

MEZŐGAZDASÁGI CÉLÚ INTEGRÁLT MODELLRENDSZER MEGVALÓSÍTÁSA

Hollós Roland^(1, 2), Fodor Nándor⁽³⁾ , Hidy Dóra⁽¹⁾,
Marton Tibor⁽³⁾, Bottyán Emese^(1, 2), Barcza Zoltán^(1, 2) 

⁽¹⁾ELTE TTK Kiválósági Tudásközpont, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.

⁽²⁾ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽³⁾MTA ATK, Mezőgazdasági Intézet, 2462 Martonvásár, Brunszvik u. 2.

e-mail: hollorol@gmail.com

Bevezetés

Magyarország területének 85%-a mezőgazdasági művelés alatt áll. Az agrárszektorból származó jövedelem sok százezer család megélhetését biztosítja (KSH, 2017), amely ugyanakkor növekvő bizonytalansággal terhelt az egyre gyakrabban jelentkező szélsőséges környezeti feltételek miatt (Mäkinen et al., 2017). A mezőgazdaság fenntartható fejlődése kiemelt fontosságú feladat, aminek megoldásához több tudományterület szakértőinek összefogására, és világszínvonalú kutatási műhelyek létrehozására van szükség.

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 környezetek, amelyek a mezőgazdasági rendszer lehető legnagyobb szegmensének működését igyekeznek szimulálni, beleértve a rendszer biogeokémiai, agrotechnikai és közgazdasági összetevőit, folyamatait és azok kölcsönhatásait. Segítségükkel megválaszolható többek között az a kérdés, hogy mi lesz a hőmérséklet emelkedésének, a nyári csapadékmennyiség csökkenésének és a légköri CO₂ koncentráció emelkedésének eredő hatása az egyes hasznos növények terméshozamára. Vizsgálható, hogy hol vannak az országon belül azok a területek, ahol megtérülő befektetés lehet az öntözéses gazdálkodás fejlesztése. Számszerűsíthetjük, hogy milyen földhasználati mintázat esetén éri el a maximumát a mezőgazdaság jövedelmezősége a közeljövőben. Az IM-ek felhasználásával gyorsan és hatékonyan tesztelhetők a fenntartható fejlődés biztosítását célzó stratégia javaslatok, amelyek valós körülmények között történő tesztelése vagy eleve nem, vagy csak igen hosszú távon, esetleg csak aránytalanul nagy anyagi ráfordítással lenne lehetséges.

Az IM-ek egyelőre világszerte gyerekcipőben járnak. Az AgroMo projekt¹ keretében a jelenleg fennálló infrastruktúra támogatásával lehetőség nyílik az első hazai IM megalkotására. Jelen tanulmány e kivitelezés alatt álló rendszer felépítését mutatja be. A hangsúly itt az ún. RBBGCMuso szoftveren van, ami a rendszer alapvető vezérlő eleme és integrátora.

Az Integrált Modellrendszer

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kiválósági Tudásközpont (ELTE KT) és a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont (MTA ATK) kutatóinak együttműködésével jelenleg zajlik a hazai fejlesztésű Biome-BGCMuSo biogeokémiai modell mezőgazdasági célú fejlesztése (Hidy et al., 2016). A fejlesztések révén a modell képes a mezőgazdasági kultúrnövények (elsősorban búza és kukorica) produkciójának, termés-mennyiségének és üvegházhatású gáz mérlegének számszerűsítésére. A jelenleg is zajló kutatás keretében a modellt beépítjük egy olyan saját fejlesztésű, grafikus döntéshozói szoftver-

¹ <http://agromo.agrar.mta.hu>

környezetbe (AgroMo), ami lehetővé teszi különböző művelési módok tesztelését, és virtuális kísérletek végrehajtását Magyarország teljes területére. Ugyancsak lehetővé válik különböző korszerű klímaprojekciók beépítése, így a várható éghajlatváltozás hatásainak csökkentését célzó stratégiák kidolgozása is megvalósítható.

Az integrált modellrendszer megvalósulásának elengedhetetlen feltétele, hogy a rendszert definiáló részmodellek képesek legyenek egymással hatékonyan kommunikálni. Mivel ez-ig a részmodellek önálló külön egységet képeztek, a bemeneti és kimeneti adatformátumaik közti különbségek ezt a kommunikációt jelentősen megnehezítették. Az alábbiakban bemutatjuk az AgroMo részeit, amelyek integrációjaként áll elő a döntéshozók és gazdák számára készülő, egyszerű grafikus interfészen keresztül is használható IM.

Biome-BGCMuSo

A Biome-BGCMuSo (v5-től kezdődően) mára egy csatolt biogeokémiai-termény modellként jellemezhető leginkább. A modell megörökölte az eredeti Biome-BGC (Thornton, 2000; Thornton et al., 2002), majd a Biome-BGCMuSo korábbi verzióinak a tulajdonságait (Hidy et al., 2016), és beépítésre került a hazai fejlesztésű 4M modellből (Fodor et al., 2003) több, mezőgazdasági haszonnövényekre jellemző mechanizmus (pl. virágzáskori hőstressz, vernalizáció, csírázás, stb.). A modell megőrizte univerzális jellegét, vagyis továbbra is használható tetszőleges biom modellezésére (fásszárúak, gyepek, cserjések), ami kiváló lehetőséget biztosít arra, hogy a teljes ország növényzetét modellezzük.

A modell kezelése nem egyszerű, mivel a mai napig parancssoros szoftverként használható (Linux, illetve Windows alatt). A felhasználó egy viszonylag hosszadalmas tanulási fázis után tudja csak elkészíteni a modell számára szükséges bemenő adatokat (meteorológia, ökofiziológia fájl, menedzsment lehetőségek, stb.). Ugyancsak problematikus a modelleredmények utófeldolgozása, amelyek sok esetben egyszerű bináris fájlként érhetők csak el, megnehezítve ezzel az adatok elemzését, ábrázolását, további számítások végzését.

Agrárközgazdasági vonatkozások

Az AgroMo keretrendszerben a Biome-BGCMuSo szimulációk eredményeit felhasználva képesek vagyunk „megsejteni” a magyar mezőgazdaság termelékenységének jövőbeli alakulását (hozamok, előállított biomassza, stb.). Ezen termelési eredményeket összegezzük, illetve hatástanulmányt készítünk a klímaszenáriókkal kiegészítve. Előzetes eredményeink alapján a biofizikális környezet változása inkább negatívan érinti Magyarország fő haszonnövényeinek hozamait. Célunk, hogy ezekre a kihívásokra megfelelő adaptációs stratégiát vázoljunk fel, így hozzájáruljunk az agrárszektor közép- és hosszútávú prosperitásához. A projekt gazdasági szekciójának érdeklődése középpontjában a modellezett farm-menedzsment döntések hatásfolyamatai (trajectories) állnak, ami 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.

RBBGCMuso

Ahhoz, hogy a fenti modelleket hatékonyan össze tudjuk kapcsolni, illetve további fejlesztési irányokat tudjunk meghatározni, szükség van egy közvetítő rétegre, amely dinamikusan képes az egyik modell kimeneti változóit a másik modell bemeneti változóiba alakítani. Erre alkalmas eszköz a saját fejlesztésű RBBGCMuso szoftver, amit a Biome-BGCMuSo “R” környezetbe való beágyazásának lehetősége miatt alkottunk meg (Hollós, 2017).

Az R szoftvercsomag egy közismert, nyílt forráskódú, statisztikai célú programozási nyelv,

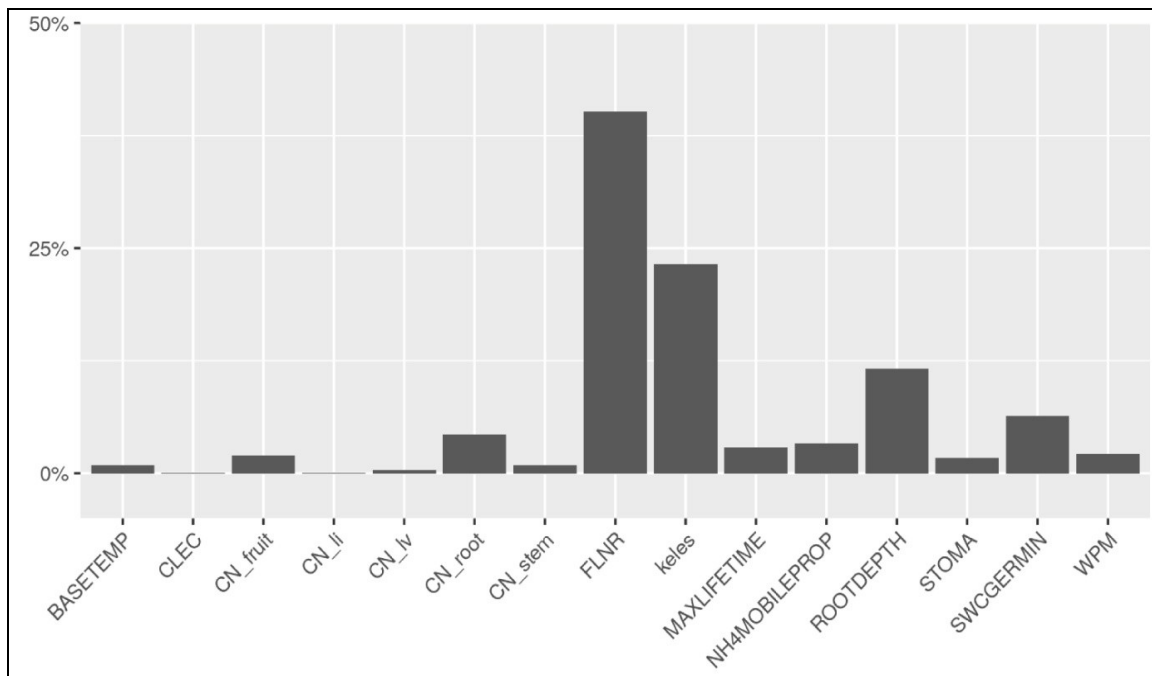
amely sikerességét elsősorban minőségi repozitóriumának – a CRAN-nak –, és szigorú minőségvédelmi előírásainak köszönheti, amely emberi ellenőrzésen túl automatikus ellenőrző rendszereket is magába foglal (R Core Team, 2018). Minden elérhető R kiegészítő csomagnak jól dokumentálnak, valamint tesztelhetőnek, sőt hivatkozhatónak kell lennie. Mindezek eredményeképpen az R-ben írt eljárások, függvények, csomagok hatékonyan illeszkednek a tudományos projektek eszköztárába.

Az RBBGCMuso kialakításának motivációja az volt, hogy az elengedhetetlen utófeldolgozást egyesítsük a modell használatával (előfeldolgozással együtt), és számos olyan kényelmi funkciót tegyünk elérhetővé, ami általában csak nagyon komoly fejlesztés és matematikai tudás árán valósulhat csak meg.

Az R használatának nagy előnye, hogy elérhetővé válnak elő- és utófeldolgozási szinten azok az R csomagok is, amelyek a modellel való későbbi munkák alapjául szolgálhatnak. Lehetőségünk lesz például a Bayes alapú modelloptimalizációra (Trudinger et al., 2007), különböző érzékenységelemzések implementációjára. A továbbiakban az RBBGCMuso R csomagról fogunk részletesebben írni.

RBBGCMuso funkcionalitás, lehetőségek

Az RBBGCMuso alkalmas eszköz a Biome-BGCMuso modell bemeneti és kimeneti paramétereinek biztonságos és hatékony kezelése. Elsősorban már meglévő – előre összeállított – fájlokkal dolgozik, de képes arra, hogy a bemeneti fájlokban található paraméterek többségét a fájlokban átírja, így az R környezetből kontextusváltás nélkül lehetséges a modell kezelése. Az RBBGCMuso felhasználásával nincs többé szükség külső szövegszerkesztőre, az input fájlok manipulálása után a modell manuális meghívására parancssorból, majd az eredmények Excelben (vagy más programnyelven) történő utófeldolgozására.



1. ábra: Az érzékenységelemzés eredménye az RBBGCMuso csomag implementációja alapján. A vízszintes tengelyen az ökofiziológiai bemeneti fájl néhány kiválasztott paramétere olvasható, a relatív érzékenység (y tengely) alapján a Rubisco enzimben tárolt nitrogént (FLNR) meghatározó paraméter és a kelés időpontjának fontossága nyilvánvaló.

Ezek a folyamatok váltak az RBBGCMuso-ban automatikussá. Az elkészült csomag – kihasználva az R programozási nyelv lehetőségeit – mindezeket túl alkalmas a kimeneti adatok gyors vizualizációjára, Monte-Carlo szimulációk elvégzésére “Hit and Run” algoritmus (Smith, 1984) felhasználásával, amely a kalibráció mellett többek között az érzékenységelemzés alapjául is szolgál. A modell-optimalizálás első lépéseként egy lineáris regresszió alapú érzékenységelemzést (Verbeeck et al., 2006) végző függvény is készült (1. ábra).

1. táblázat: A legfontosabb RBBGCMuso függvények listája.

Függvény neve	Funkcionalitás
setupMuso	Inputfájlok, környezeti változók belolvasása, beállítása. A futtatás reprodukálhatóságáért felel.
spinupMuso	Lefuttatja a modellt spinup fázisban, opcionálisan az EPC és a log fájlokat összegyűjti és címkézi egy helyen.
normalMuso	Lefuttatja a modellt normal módban, beolvassa a bináris outputot, szűri szűrőfeltételek alapján. A függvény fejlett hiba-kezeléssel lett beállítva.
calibMuso	A spinupMuso és a normalMuso együttese, továbbá a két futás közti átmenetet is ellenőrzi. Ha a spinup nem fut le, akkor a normal sem. Opcionálisan ki tudja hagyni a spinup függvényt. A kimenetet MS Excelbe/csv-be/txt-be, ods-be, NetCDF-be tudja exportálni.
musoDate	Egy adott beállításnak megfelelően legenerálja azokat a dátumokat, amelyeken a modell futott, szökőévre való tekintettel, vagy anélkül (felkészülve későbbi modellverziókra).
plotMuso	calibMuso, grafikus exportálómódullal kiegészítve.
musoMonte	Hit and Run sampling algoritmust implementáló, a függőségeket a függőségi gráf szomszédsági mátrixába konvertáló mintavételezési modul.
musoQuickEffect	Egy tetszőleges paramétert változtatva egy adott tartományban annak adott számú osztópontjában lefuttatja a modellt, és egy tetszőleges változó adott éves menetének változását vizualizáló eszköz.
parameterSweep	A musoQuickEffect függvényt hatja végre tetszőleges számú paraméteren, majd a kimeneti grafikonokat egyetlen HTML dokumentumba exportálja, ahova a képelemek base64s kódolással kerülnek be, így a dokumentum független lesz a képi hivatkozásoktól.
musoSensi	Lineáris regresszió alapú érzékenységelemzést megvalósító függvény.
updateMusoMapping	A kimeneti változókat és kódjaikat összekötő mátrix generálását végző függvény tetszőleges modellverzió output_map_init.c fájlt alapul véve.
musoMapping	Adott kimeneti változó kódjához tartozó változót megkereső függvény.
musoMappingFind	A kimeneti változók között tudunk ún. “fuzzy matching”-et végezni ezzel a függvénnyel, így könnyűszerrel megtalálhatjuk egy adott, számunkra érdekes változó kódját.

Az 1. táblázatban az RBBGCMuso fontosabb függvényeit soroltuk fel. További dokumentáció az RBBGCMuso csomag súgójában² található. A táblázatban található függvényeket funkcionalitás szempontjából 7 csoportba sorolhatjuk:

1. **futtatási környezet beállítása, reprodukálhatóvá tétel**
(setupMuso, musoMapping, musoMappingFind)
2. **modell futtatása** (spinupMuso, normalMuso, calibMuso)
3. **komplex lekérdezések lehetőségének megvalósítása**
(plotMuso, calibMuso, normalMuso)
4. **kimeneti és bemeneti adatok gyors vizualizációja** (plotMuso)
5. **a modell debugolásának megkönnyítése**
(spinupMuso, normalMuso, calibMuso, plotMuso, musoQuickEffect)
6. **bemeneti adatok dinamikus módosítása**
(normalMuso, calibMuso, musoMonte, musoSensi, musoQuickEffect, parameterSweep)
7. **modelloptimalizálás eszközei**
(musoMonte, musoSensi, musoQuickEffect, parameterSweep).

Az RBBGCMuso funkcionalitásánál azonban jóval fontosabb az az elv, amely mindezt megalapozza. A teljes csomag ugyanis az úgynevezett funkcionális programozási paradigma elvei szerint épült fel (Hughes, 1989). Ez az elv az erre képes nyelvek esetén garantálja, hogy minden egyes függvény „tiszta” legyen, vagyis adott bemeneti adat egyértelműen determinálja minden függvény esetén a kimeneti adatot. A hozzárendelés ez esetben egyértelmű, tehát minden függvény a funkcionális nyelvekben, matematikai értelemben is függvény. Ezzel elkerülhetjük az olyan eseteket, amikor ugyanolyan bemeneti feltételek mellett különböző végeredményeket kapunk, ezzel biztonságossá válik a függvények használata. Ezzel a csomaggal válik igazán reprodukálhatóvá bármilyen modellfuttatás.

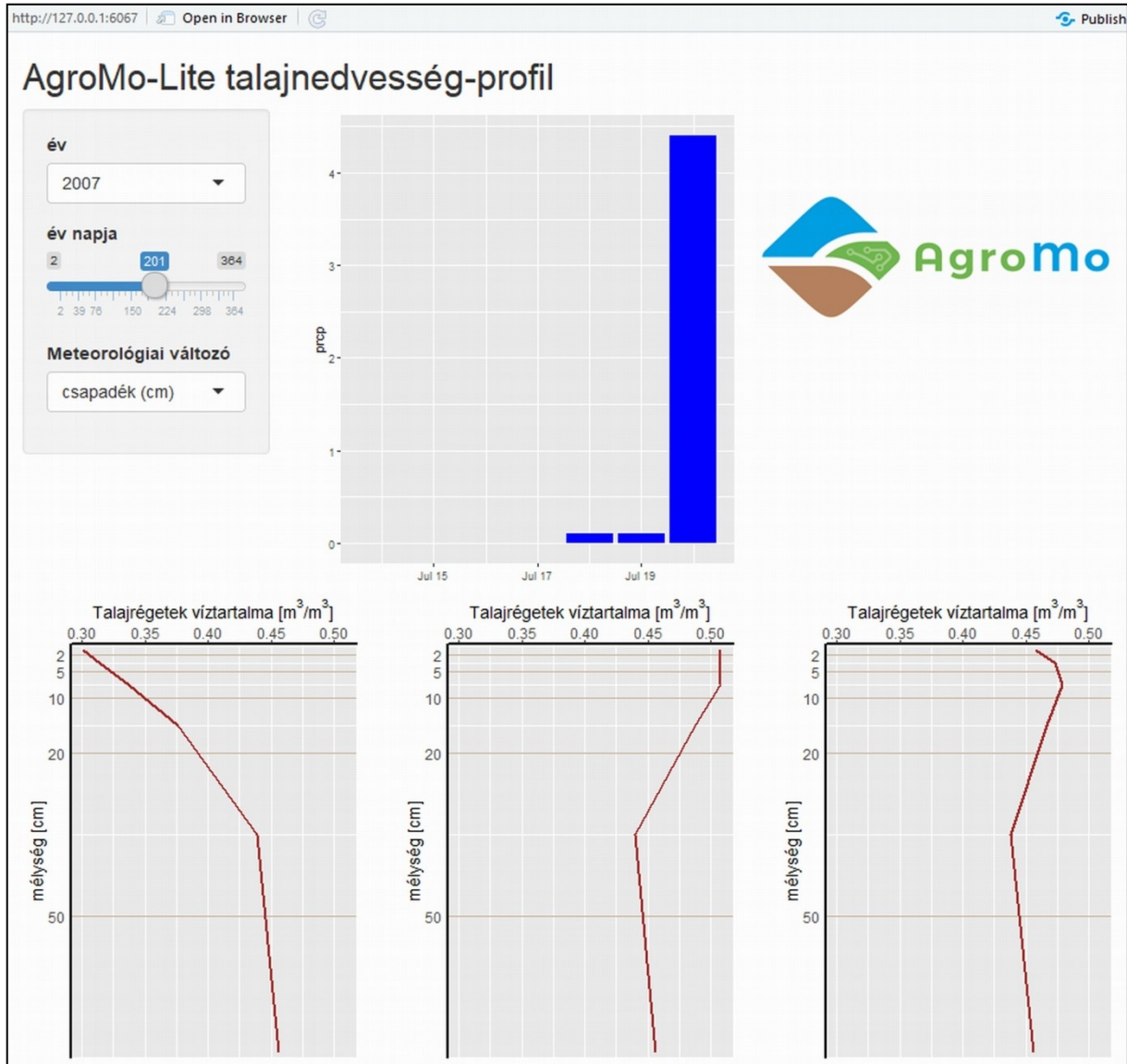
Hosszútávú tervünk, hogy a parancssoros Biome-BGCMuSo modell alapján, az RBBGCMuso környezet rugalmasságát és funkcionalitását kihasználva egy könnyen kezelhető, laikusok számára is hozzáférhető grafikus felhasználói felületet (angolul Graphical User Interface-t, azaz GUI-t) készítünk. A GUI a korszerű operációs rendszerek ismert grafikus elemeivel (gombok, csúszka, grafikonok, stb.) segíti a modell egyszerű használatát, és értelmezését. Nem utolsósorban alkalmas a modell oktatási célból való felhasználására. A GUI lesz a tervezett IM legfelső rétege, amely alatt rendre megtalálható lesz az RBBGCMuso, a HAREM, és legbelül, mint meghajtó motor, a Biome-BGCMuSo legújabb verziója.

A GUI-t egy példával szemléltetjük. Mivel a talaj-növény-légkör rendszer biogeokémiai dinamikájának egyik legfontosabb eleme a talaj vízháztartása, az RBBGCMuso tartalmaz egy olyan grafikus felhasználói felületet, amely egyidejűleg ábrázolja a csapadékot és a talaj különböző rétegeiben lévő víz mennyiségét is egy tetszőlegesen kiválasztott, valamint az azt megelőző, azt követő napon (2. ábra).

A továbbiakban a modelloptimalizációt GLUE (General Likelihood Uncertainty Estimation; Prihodko et al., 2008) módszer alapú kalibrációval tervezzük megvalósítani, ahol a kapcsolódó függvény az RBBGCMuso csomag része lesz.

Az RBBGCMuso szoftver lehetőséget nyújt a Biome-BGCMuSo modell egyszerű, de hatékony használatára, és emellett természetesen tudományos célra is felhasználható, ami nagyban segíti a biogeokémiai modellek alkalmazását és fejlesztését.

² <https://github.com/hollorol/RBBGCMuso>



2. ábra: Talajnedvesség-profil GUI az RBBGCMuso-ban. Az ábrán 7 egymást követő nap csapadékmennyisége látható (felül középen, 2007. július 14–20), és 3 nap során a talajnedvesség-profil alakulása (alsó sor, 2007. július 19–21).

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Széchenyi 2020 program, Magyarország Kormánya és az Európai Regionális Fejlesztési Alap támogatja (GINOP-2.3.2-15-2016-00028).

Hivatkozások

Ewert, F., Rötter, R.P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., van Ittersum, M.K., Janssen, S., Rivington, M., Semenov, M.A., Wallach, D., Porter, J.R., Stewart, D., Verhagen, J., Gaiser, T., Palosuo, T., Tao, F., Nendel, C., Roggero, P.P., Bartosová, L., Asseng, S., 2015: Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. *Environmental Modelling and Software*, 72: 287–303. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003>

- Fodor, N., Máthéné-Gáspár, G., Pokovai, K., Kovács, G.J., 2003: 4M-software package for modelling cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 18: 389–393. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00126-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00126-0)
- Hidy, D., Barcza, Z., Marjanović, H., Ostrogović Sever, M.Z., Dobor, L., Gelybó, G., 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 v4.0: Summary of improvements and new modeling possibilities. *Geoscientific Model Development*, 9: 4405–4437. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4405-2016>
- Hollós, R., 2017: RBBGCMuSo: egy ökoszisztémamodell kiterjesztése. Szakdolgozat. Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar. Témavezető: Dr. Lóczi Dénes.
- Hughes, J., 1989: Why functional programming matters. *The Computer Journal*, 32(2): 98–107. <https://doi.org/10.1093/comjnl/32.2.98>
- KSH, 2017: A mezőgazdaság szerepe a nemzetgazdaságban. Elérés: 2017. november 10. <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/mezo/mezoszerepe16.pdf>
- Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K.C., Nendel, C., Gobin, A., Olesen, J.E., Bindi, M., Ferrise, R., 2017: Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research*, 222: 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.008>
- Prihodko, L., Denning, A. S., Hanan, N. P., Baker, I., Davis, K., 2008: Sensitivity, uncertainty and time dependence of parameters in a complex land surface model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148: 268–287. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.08.006>
- R Core Team, 2018: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Retrieved from <https://www.R-project.org/>
- Smith, R.L., 1984: Efficient Monte Carlo procedures for generating points uniformly distributed over bounded regions. *Operations Research*, 32: 1296–1308. <https://doi.org/10.1287/opre.32.6.1296>
- Thornton, P.E., 2000: User's Guide for Biome-BGC, Version 4.1.1. Available online at ftp://daac.ornl.gov/data/model_archive/BIOME_BGC/biome_bgc_4.1.1/comp/bgc_usede_41.pdf
- Thornton, P.E., Law, B.E., Gholz, H.L., Clark, K.L., Falge, E., Ellsworth, D.S., Goldstein, A.H., Monson, R.K., Hollinger, D., Falk, M., Chen, J., Sparks, J.P., 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. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00108-9)
- Trudinger, C.M., Raupach, M.R., Rayner, P.J., Kattge, J., Liu, Q., Pak, B., Reichstein, M., Renzullo, L., Richardson, A.D., Roxburgh, S.H., Styles, J., Wang, Y.P., Briggs, P., Barrett, D., Nikolova, S., 2007: OptIC project: An intercomparison of optimization techniques for parameter estimation in terrestrial biogeochemical models. *Journal of Geophysical Research*, 112: G02027. <https://doi.org/10.1029/2006JG000367>
- Verbeeck, H., Samson, R., Verdonck, F., Lemeur, R., 2006: Parameter sensitivity and uncertainty of the forest carbon flux model FORUG: a Monte Carlo analysis. *Tree Physiology*, 26: 807–817. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.6.807>
-

ORCID

Fodor N.  <https://orcid.org/0000-0002-6460-1767>
Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>