



PROJEKT JELENTÉS “WHITE PAPER”

**A KLÍMAVÁLTOZÁS VÁRHATÓ HATÁSA HAZAI ÖKOSZISZTÉMÁKRA, KÜLÖNÖS
TEKINTETTEL A FONTOSABB SZÁNTÓFÖLDI NÖVÉNYEKRE; ALKALMAZKODÁSI
STRATÉGIÁK KERESÉSE A NEGATÍV HATÁSOK CSÖKKENTÉSE ÉRDEKÉBEN**



AgroMo

Interdiszciplináris Kutatóműhely Létrehozása a Klímaadaptív és
Fenntartható Mezőgazdaságért
GINOP-2.3.2-15-2016-00028

1. A legfontosabb eredmények

- A szimulációk alapján az **őszi** vetésű **növények hozama** várhatóan **növekszik** a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A szimulációk alapján a **tavaszi** vetésű **növények hozama** várhatóan **csökken** a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A **legsérülékenyebb területek** az ország középső és déli megyéiben található: Pest, Fejér, Bács-Kiskun, Baranya, Csongrád és Békés megyében.
- Megfelelő **alkalmazkodási stratégiával a kukorica termésszintjei gazdaságosan növelhetők**. Ugyanígy a nitrát lemosódás mértéke is csökkenthető.
- Szántóföldi növénytermesztés mellett is növelhető a talaj összes széntartalma; a **szántóterületek is lehetnek nettó szénmegkötők**.
- A természetes **gyepek nettó szénmegkötők** és termelésük várhatóan növekszik a klímaváltozásnak köszönhetően.
- A **lombhullató erdők** talajában elhanyagolható mértékű a széntartalom növekedése, azonban a faállományban **évi 5-8 tonna szén kerül megkötésre hektáronként**. Az alföldi erdők termelésének jelentős csökkenése várható.
- **Szélsőséges adottságú területeken**: könnyű szerkezetű talajokon (Duna-Tisza közeli homokhátság, Nyírség) valamint a csapadékosabb országrészekben (Dél-Nyugat-Dunántúl) a **nitrátlemosódás növekedése várható**, amely a műtrágya szintek csökkentésével mérsékelhető a termésszintek veszélyeztetése nélkül.
- Szántóterületeken, a **dinitrogén-oxid kibocsátás növekedése várható**, amely a műtrágya szintek mérséklésével mérsékelhető a termésszintek veszélyeztetése nélkül.
- Továbbfejlesztettük a **Biome-BGCMuSo biogeokémiai modellt** és beágyaztuk az **AgroMo modellezési keretrendszerbe**.
- Az **AgroMo kísérleti platform** bekerült a **TOP50 Kiváló Kutatási Infrastruktúrába**: [\[link\]](#)
- Az **AgroMo** illetve a beágyazott Biome-BGCMuSo modell, a **GitHub listáján 2. a biogeokémiai modellek** illetve 5. a növénytermesztési modellek **rangsorában**; továbbá bekerült a GitHub 'open-sustainable-technology repository' válogatásba.
- **Huszonnégy Q1-es** (ebből tizenegy D1-es) **publikáció** készült az eredmények bemutatásáról.
- Az AgroMo rendszerrel **további** lehetséges **alkalmazkodási stratégiák is letesztelhetők**. Az AgroMo szabadon felhasználható és innen érhető el: [\[link\]](#)

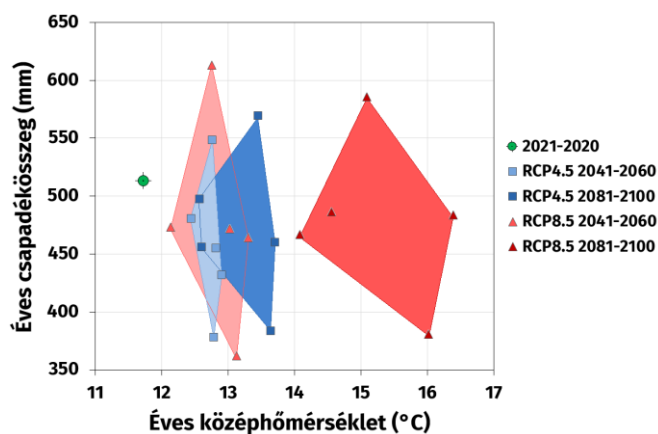
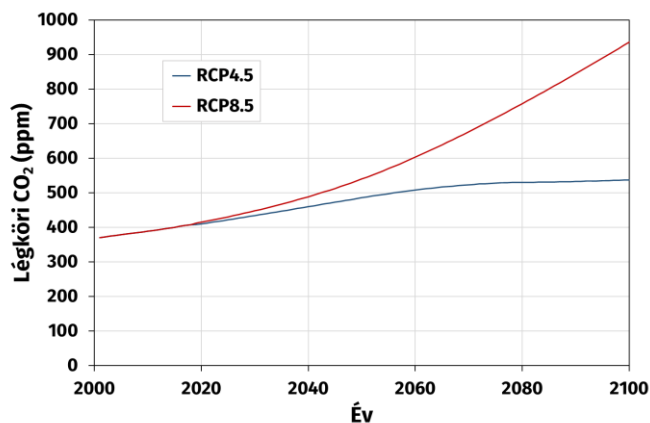
2. Az AgroMo projekt

A projekt a begyűjtött adatok mennyiségének, minőségének és sokféleségének növelésével, illetve korszerű matematikai és infokommunikációs módszerek alkalmazásával hozzájárul az élelmezés- és az élelmiszerbiztonság fejlesztéséhez, a digitális mezőgazdaság kiterjesztéséhez, a fenntartható, környezet- és klímatudatos erőforrás-gazdálkodás megerősítéséhez, az agrárszektor versenyképességének növeléséhez, a környezetvédelemi kockázatok, valamint a klímaváltozás negatív hatásainak csökkentéséhez.

- I. Közel ötven kutató aktív közreműködésével multidiszciplináris kutatóműhelyt hoztunk létre. A kutatók által képviselt tudományterületek a légkör-talaj-növény rendszerhez kapcsolódó, illetve annak szimulációjához szükséges valamennyi fontos diszciplínát felölelik: klimatológia, agro-meteorológia, talajfizika, talajkémia, talajbiológia, agronómia, növényélettan, nemesítés, genomika, közgazdaságtan, statisztika, informatika, térinformatika, környezeti térképezés.
- II. Holisztikus rendszerértelmezési szemléleten alapuló agro-pedo-klimatológiai kísérleti platformot hoztunk létre Martonvásáron, amely ötvözi a tartamkísérletek hagyományait, illetve a klímakamrás stresszkutatások tapasztalatait a legmodernebb mérési és infokommunikációs technológiák által kínált lehetőségekkel. A platform által szolgáltatott mérési adatokat egy olyan szimulációs agro-ökoszisztéma modell fejlesztésére használtuk fel, amely minden eddiginél pontosabban képes leírni a talaj-növény rendszer folyamatait.
- III. Összesen 20 RCP4.5 és RCP8.5 alapú, napi léptékű, 10 km-es térbeli felbontású éghajlati projekciót dolgoztunk fel a 2021-2100 időszakra, melyek segítségével megbízhatóbb becslések készíthetők a mezőgazdasági termelés jövőbeli alakulására vonatkozóan.
- IV. Rugalmasan adaptálható (moduláris, nyílt forráskódú) integrált modellezési keretrendszert (AgroMo) hoztunk létre, amely a magyar mezőgazdasági rendszer működését szimulálja térben explicit módon, több lehetséges léptékben: parcella, farm, regionális és nemzetgazdasági szinten is. Az AgroMo rendszer valamennyi földhasználat típus, illetve bármilyen földhasználat változás szimulációjára képes.
- V. A felhalmozott adatok és a kiépített modellrendszer felhasználásával stratégiákat (konkrét ajánlásokat) dolgoztunk ki a mezőgazdasági termelékenység fenntartható növelésére és a mezőgazdasági eredetű környezeti károk enyhítésére.

3. Klímaváltozás számszerűen; a meghatározó jellemzők alapján

A légköri széndioxid koncentráció, valamint az éves középhőmérséklet, illetve az éves csapadékösszeg alakulása a felhasznált, tíz eltérő (5 RCP4.5 és 5 RCP8.5 alapú) klímaprojekciókra vonatkozóan, a referencia időszakhoz (2001-2020) képest.

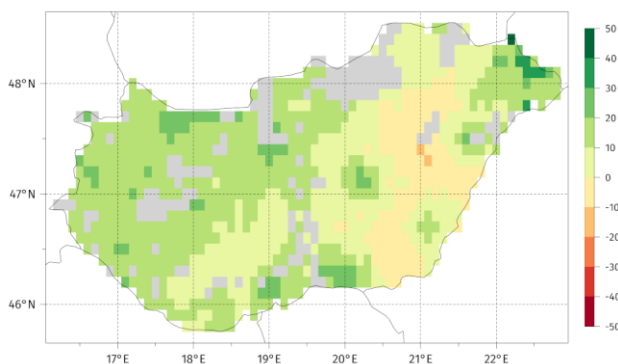


4. A klímaváltozás hatása modell szimulációk alapján

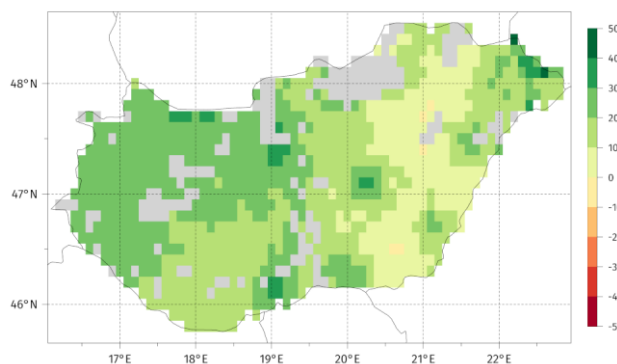
4.1 A klímaváltozás hatása Ellátó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra

4.1.1 A klímaváltozás hatása szántóföldi növények hozamára

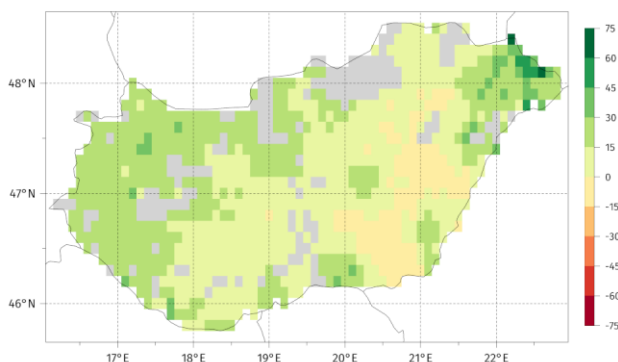
Klímaváltozás hatása a termésre (%), ŐSZI BÚZA, 2041-2060



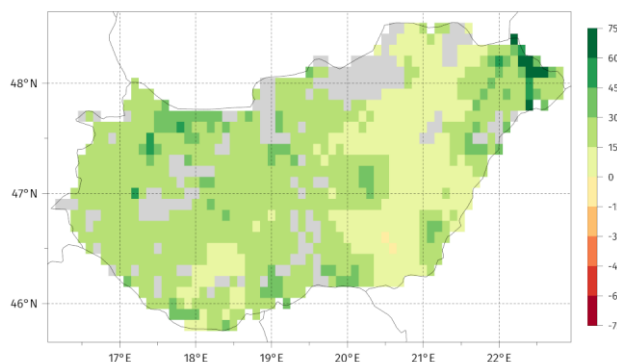
Klímaváltozás hatása a termésre (%), ŐSZI BÚZA, 2081-2100



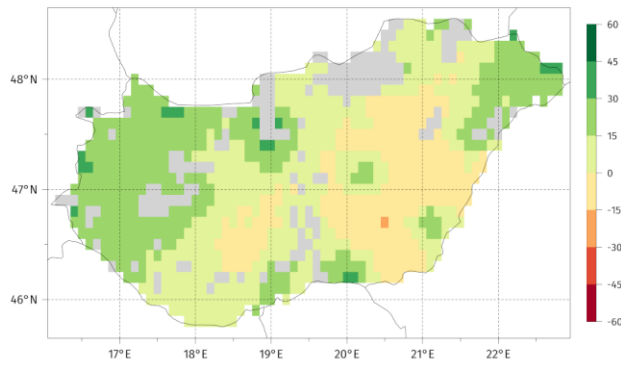
Klímaváltozás hatása a termésre (%), ŐSZI ÁRPA, 2041-2060



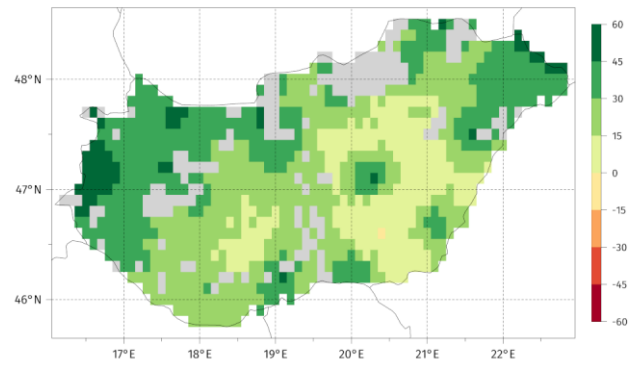
Klímaváltozás hatása a termésre (%), ŐSZI ÁRPA, 2081-2100



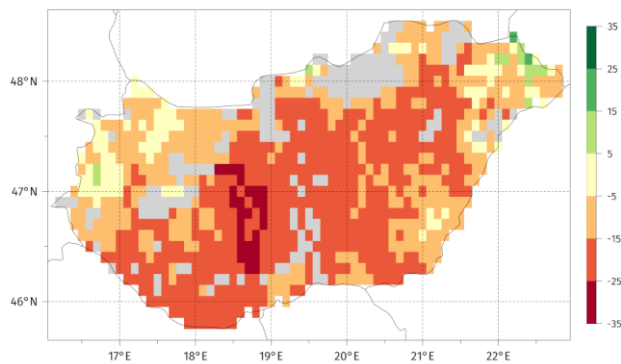
Klímváltozás hatása a termésre (%), REPCE, 2041-2060



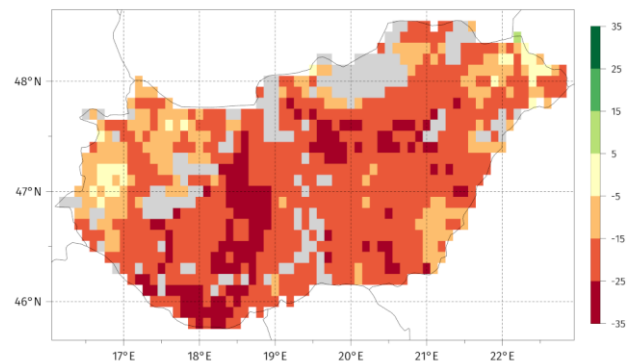
Klímváltozás hatása a termésre (%), REPCE, 2081-2100



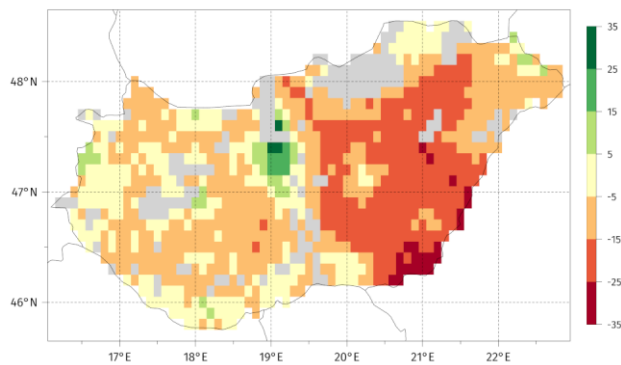
Klímváltozás hatása a termésre (%), KUKORICA, 2041-2060



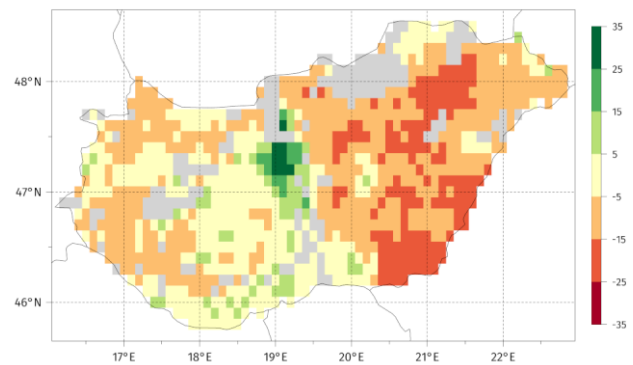
Klímváltozás hatása a termésre (%), KUKORICA, 2081-2100



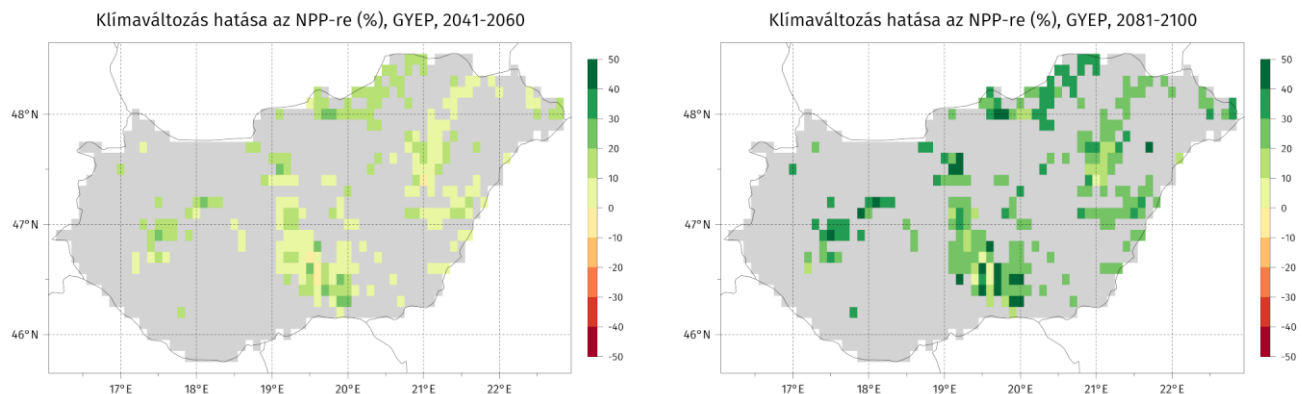
Klímváltozás hatása a termésre (%), NAPRAFORGÓ, 2041-2060



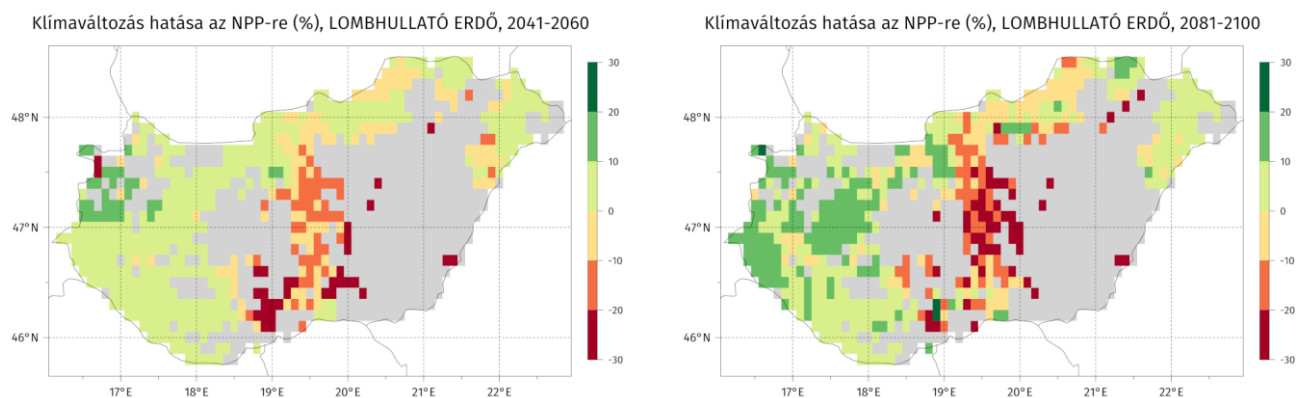
Klímváltozás hatása a termésre (%), NAPRAFORGÓ, 2081-2100



4.1.2 A klímaváltozás hatása természetes gyepterületek produkciójára (NPP¹)

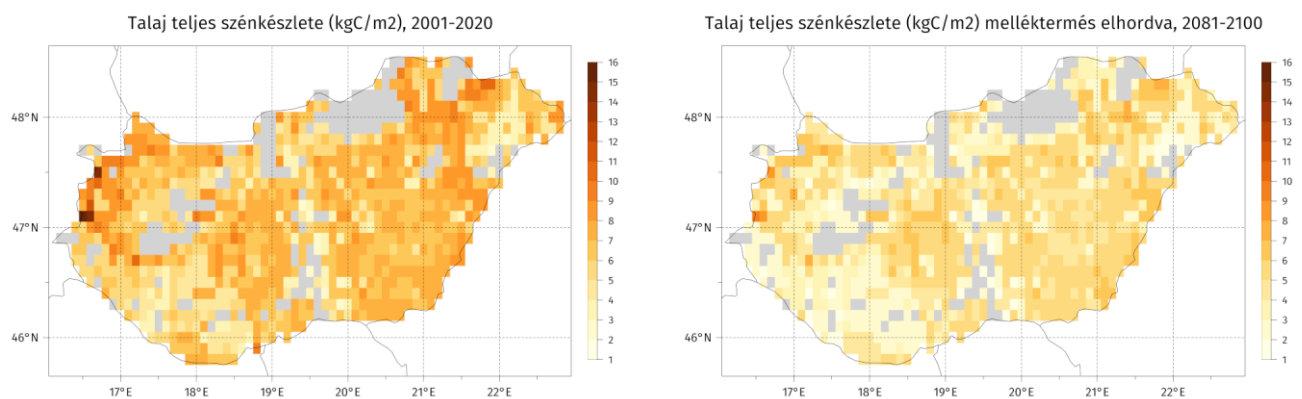


4.1.3 A klímaváltozás hatása lombhullató erdők produkciójára (NPP)



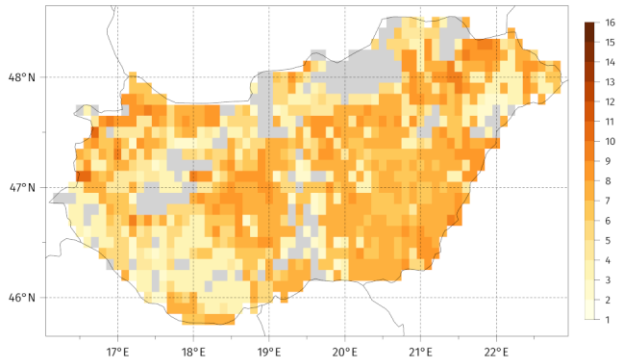
4.2 A klímaváltozás hatása Szabályzó Ökoszisztéma Szolgáltatásokra

4.2.1 A talaj szénkészletének alakulása eltérő kukorica-termesztési gyakorlat mellett

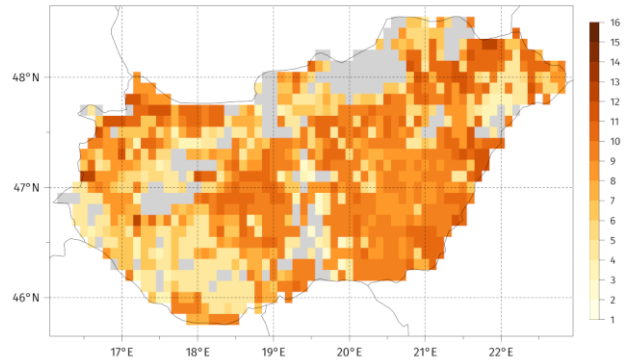


¹ NPP – Net Primary Production: Növények által megkötött szén nettó mennyisége

Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²) mt. 2 évente elhordva, 2081-2100



Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²) melléktermés marad, 2081-2100

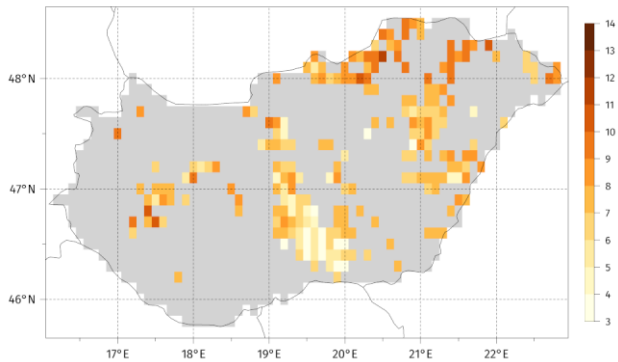


Országos átlagban, a talaj-szénkészlet változása (2081-2100 vö. 2001-2020):

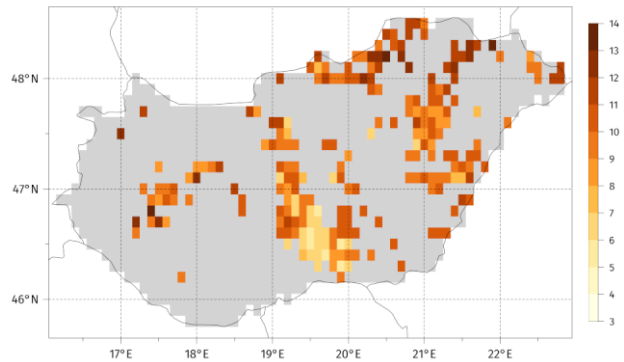
- a melléktermést a területen hagyva: +19,6%
- a melléktermést a területről lehordva: -32,6%
- a melléktermést minden második évben lehordva: -4,1%

4.2.2 A talaj szénkészletének alakulása természetes gyepterületeken

Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²), 2001-2020



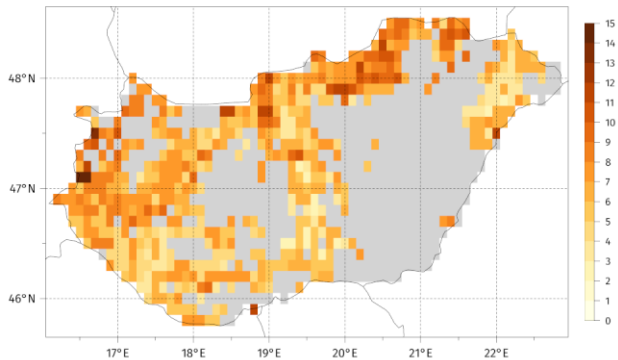
Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²), 2081-2100



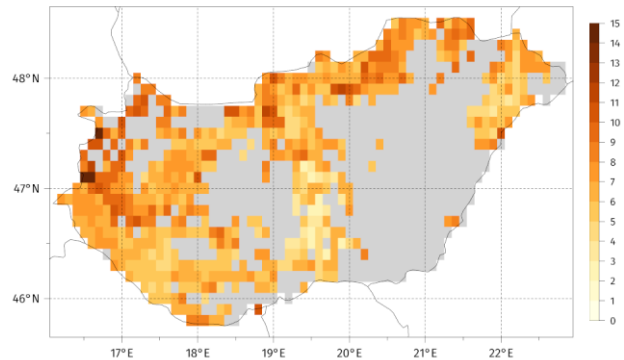
Országos átlagban, a talaj-szénkészlet változása (2081-2100 vö. 2001-2020): +35,3%

4.2.3 A talaj szénkészletének alakulása lombhullató erdők alatt

Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²), 2001-2020

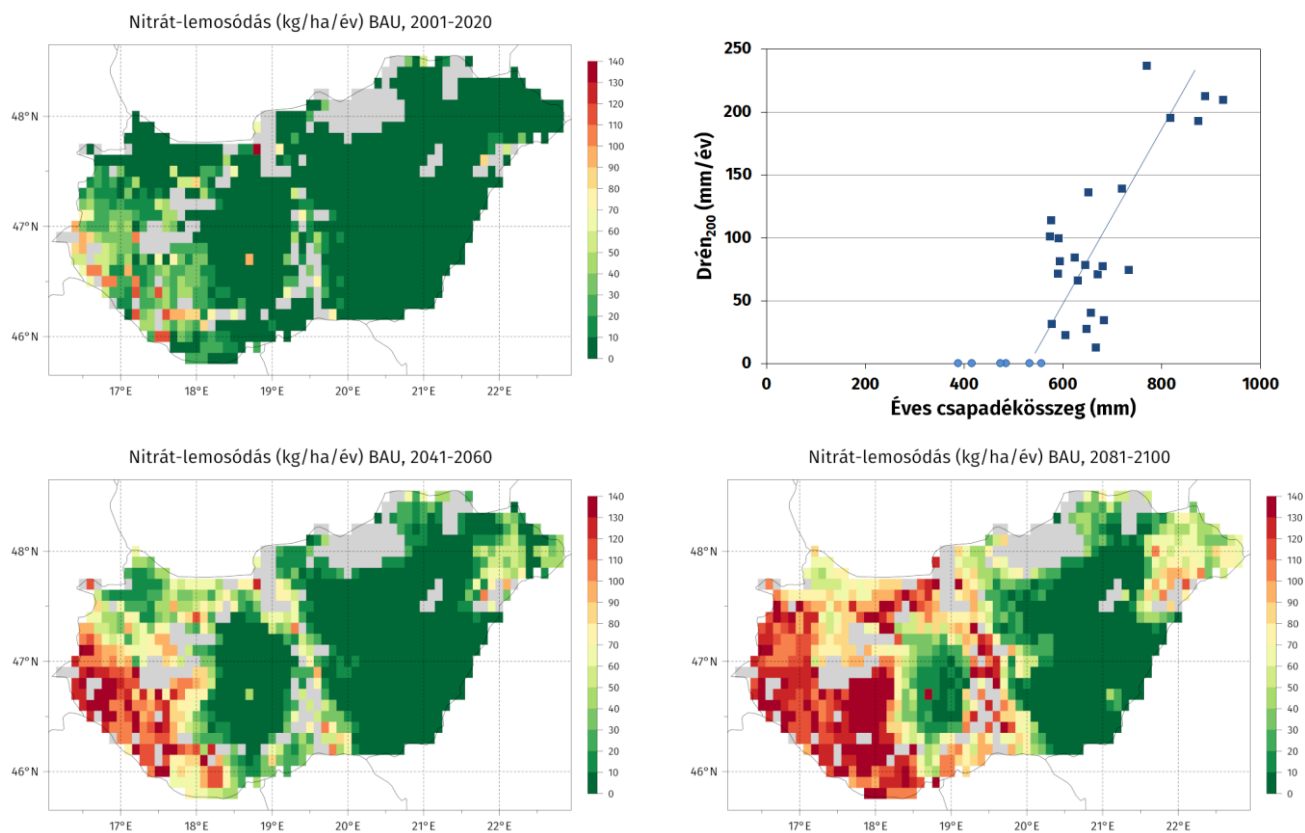


Talaj teljes szénkészlete (kgC/m²), 2081-2100

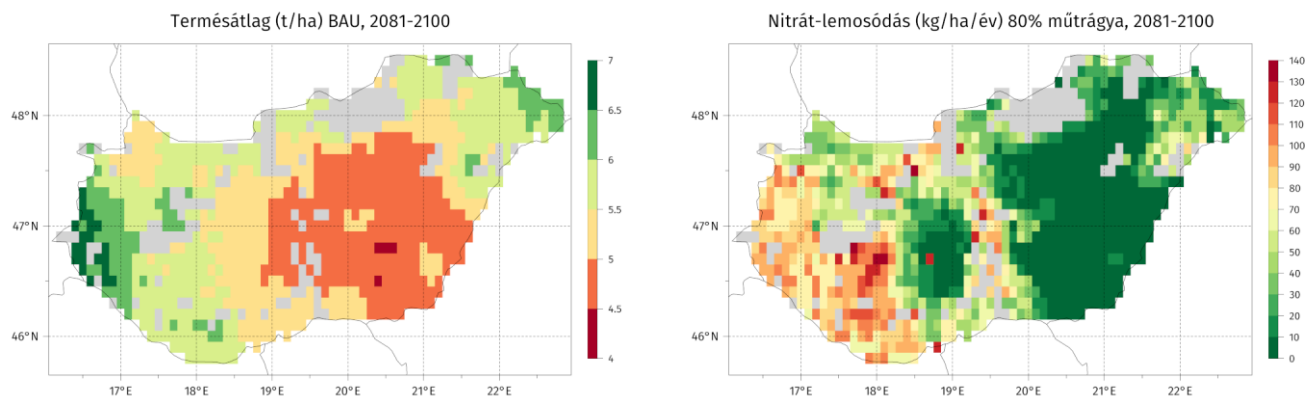


Országos átlagban, a talaj-szénkészlet változása (2081-2100 vö. 2001-2020): +6,65%

4.2.4 A nitrát-lemosódás alakulása kukorica-termesztés mellett²

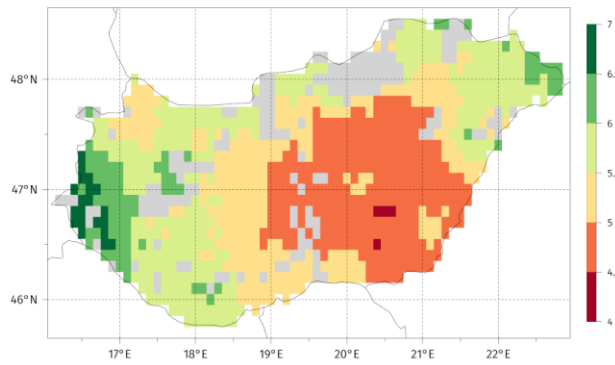


A jobb-felső grafikon a 200 cm-nél mélyebbre szivárgó víz mennyiségét ábrázolja az éves csapadékmennyiség függvényében egy Dél-Nyugat Magyarországi (piros) cellára. Nitrát-lemosódásra olyan években számíthatunk, amikor a csapadékösszeg meghaladja a 600 mm-t. Ekkor is leginkább csak könnyű szerkezetű (magas homoktartalmú) talajokon.

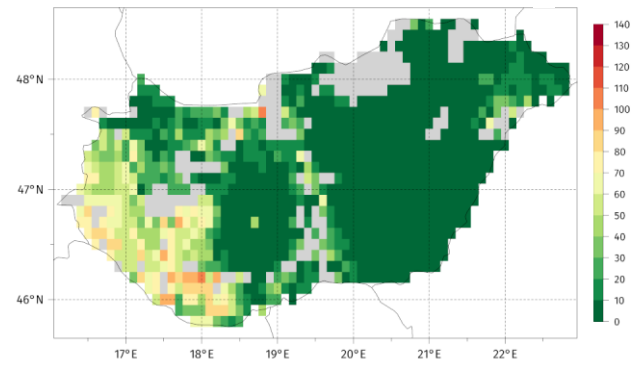


² BAU – Business As Usual: folytatva a jelenleg szokásos növénytermesztést

Természetlag (t/ha) 80% műtrágya, 2081-2100

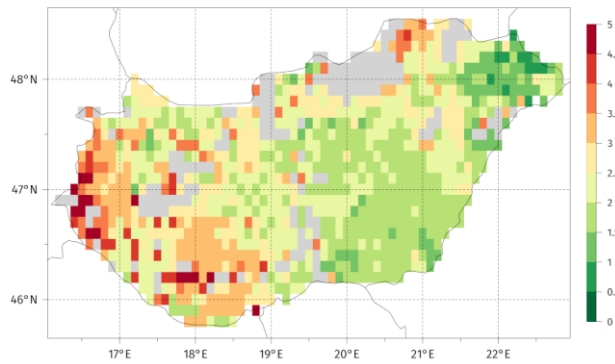


Nitrát-lemosódás (kg/ha/év) adaptációval, 2081-2100 ³

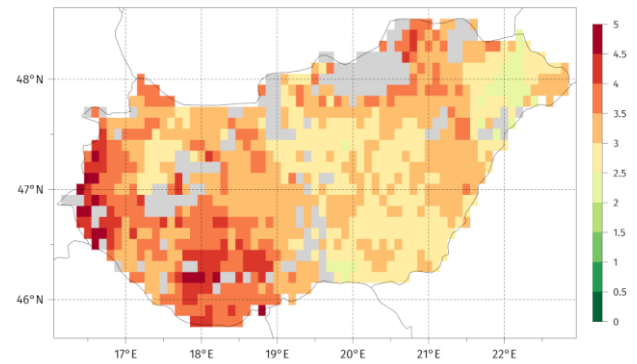


4.2.5 A dinitrogén-oxid kibocsátás alakulása kukorica-termesztés mellett

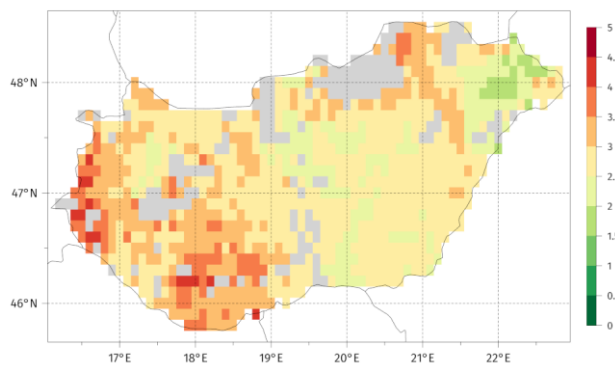
N₂O kibocsátás (kg/ha/év) BAU, 2001-2020



N₂O kibocsátás (kg/ha/év) BAU, 2081-2100



N₂O kibocsátás (kg/ha/év) 80% műtrágya, 2081-2100

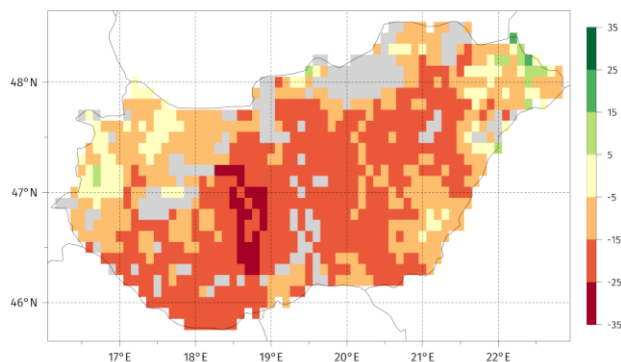


³ Adaptáció: lásd 4.3.4 fejezet

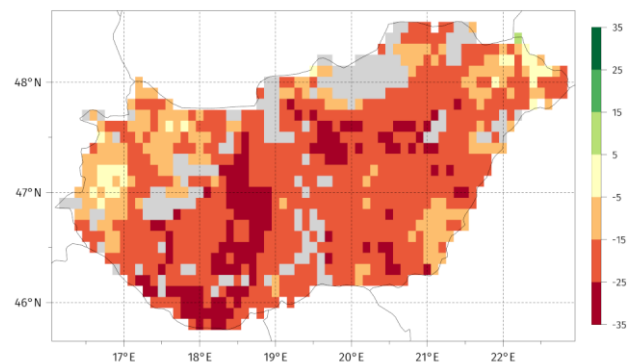
4.3 Alkalmazkodási stratégiák keresése illetve tesztelése kukorica-termesztés esetében

4.3.1 Vetés három héttel korábban (április 20 helyett március 30)

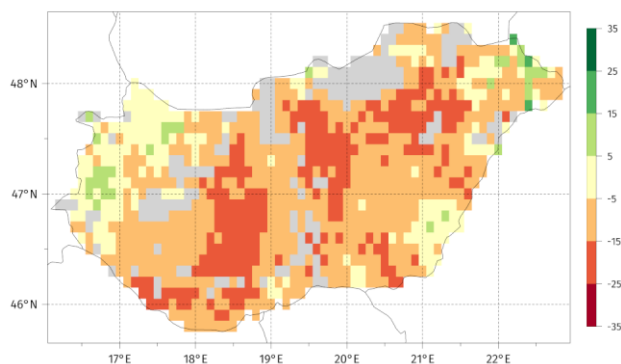
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2041-2060



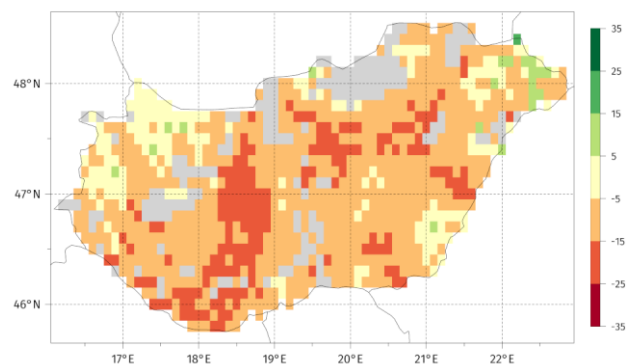
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2081-2100



Klímváltozás hatása a termésre (%) vetés korábban, 2041-2060

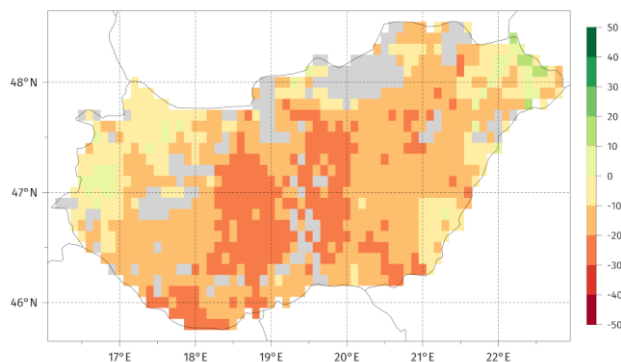


Klímváltozás hatása a termésre (%) vetés korábban, 2081-2100

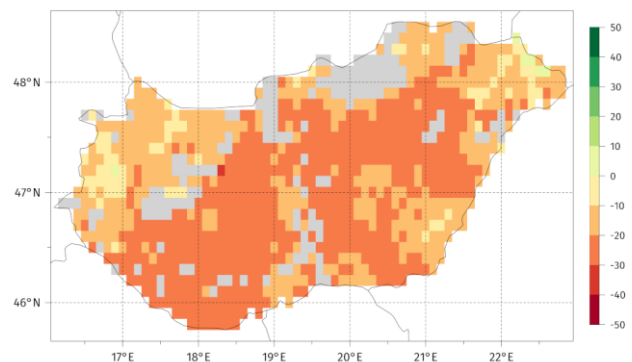


4.3.2 Öntözés

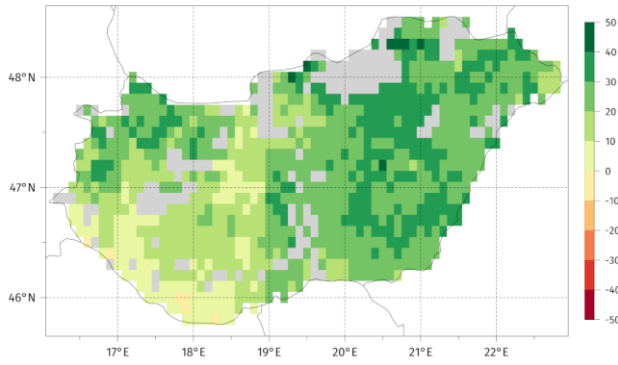
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2041-2060



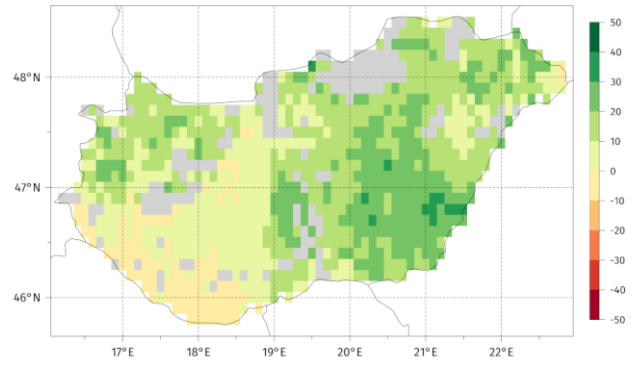
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2081-2100



Klímváltozás hatása a termésre (%) öntözve, 2041-2060

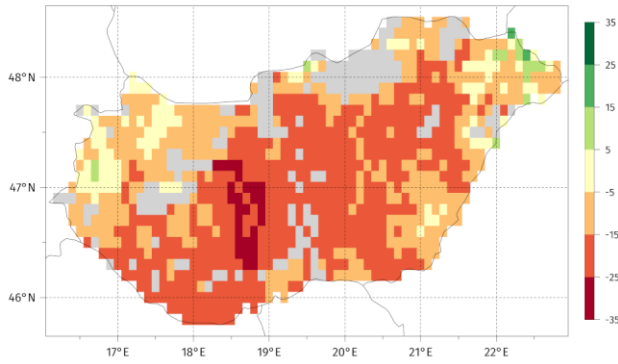


Klímváltozás hatása a termésre (%) öntözve, 2081-2100

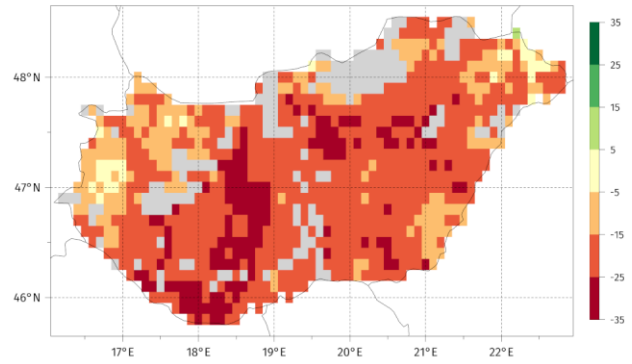


4.3.3 (Tovább)nemesített fajta vetése

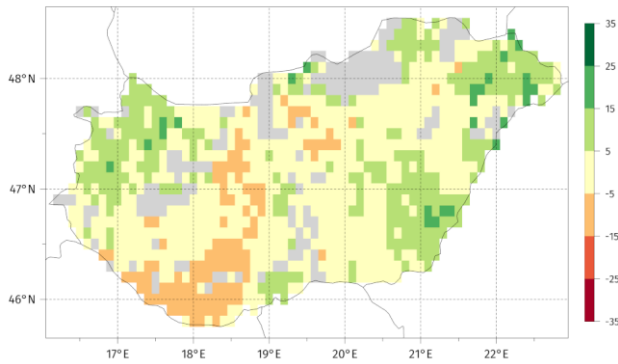
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2041-2060



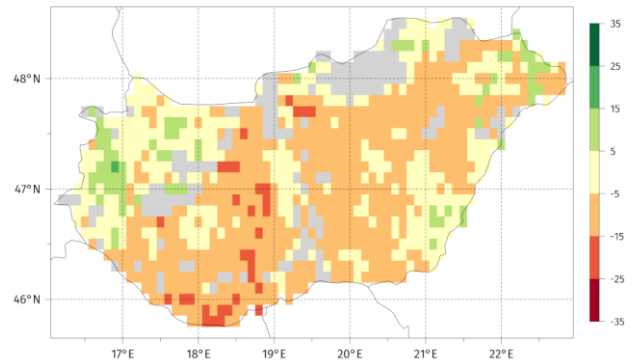
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2081-2100



Klímváltozás hatása a termésre (%), nemesítve, 2041-2060

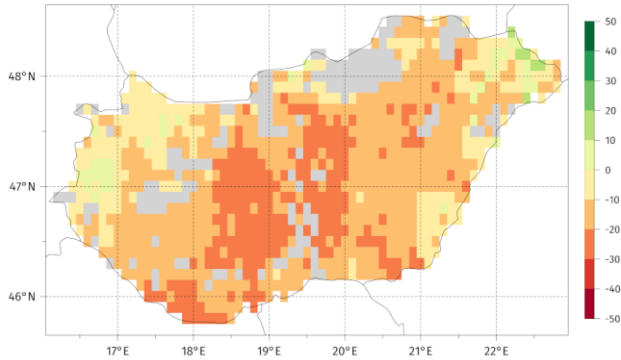


Klímváltozás hatása a termésre (%), nemesítve, 2081-2100

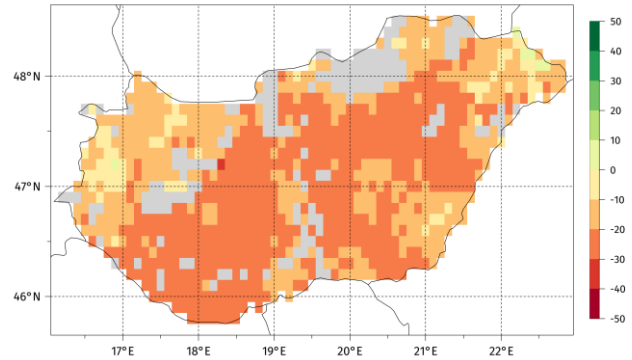


4.3.4 Adaptáció: (tovább)nemesített fajta, három héttel korábban vetve és öntözve

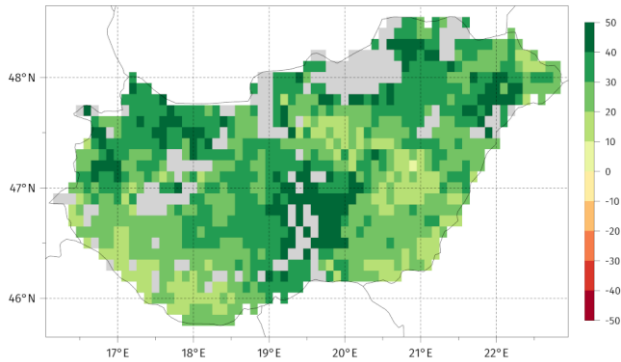
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2041-2060



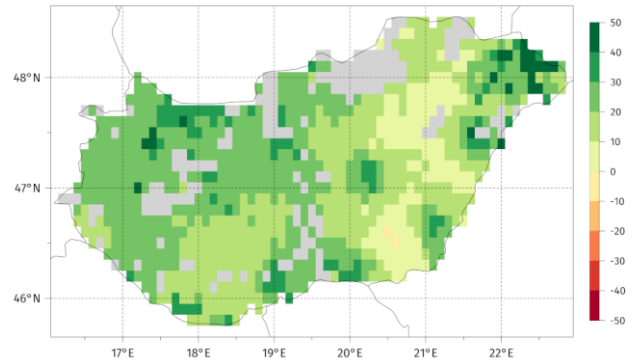
Klímváltozás hatása a termésre (%) BAU, 2081-2100



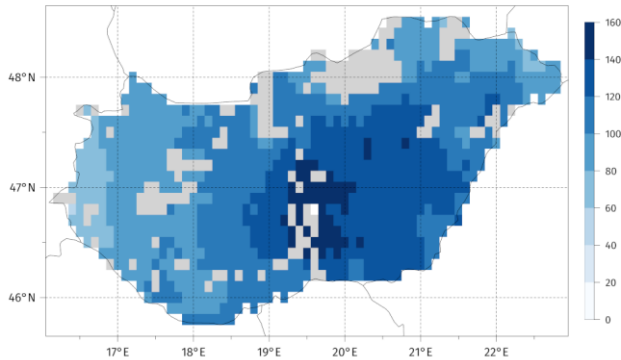
Klímváltozás hatása a termésre (%) adaptációval, 2041-2060



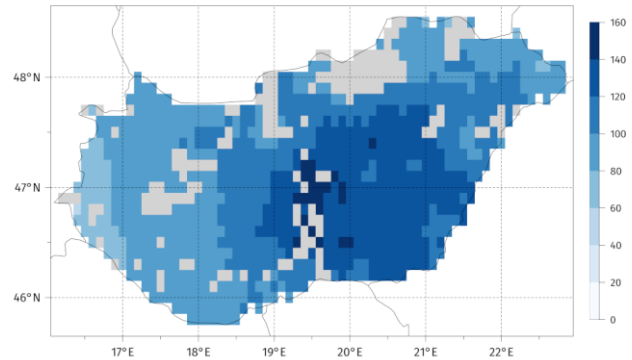
Klímváltozás hatása a termésre (%) adaptációval, 2081-2100

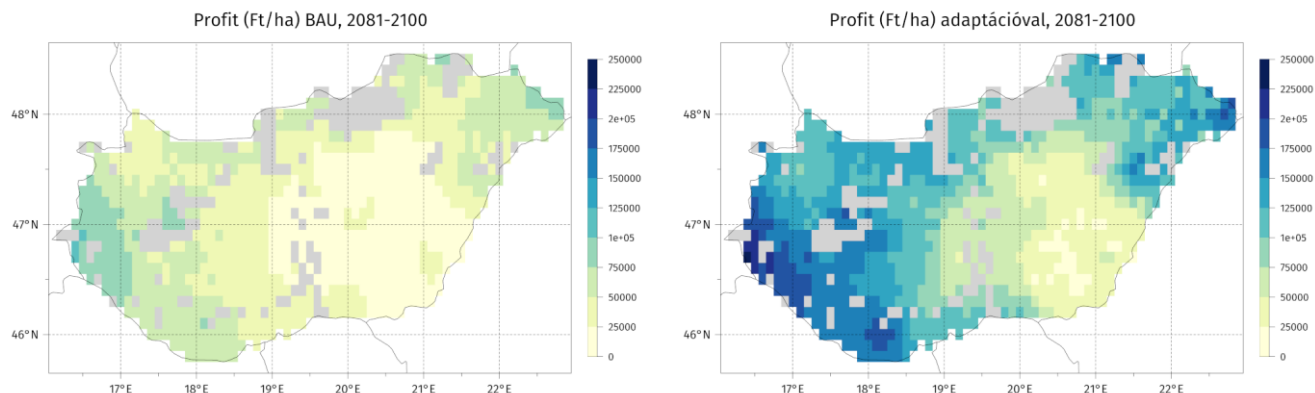


Öntözővíz mennyisége (mm/év) adaptációval, 2041-2060



Öntözővíz mennyisége (mm/év) adaptációval, 2081-2100





Részletesebb elemzéssel meghatározható, hogy az egyes területeken minimálisan mennyi öntözővízzel lenne fenntartható a jelenlegi termésszint illetve profit.

5. Hogyan készültek az eredmények?

Az eredmények az AgroMo modellezési keretrendszerbe ágyazott Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell segítségével végrehajtott in silico kísérletekből származnak. Minden szimulációt mind a tíz klímaprojekcióval végre hajtottunk. A bemutatott eredmények minden esetben tíz összetartozó szimuláció csoportátlagai. Az in silico kísérletek előtt, megfigyelés-alapú adatok segítségével, a modell néhány paraméterét úgy állítottuk be (kalibráltuk), hogy a modelleredmények a lehető legjobban visszaadják a mért értékeket. A modell-kalibrációhoz az alábbi adatforrásokat használtuk fel:

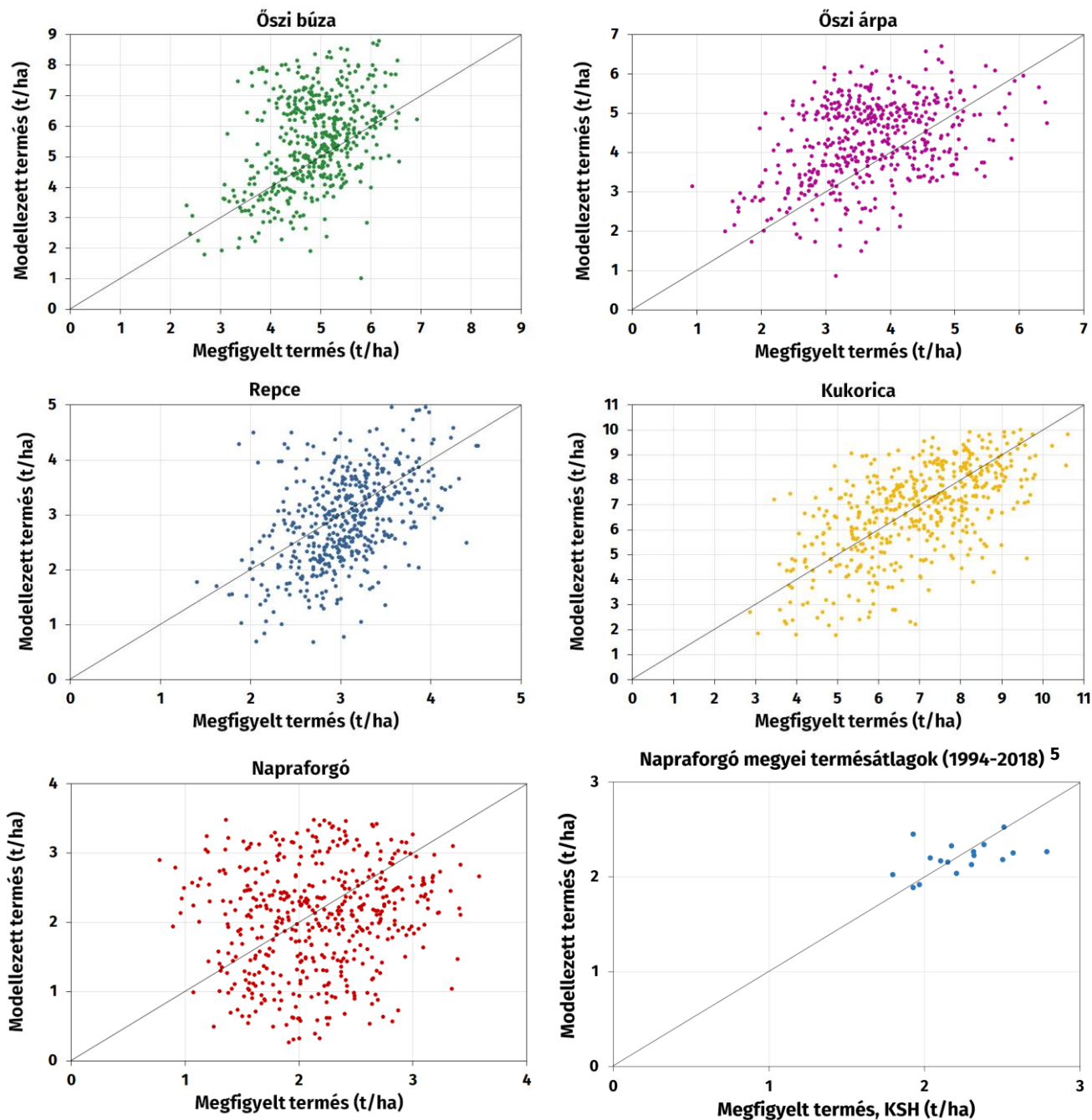
- KSH, NUTS3 szintű termésadatok (1994-2018)
- ATK Talajtani Intézet, DOSoReMI talaj-adatbázis (100 m-es térbeli felbontás)
- FORESEE klíma-adatbázis (10 km-es térbeli felbontás)
- Liziméter állomás, Martonvásár
- Eddy-kovariancia állomás, Hegyhátsál
- ELKH Ökológiai Kutatóközpont mérései⁴, Fülöpháza
- MODIS műholdas távérzékelési produktumok

A modell meteorológiai illetve talaj bemenő adatait a FORESEE illetve a DOSoReMI adatbázisokból nyertük ki. Az agrotechnikai adatokat (vetési idő, aratás ideje, stb.) az adott növényfajra jellemző értékekre állítottuk illetve a műtrágya mennyiségét a KSH vonatkozó megyei adatsorai alapján állítottuk be. A növényi bemenő adatok többségét szakirodalmi adatok alapján rögzítettük, és csak néhány meghatározó paramétert (gyökérelosztási paraméter, specifikus levélfelület, stressz-érzékenység valamint a fejlődési fázisok hossza, illetve a fázisokra jellemző elosztási paraméterek) állítottunk be kalibráció segítségével.

⁴ <https://doi.org/10.1007/s11258-018-0814-6>

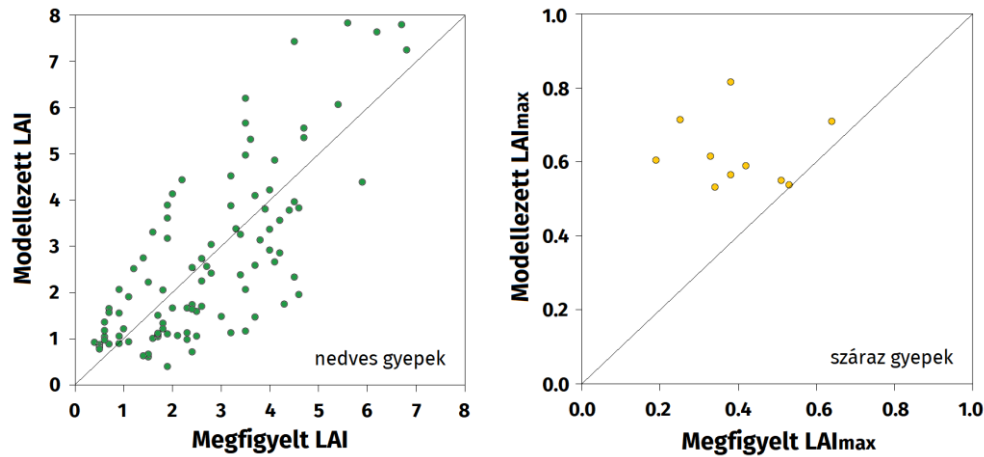
5.1 In silico (szimulációs) eredmények összevetése mérésekkel

5.1.1 Modellezett terméseredmények összevetése a KSH adataival (1994-2018)

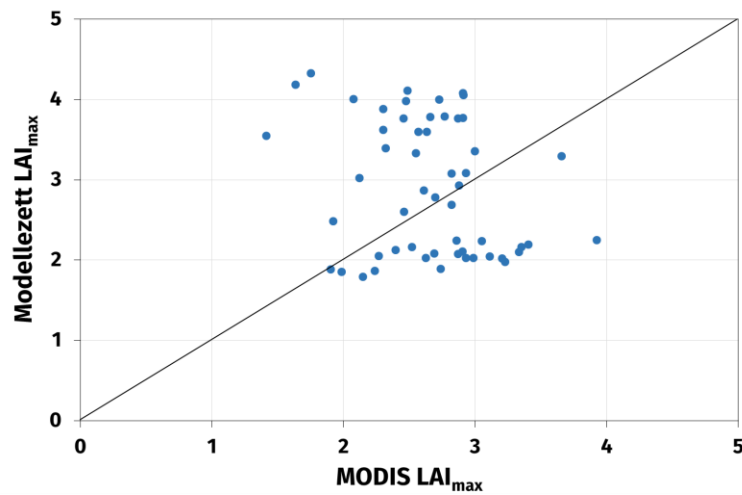


⁵ Egy-egy évben illetve cellában jelentős eltérés lehet a modellezett és a vonatkozó, megfigyelt (megyei) termésszint között, ám a cellák eredményeit megyékre vonatkozóan és hosszabb időszakra aggregálva a modellezett eredmények sokkal jobb képet mutatnak: ld. napraforgó példája. A modell nagyobb térbeli és időbeli léptékben (hosszútávú trendek megállapítására) nagy biztonsággal alkalmazható.

5.1.2 A modellezett levélfelület index (LAI) összevetése a hegyhátsági eddy-kovariancia állomás (nedves gyepek) és az ELKH ÖK fülöpházai (száraz gyepek) megfigyeléseivel.

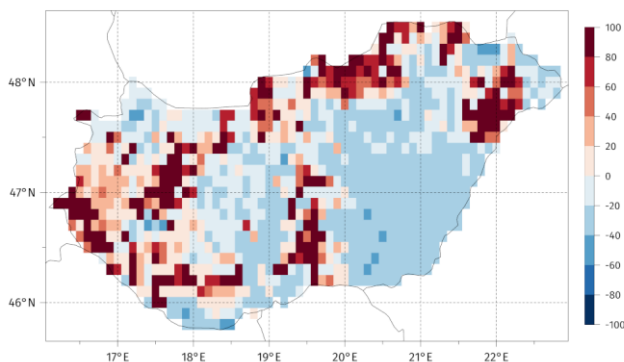


5.1.3 Gyepterületek levélfelület index értéke éves maximumainak (LAI_{max}) többéves átlaga (2001-2020): modellezett értékek összevetése műholdról távérzékel (MODIS) adatokból származtatott értékekkel.

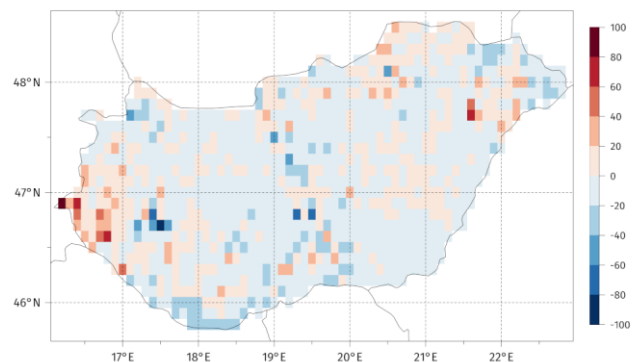


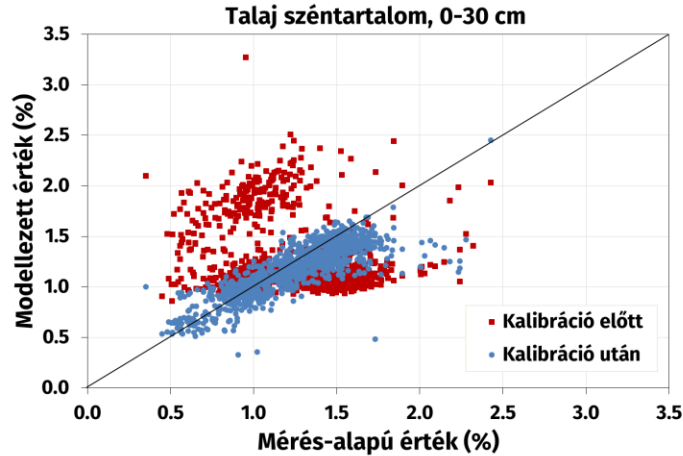
5.1.4 A feltalaj (0-30 cm) modellezett széntartalmának összevetése a DOSoReMI adataival

Modell relatív hibája (%) kalibrálás ELŐTT, talaj széntartalom, 0-30 cm

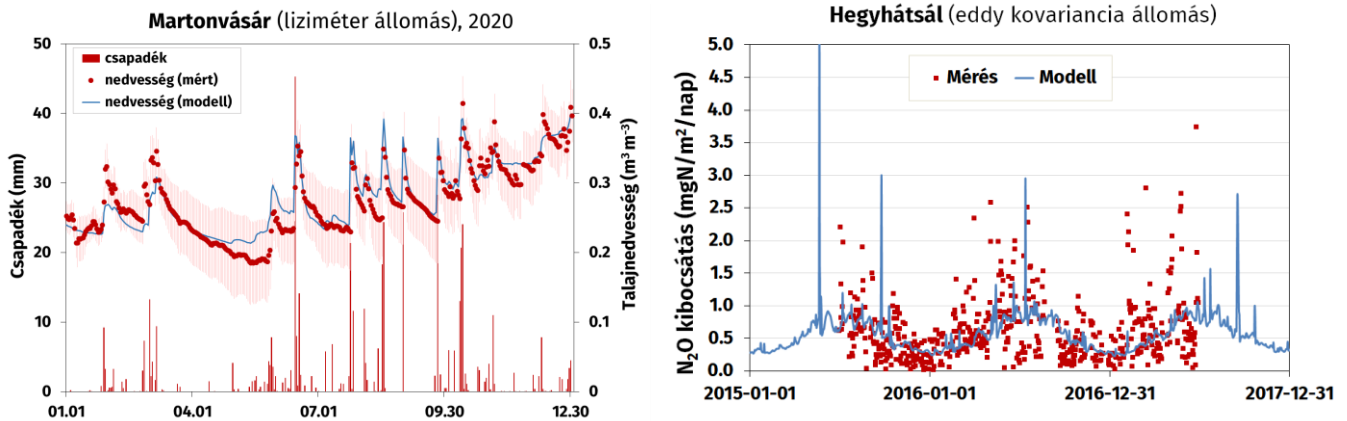


Modell relatív hibája (%) kalibrálás UTÁN, talaj széntartalom, 0-30 cm





5.1.5 A feltalaj (0-10 cm) mért és modellezett nedvességtartalma illetve N₂O kibocsátása

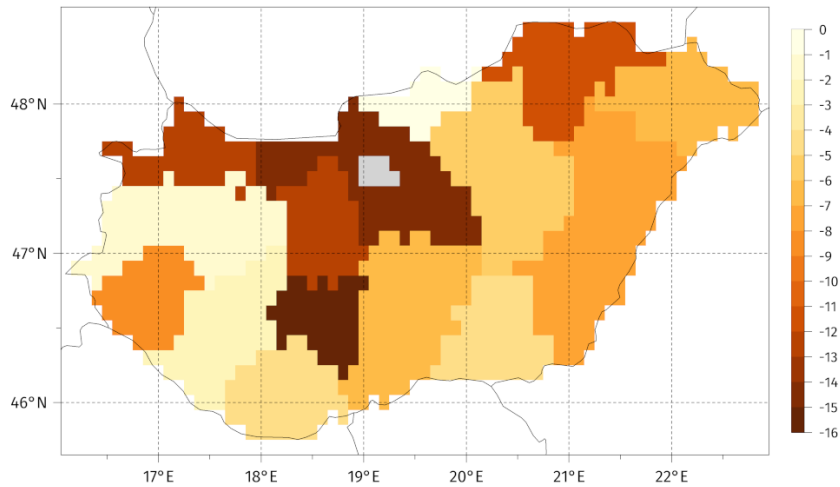


5.1.6 Agrár-közgazdasági számítások

A modellhez kapcsolt agrár-közgazdasági adatbázis a növény-specifikus vetési területek nagyságát valamint a bevételi és kiadási oldal sarokszámait tartalmazza. Ezek, valamint a modell által szolgáltatott eredmények (pl. termés, t/ha) alapján, a területegységre és bármely nagyobb területre vonatkozó profit alakulása kiszámítható.

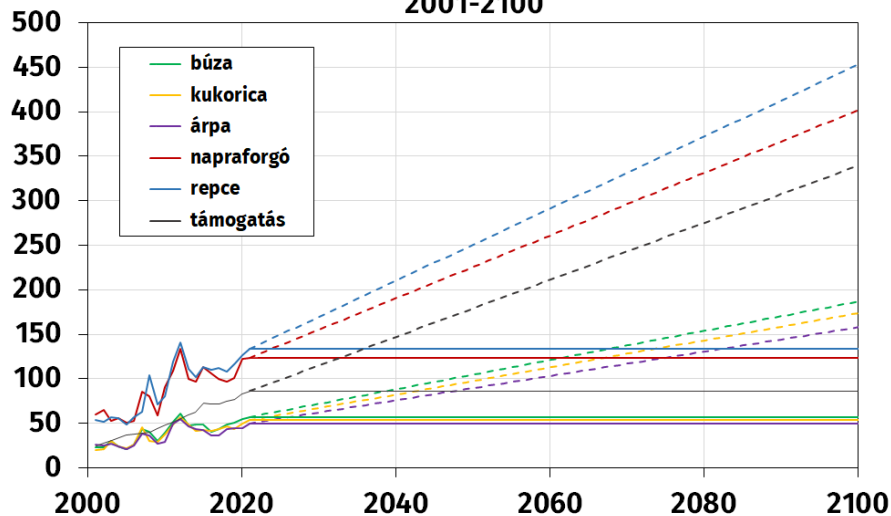
A modell térbeli kiterjesztésének alapja a Magyarországot lefedő 1104 darab 10×10 km-es cella. A historikus földhasználati adatbázisokra (Agrárgazdasági Kutatóintézet: AKI, Központi Statisztikai Hivatal: KSH) támaszkodva meghatároztuk az egyes cellák átlagos földhasználatának eloszlását hektárban az öt főnövényre. A földhasználat tekintetében ez a megfigyelt kiindulási pont, amit a jövőre vonatkozóan (2020-2050) kiegészítettük a JRC (Joint Research Centre) által létrehozott LUISA - 'Territorial Modeling Platform' adatbázis eredményeivel, amely a szántóföldi összterület csökkenését vetítik elő.

Szántóterületek csökkenése 2050-re 2020-hoz képest (%)



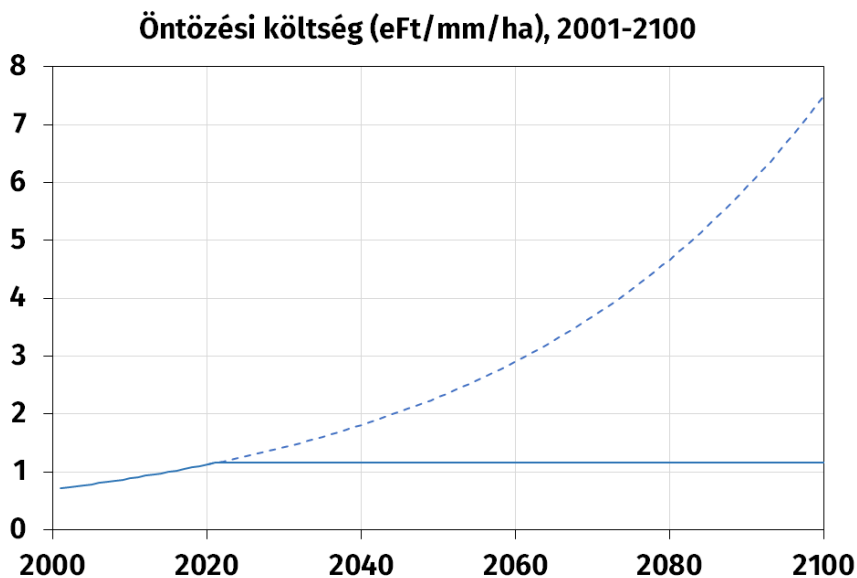
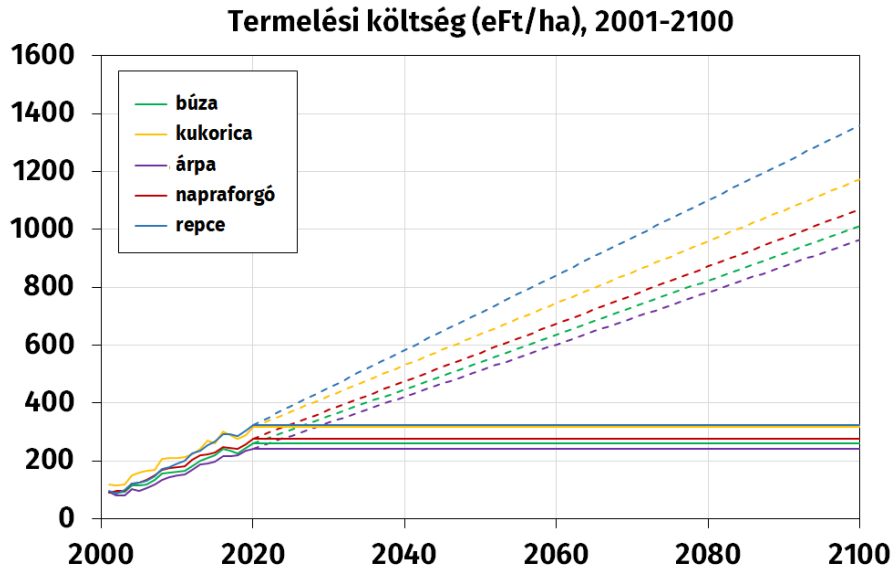
A gazdák fő bevételi forrása az eladott termék utáni jövedelem illetve a terület alapú támogatás. A vizsgált növények tonnánkénti értékesítési átlagárait vettük alapul a 2001-2019 időszakra vonatkozóan, de meghatároztuk azok trendjeit is 2100-ig bezárólag.

Bevétel: terményeladás (eFt/t/ha) és támogatás (eFt/ha), 2001-2100



A költségek meghatározásakor a magyar agráriumot alkotó egyéni és társas vállalkozások által képzett országos szintű pénzforgalmat tanulmányozzuk. Az AKI által gyűjtött tesztüzemi adatbázis felhasználásával a főnövények költség és jövedelemhelyzetének pontos évenkénti adataiból meghatározzuk a részletes költségszerkezetet, illetve a folyó áron számított költségtrendet. A vizsgált historikus időszakban (2001-2019) a költségszerkezet esetében jól megfigyelhető, hogy az öt főnövény egyes költségtételeinek aránya nem, vagy csak nagyon kis mértékben változott az elmúlt évtizedben, így a termelés költséget további részletezés nélkül

egyetlen költségelemként kezeltük. Azon klímadaptációs forgatókönyvek szerinti hipotézisek, amelyek érintik a költségeket (pl. öntözés, műtrágya-használat csökkentése) mind additívan kerülnek meghatározásra.



Ezzel a megközelítéssel a 2020-as reálértéken vagy akár jövőbeli árszinteken is meghatározhatjuk a hektáronkénti profit (P) alakulását, az alábbi egyszerű képlettel:

$$P = \overbrace{(Y \cdot Y_P + S)}^{\text{Bevétel}} - \overbrace{(P_C + F_C \cdot F_A + I_C \cdot I_A)}^{\text{Kiadás}}$$

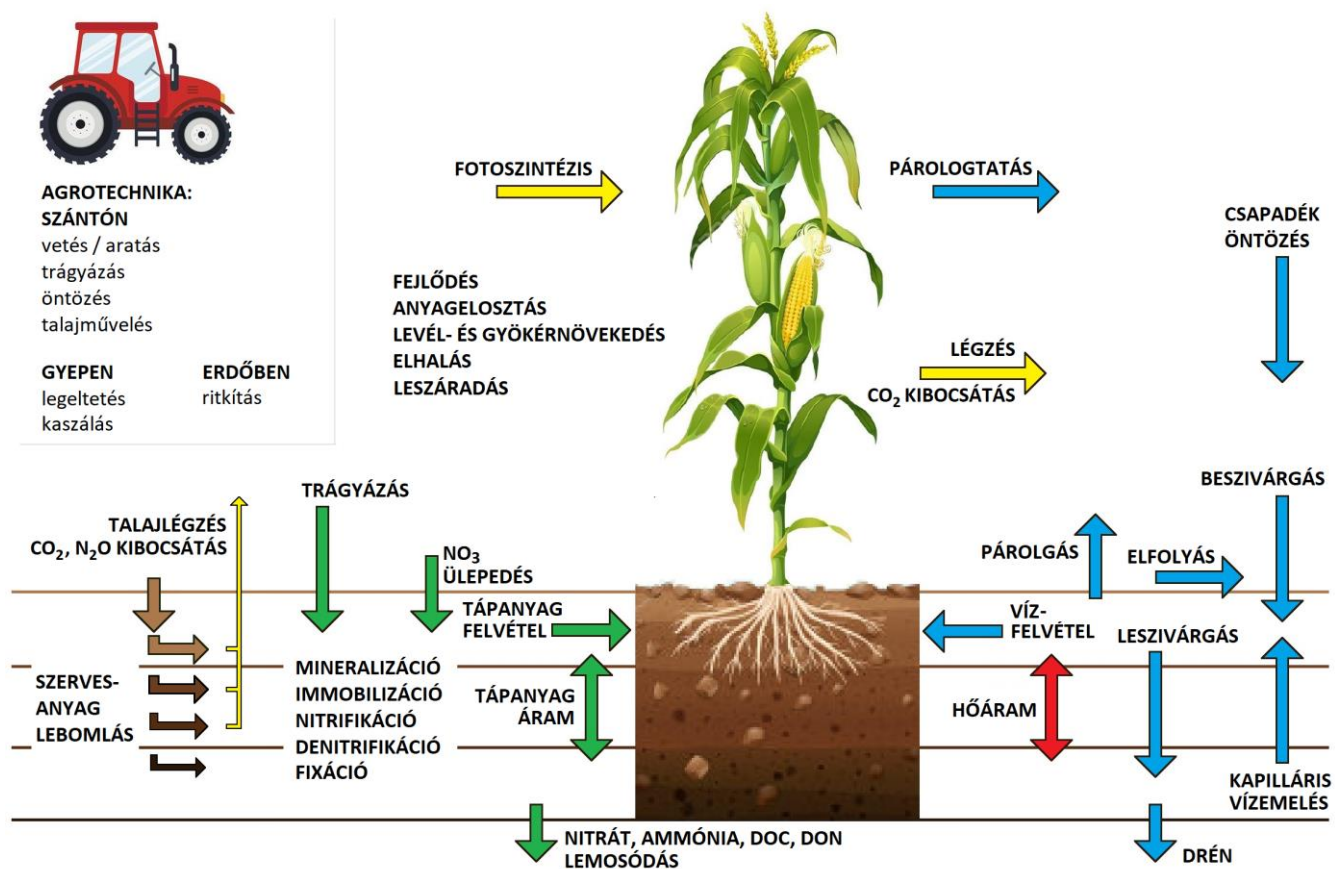
Ahol: Y a termés mennyisége (t/ha); Y_P a termés eladási ára (Ft/t); S a terület alapú támogatás (Ft/ha); P_C a termelési költség (Ft/ha); F_C a műtrágya ára (Ft/t); F_A a kijuttatott műtrágya mennyisége (t/ha); I_C az öntözővíz ára (Ft/mm); I_A a kijuttatott víz mennyisége (mm/ha).

A termés mennyiségét illetve a kijuttatott öntözővíz mennyiségét a modell határozza meg. A számításhoz szükséges többi adatot az agrár-közgazdasági adatbázisból kérdezi le az AgroMo.

A szimulációs eredmények elemzését illetve megjelenítését az AgroMo rendszer saját adatbázis-kezelőjével illetve térképes megjelenítő moduljával készítettük.

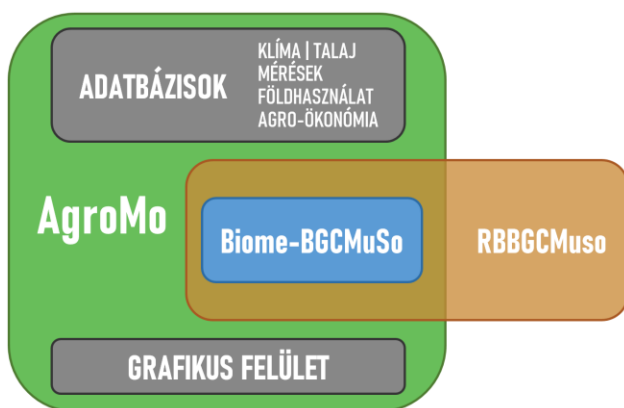
6. A Biome-BGCMuSo modell

...folyamat alapú, szimulációs, biogeokémiai modell, amely a talaj-növény rendszer legfontosabb folyamatainak matematikai (és általában számítógépes) reprezentációja: eljárásokba illetve modulokba szervezett közös vagy parciális differenciálegyenletek és empirikus egyenletek halmazából áll, ahol az egyes eljárások kimenetei más eljárások bemeneteként szolgálhatnak, és a modell egésze képes leírni a rendszer kulcsfontosságú jellemzőinek időbeli mintázatát. A Biome-BGCMuSo modell az alábbi folyamatok és azok kölcsönhatásainak szimulációjára képes, bármely földhasználati típuson (szántó, gyeperdő), napi időléptékben:



7. Az AgroMo modellezési keretrendszer

Az AgroMo modellezési keretrendszer célja, hogy megkönnyítse a Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell fejlesztését és használatát illetve kibővítsé annak felhasználási körét. Az AgroMo teszi lehetővé a modell több szálon történő, párhuzamos futtatását maximálisan kihasználva a számítógép számítási kapacitását⁶. Az AgroMo teszi lehetővé, hogy a modell bármilyen földhasználat-váltás szimulációjára is képes legyen. Az AgroMo több adatbázissal is összekapcsolja a modellt: megkönnyíti a modell-paraméterek kalibrációját, bemenő adatokat biztosít a modell számára és lehetővé teszi a szimulációs eredmények változatos formában történő megjelenítését és elemzését. Az új funkciókat az RBBGCMuso fejlesztő környezetben hozzuk létre és csak körültekintő tesztelés után véglegesítjük az AgroMo rendszerben. Jó példa erre az AgroMo rendszer *Paraméter Analízis - ParAna* felülete, amelyen keresztül elérhető az RBBGCMuso kalibrációs modulja, melynek segítségével a projekt során a Biome-BGCMuSo modell paramétereit megbízható módon beállítottuk.



ParAna
Agromó 1.0

TYPE OF PARAMETER ANALYSIS:

- Parameter Sweep
- Sensitivity Analysis
- Calibration

WORKING DIRECTORY: Martonvasar_maize

ITERATION CYCLES: 100
 (re)create file system

OBSERVATION DATA file: Martonvasar_maize.obs

PARAMETER SET file: Martonvasar_maize_WIDE.set

CONSTRAINT INFO file: constraints_OK.json

PERFORM ANALYSIS

⁶ Adatrácsokra és hosszú idősorokra történő futások esetén különösen fontos a párhuzamosítás, főleg finom térbeli felbontás esetén. Mivel a rendelkezésre álló talaj adatbázis felbontása 100 m, felmerült annak a gondolata, hogy ilyen felbontásban végezzük a szimulációkat. Száz évet szimuláló egyetlen futás ebben a felbontásban még a legjobb gépünkön (AMD Ryzen 7, 24 szál) is fél évet vett volna igénybe a párhuzamosítás ellenére. Így maradtunk a meteorológiai adatok által definiált 10 km-es felbontásnál.