10.1016/S0022-1694(96)03194- 0.

Moncrieff, J.B., Clement, R., Finnigan, J., Meyers, T., 2004. Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series, In: *Handbook of Micrometeorology : A Guide for Surface Flux Measurements and Analysis* (Eds.: Lee, X., Massman, W.J., Law, B.), pp. 7–31, Kluwer Academic Publishers.

NIIGATA, 2016. G7 Niigata Agriculture Ministers' Meeting Declaration: Open Up a Road to a New Era with the World. Niigata, Japan.

Orfánus, T., Dlapa, P., Fodor, N., Rajkai, K., Sándor, R., Nováková, K., 2014. How severe and subcritical water repellency determines the seasonal infiltration in natural and cultivated sandy soils. *Soil & Tillage Research* 135, 49-59.

Papale, D., Reichstein, M., Aubinet, M., Canfora, E., Bernhofer, C., Kutsch, W., Longdoz, B., Rambal, S., Valentini, R., Vesala, T. and Yakir, D., 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation, *Biogeosciences* 3, 571–583.

Pieczka, I., Pongrácz, R., Szabóné A.K., Kelemen, F.D., Bartholy, J., 2017. Sensitivity Analysis of Different Parameterization Schemes Using RegCM4.3 for the Carpathian Region. *Theoretical and Applied Climatology* 130, 1175–1188.

Pinheiro, J. D., Bates, S., DebRoy, D., Sarkar, D., R Core Team, 2012. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-103.

Pongrácz, R., Bartholy, J., Pieczka, I., Szabóné A.K., 2015. Regionális klímamodellezés a Kárpát-medencére – érzékenységvizsgálatok különböző csapadéksémák alkalmazásával. In: Aktuális kutatások az ELTE Meteorológiai Tanszékén. Jubileumi kötet - 70 éves az ELTE Meteorológiai Tanszéke (Szerk.: Pongrácz, R., Mészáros, R., Kis, A.) Egyetemi Meteorológiai Füzetek 26, 76-81.

Reichstein, M. Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., Meyers, T., Miglietta, F., Ourcival, J.-M., Pumpanen, J., Rambal, S., Rotenberg, E., Sanz, M., Tenhunen, J., Seufert, G., Vaccari, F., Vesala, T., Yakir, D. Valentini, R., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm, *Global Change Biology* 11, 1424-1439. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x.

Ritsema, C.J., Dekker, L.W., 2003. Soil water repellency: occurrence, consequences and Amelioration. Elsevier Science. p. 358.

Rodríguez-Alleres, M., Benito, E., 2011. Spatial and temporal variability of surface water repellency in sandy loam soils of NE Spain under *Pinus pinaster* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Hydrological Processes* 25, 3649-3658.

Running, S.W., Nemani, R.R., Hungerford, R.D., 1987. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evaporation and photosynthesis. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 472-483.

Running, S.W., Coughlan, J.C., 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling* 42, 125-154.

Running, S.W., Gower, S.T., 1991. A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology* 9, 147-160.

Running, S.W., Hunt, E.R.J., 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. In: *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe* (Eds.: Ehleringer, J.R., Field, C.B.), San Diego, Academic Press.

Sándor, R., 2014. A talaj-növény-légkör rendszer modellezésének léptékfüggő problémái. Doktori értekezés. Szeged.

Sándor, R., 2015. Homoktalajok hidraulikus tulajdonságainak vizsgálata a talajnedvesíthetőségi kategóriák függvényében. Így kutattunk mi! Tudományos cikkgyűjtemény I. TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001. Szerk.: Nemzeti Kiválóság a Konvergencia Régióban Program, 52-53.

Sándor, R., Lichner, L., Filep, T., Balog K., Lehoczky É., Fodor, N., 2015a. Spatial variability of hydrophysical properties of fallow sandy soils. *Biologia* 70, 1468–1473.

Sándor, R., Fodor, N., Sümegei, P., 2015b. A talaj-növény-légkör rendszer modellezésének léptékfüggő problémái. *Geoszférák 2014. GeoLitura Kiadó.* (Unger J., Pál-Molnár. E., szerk), Szeged. pp. 133-154.

Schmid, S., Zierl, B., Bugmann, H., 2006. Analyzing the carbon dynamics of central European forests: comparison of Biome-BGC simulations with measurements. *Regional Environmental Change* 6, 167–180.

Somogyi, Z., Hidy, D., Gelybó, Gy., Barcza, Z., Churkina, G., Haszpra, L., Horváth, L., Machon, A., Grosz, B., 2011. Modeling of biosphere-atmosphere exchange of greenhouse gases. Part III, Chapter 9: Models and their adaptation. In: *Atmospheric Greenhouse Gases: The Hungarian Perspective* (Ed.: Haszpra, L.), p 393, Dordrecht; London; New York: Springer-Science. pp. 201-208. ISBN: 978-90-481-9949-5.

Spinoni, J. Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.V., Dumitrescu, A., Deak, Gy., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., Vogt, J., 2015. Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology* 35, 1322–1341. doi: 10.1002/joc.4059.

Sugár, E., Berzsenyi, Z., Árendás, T., Bónis, P., 2016. Effect of nitrogen fertilization and genotype on the yield and yield components of winter wheat. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 67, 25–34. doi: 10.1515/boku-2016-0003.

Sugár, E., Berzsenyi, Z., Bónis, P., Árendás, T., 2017. Growth analysis of winter wheat cultivars as affected by nitrogen fertilization. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 68, 57–70, 2017. doi: 10.1515/boku-2017-0003.

Taylor, K.E., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106(D7), 7183-7192.

- Thornley, J.H.M., 1976. *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press, London.
- Thornton, P., Law, B., Gholz, H. L., Clark, K. L., Falge, E., Ellsworth, D., Goldstein, A., Monson, R., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., and Sparks, J., 2002. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 113, 185–222. doi:10.1016/S0168-1923(02)00108-9.
- Trouvelot, A., Kough, J.L., Gianinazzi-Pearson, V., 1986. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In: *Physiological and genetic aspects of mycorrhizae* (Eds.: Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S.), pp 217-221, INRA, Paris, France.
- van Vuuren, D.P. Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., George C. Hurtt G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change* 109, 5-31.
- Vetter, M., Wirth, C., Böttcher, H., Churkina, G., Schulze, E.D., Wutzler, T., Weber, G., 2005. Partitioning direct and indirect human-induced effects on carbon sequestration of managed coniferous forests using model simulations and forest inventories. *Global Change Biology* 11, 810–827.
- Vitousek, P.M., Fahey, T., Johnson, D.W., Swift, M.J., 1988. Element interactions in forest ecosystems: succession, allometry and input-output budgets. *Biogeochemistry* 5, 7–34.
- Waring, R.H., Running, S.W., 1976. Water uptake, storage and transpiration by conifers: A physiological model. In: *Ecological Studies: Analysis and Synthesis*. L. K. (Eds.: Lange, O.L., Schulze, E.D.), pp 189-202, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- WMO, 2016. 18th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Measurement Techniques. In: *GAW Reports* (Eds.: Tans, P., Zellweger, Ch.), No. 229, La Jolla, CA, USA, 13-17, September 2015.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97–107.