

Nyárültetvények őszi lombszíneződésének vizsgálata három MODIS-színcsatorna alapján

Bede-Fazekas Ákos ^{1,*}, Trásy Krisztina ², Csóka Györgyi ³

¹ Budapesti Corvinus Egyetem, Tájépítészeti Kar, Kert- és Szabadtértervezési Tanszék, Budapest; bfakos@gmail.com

² Ústav zahradní a krajinářské architektury (Kert- és Tájépítészeti Tanszék), Mendelova univerzita v Brně (Brünni Mendel Egyetem), Lednice, Csehország; xtrasy@node.mendelu.cz

³ Budapesti Corvinus Egyetem, Tájépítészeti Kar, Kert- és Szabadtértervezési Tanszék, Budapest; gyorgyi.csoka@gmail.com

Abstract— The paper summarizes a study of fall coloring of a poplar plantation that aims to prepare for building a phenological model on the changing visual value of ornamental plants due to the changing climate of the 21st century. It briefly describes the selection method of the taxon to be studied, that is *Populus × canadensis*, and some aspects of the study area, that is situated in Tiszaroff, Hungary. Then the available sensors and indices of leaf color are studied. Some new formulas for evaluation of leaf coloring based on three color bands of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensor are provided and compared to each other from the point of view of their possibility of being used for predicting the phenological shift and alteration of fall coloring in the future.

Index Terms: fall foliage, ornamental plant, satellite image, passive multispectral remote sensing, phenological model

Összefoglaló— A cikkben egy nemesnyárültetvény őszi lombszíneződésének kutatását összegezzük, mellyel előkészítjük egy – a 21. században várható éghajlatváltozás hatására bekövetkező lombszíneződés-változást elemző – fenológiai modell építését. Bemutatjuk a kutatásba vont taxon (*Populus × canadensis*) kiválasztásának szempontjait, valamint a vizsgálati helyszín (Tiszaroff) kijelölésének fontosabb ismérveit. Áttekintjük a szabadon hozzáférhető adatokat szolgáltató szenzorokat és a lombszínre vonatkozó, korábban publikált, különböző mérőszámokat. A MODIS-szenzor három kiválasztott színcsatornájára építve újabb lombszíneződési mérőszámokat alkotunk, és ezeket kiértékeljük abból a szempontból, hogy várhatóan mennyire alkalmazhatóak az őszi lombszíneződés jövőbeli fenológiai eltolódásának és megváltozásának modellezése során.

Kulcsszavak: őszi lombszín, dísznövény, műholdfelvétel, passzív multispektrális távérzékelés, fenológiai modell

1. Bevezetés

A fenológiai modellek a klíma és a különböző fenofázisok, vagyis az élőlények éves életritmusában tapasztalható állapotok/szakaszok közti kapcsolatnak az algoritmikus megvalósításai, egyik céljuk, hogy a fenofázisok kezdetére és végére predikciót adjanak (Chuine et al. 2003, Cleland et al. 2007, Zhao et al. 2013). A fenológiai modellek jellemzően gazdasági jelentőséggel bíró növényfajok kihajtását, virágzását vagy termésérését vizsgálják, kutatásunk témája ezért kissé szokatlan: dendrológiai szempontból jelentős, ősszel dísztő taxonok őszi lombszíneződésének elemzését mutatjuk be erdészeti nemesnyárfaj (*Populus × canadensis*) példáján keresztül. A kertépítészeti dendrológia szempontjából nagy jelentősége van azon fás dísznövénytaxonoknak, melyek ősszel – jellemzően sárga vagy vörös – intenzív színük által a kerti és szabadtéri kiültetések karakteres elemévé válnak. Mivel az őszi lombszíneződés és lombvesztés kezdetének és végének időpontját leginkább az időjárás határozza meg, így a jövőben e téren változásra számítunk, melyet fenológiai modellel kívánunk elemezni. Ehhez azonban szükség van olyan idősorosan mérhető vagy idősoros adatokból számítható értékre (függő változó), melyet a modell az időjárási adatok (független változó, prediktorok) alapján megjósol, és melyet elméletben megfeleltethetünk az őszi lombszíneződés mértékének. Ezért jelen kutatásunk célja, hogy lombszíneződési mérőszámok megalkotásával megalapozzon egy olyan lombszíneződési fenológiai modellt, amely alkalmas lehet a 21. századi klímaváltozás hatásának vizsgálatára, s így a kertépítészeti dendrológia számára predikciót szolgáltatson az őszi lombdész intenzitásának, kezdeti időpontjának és időtartamának jövőben várható megváltozásáról. E mérőszámokat a közelmúlt adatsorai alapján dolgozzuk ki, és a tervezett fenológiai modellek a predikciós időszakra vonatkozóan a mérőszám értékét jelezhetik előre, mely által következtethetünk a lombszíneződés jövőbeli alakulására.

Napjainkban számos ökológiai vonatkozású kutatás foglalkozik a globális klímaváltozás okaival, folyamatával, valamint az őshonos és termesztett növényfajok fenológiájára, az őshonos és invazív fajok elterjedésére, illetve az ökoszisztéma-szolgáltatásokra és a közösségek összetételére való hatásaival (bővebben lásd Cramer et al. (2014) és Hughes (2000) munkáját). Ugyanakkor igen kevés figyelem irányul a klímaváltozás dísznövényekre kifejtett várható hatására (Bede-Fazekas 2011), beleértve a dísznövénytaxonok vitalitását, díszértékét és potenciális telepíthetőségi területét érintő kérdéseket egyaránt. A tájépítészeti kutatások számos olyan kérdést vetnek fel és próbálnak megválaszolni, melyek a klímaváltozás és tájépítészet kétirányú kapcsolatát tárják fel (Bede-Fazekas 2010), beleértve a mérséklés (mitigáció) és alkalmazkodás (adaptáció) kerti,

szabadtéri, települési és térségi léptékű eszközkészletét, köztük a változó éghajlatra reflektáló dísznövény-alkalmazási megoldásokat. E kérdéskörből a szerzőket jelenleg főként az foglalkoztatja, hogy szabadon hozzáférhető távérzékelte adatokra alapozva miként lehet modellezni dísznövények őszi lombszíneződésének jövőbeli változását. Legjobb tudásunk szerint ilyen irányú kutatásokat mindeztáig hazánkban nem publikáltak (publikálatlan projekt a témában az 81979 azonosítójú OTKA-kutatás (OTKA 2015)). Mivel a lombszíneződés hosszának és intenzitásának nincs érzékelhető mértékű gazdasági jelentősége (ha a lombvesztés városökológiai hatását nem számítjuk), a növényfenológiai modellek szinte kivétel nélkül az erdészeti és kertészeti taxonok – beleértve a szőlőt és egyéb gyümölcsstermő növényeket – rügyfakadását, virágzását és termésérését vizsgálják.

Mivel az időjárás – több más tényezővel együtt – befolyásolja a növények fejlődését, a klímaváltozás várhatóan jelentős hatást fog kifejteni a növényfajok fenológiájára (Cleland et al. 2007). Az éghajlat megváltozása emellett előidézheti a fajok genetikai állományának és elterjedésének (horizontális és magassági) megváltozását, valamint a természetes életközösségek felbomlását és az ökoszisztéma-szolgáltatások csökkenését is (Hughes 2000, Kovács-Láng et al. 2008, Czúcz 2010, Peñuelas et al. 2013). Ugyanakkor mindezek közül kiemelkedik a fenológiai változás, mely a klímaváltozás egyik leghatékonyabb indikátora (Parry et al. 2007).

Számos kutatás megerősítette az éghajlatváltozás levélfenológiára és a vegetációs időszak hosszára kifejtett hatását (Menzel és Fabian 1999, Chmielewski és Rötzer 2001, Linderholm 2006), továbbá számos fenológiai modellt építettek az elmúlt évtizedben (többek között Vitasse et al. 2009, Delpierre et al. 2009, Vitasse et al. 2011, Zhang és Goldberg 2011). Meg kell jegyezni ugyanakkor, hogy a levelek színeződésének és öregedésének modellezése máig nagy kihívást jelent (Delpierre et al. 2009). A kutatások sokkal több figyelmet fordítanak a vegetációs időszak várható megnyúlására, mint a növekedés leállítására és az őszi lombvesztésre (Hänninen és Tanino 2011). A téma részletes áttekintéséhez többek között lásd Cleland et al. (2007) munkáját.

2. Módszertan

2.1. Műholdfelvételek

A kutatás előkészítése során számba vettük a legjelentősebb szabadon elérhető szenzorokat, amelyeket az 1. táblázatban sorolunk fel és jellemzünk a fontosabb – felbontással és rendelkezésre állással kapcsolatos – szempontok szerint.

szenzor neve	szenzor teljes neve	térbeli felbontás	időbeli felbontás	felvételek ideje
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	15–60 m	16 nap	2000–
EO-1 ALI	Advanced Land Imager	30 m	16 nap	2001–
EO-1 Hyperion	~Hyperspectral Imager	30 m	16 nap	2000–
LANDSAT MSS	Multispectral Scanner	80 m	16–18 nap	1972–1983, 1982–1992, 2012–2013

LANDSAT TM	Thematic Mapper	28,5 m	16 nap	2011.11.–2013.05.
LANDSAT ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus	30 m	16 nap	1999–
LANDSAT OLI	Operational Land Imager	100 m	16 nap	2013.04.–
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	250–1000 m	1–16 nap	2000–

1.táblázat A kutatás előkészítése során számba vett legfontosabb szenzorok neve, a rövidített nevek jelentése, a szenzorok térbeli és időbeli felbontása, és a felvételi időszakok (USGS 2015)

A megfelelő felvételek kiválasztása során fontos szerepet játszott azok időbeli és térbeli felbontása. Az időbeli felbontást tekintve meghatározó az az intervallum, amely a levelek sárgulásának kezdetétől a lombvesztésig tart. Mivel ez néhány hét (hónap), ezért minél nagyobb az időbeli felbontás, annál pontosabban lehet meghatározni a lombszíneződés ütemét. A térbeli felbontás tekintetében is természetesen a minél nagyobb felbontású képeket érdemes beszerezni, hiszen minél kisebb a felbontás, annál nehezebb az aival összemérhető kiterjedésű, vizsgálatba vonható területet találni. A mért tartományok közül a vizsgálat szempontjából leginkább szükségesek a látható színtartományba eső csatornák. A fenti megállapítások alapján a MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, közepes felbontású képalkotó spektrométer) szenzor "Surface Reflectance Daily L2G Global" termékét (rövidítése: "MOD09GA") választottuk ki. Hasonló vizsgálatokhoz a MODIS más termékeit is alkalmazták már, pl. Zhang et al. (2012). A MODIS egy olyan műszer, melyet a Terra (EOS AM) és Aqua (EOS PM) műholdakra is felhelyeztek (MODIS 2014). A MOD09GA termék 500 méter térbeli és egy napos időbeli felbontással érhető el – többek között az Earthexplorer (2014) felületéről –, hét spektrális tartománya közül a vizsgálat szempontjából a következő három színcsatorna tartalmaz használható információt: 1-es csatorna (620–670 nm, narancssárga-élénkpiros, továbbiakban "R", mint red), 3-as csatorna (459–479 nm, kék-türkiz, továbbiakban "B", mint blue) és 4-es csatorna (545–565 nm, élénkzöld-sárgászöld, továbbiakban "G", mint green) (MOD09GA 2014). A MOD09GA termék a visszaverődési együtthatót (reflectance) adja meg (illetve annak 10000-szeresét), mely mértékegység nélküli – a visszaverődés és a besugárzás viszonyát kifejező – arányszám, jellemzően 0 és 1 közé (0 és 10000 közé) esik (MOD09 2015).

2.2. Vizsgálati terület kiválasztásának szempontjai

A vizsgálati területtel szemben számos kritériumot támasztottunk, többek között megfelelő taxonból álló, kellő homogenitású, ideális életkorú és megfelelően nagy kiterjedésű ültetvénynek kellett lennie. A következőkben ezeket a szempontokat járjuk körbe.

Mivel kutatásunk a lombszíneződésre elsősorban mint tájépítészeti és dísznövény-alkalmazási szempontból jelentős folyamatra tekint, így a megfelelő taxon kiválasztása során a honos és/vagy erdészeti fafajok népes csoportja helyett a hazánkban telepíthető, fatermetű dísznövények – így is meglehetősen tág – halmazát szűkítettük aszerint, hogy mely taxonok hajlamosak ősszel intenzíven színeződni (Galántai és Tóth (2001) alapján). A cserjéket a kutatásba nem vontuk be,

hiszen állományuk jellemzően takart. A dísnövények telepítésére jellemző szoliter, sorban álló vagy kisebb csoportot képző kiültetések a szabadon hozzáférhető, kutatásunkba vonható távérzékelt adatok alapján kis kiterjedésük miatt nem elemezhetőek. Mindebből következik, hogy csak nagyobb, összefüggő felületek vizsgálatára nyílik lehetőség, melyet erdészeti telepítések között kereshetünk. Az ősszel színeződő dísnövények csoportját összemetsztük azon, erdészek által hazánkban gyakorta telepített taxonok listájával, melyekből nagyobb, homogén ültetvények (is) található Magyarországon. A homogenitás (beleértve a taxon és az életkor homogenitását) a vizsgálati adatok könnyebb elemzése és tisztább eredmények megállapítása céljából szükséges. A legtöbb taxon jellemzően egyes természetes állományokat képez, vagy egyenesen telepítik, így nem használhatók megfelelő kutatási alanyként (Badeck et al. 2004). Bede-Fazekas et al. (2015) közlik a kutatás kezdetén összegyűjtött lehetséges fajok listáját, melyek közül csak néhány felelt meg az előbb sorolt feltételek mindegyikének. Ezek a közönséges bükk (*Fagus sylvatica*), a nyár (*Populus*) hibridek és fajták, a vörös tölgy (*Quercus rubra*) és a fehér akác (*Robinia pseudoacacia*), melyek közül végül a nemenyárrakra esett a választásunk.

A vizsgálandó növényzet optimális kora a kiválasztott taxon életciklusától függően eltérő lehet, de a leginkább kívánatos a középkorú állomány, így egy több éves időszakot érintő fenológiai adatsor elemzése során várhatóan nem az életkor, hanem a klíma változásának nyomait mérhetjük. Kutatásunkban így a 20 és 40 év közötti nemesnyár-telepítéseket vontunk vizsgálat alá. Nem szerencsés a nagyon fiatal állomány kiválasztása, mivel az egyedek lombkoronája még nem fejlődött ki teljesen, így az alatta lévő aljnövényzet is szerepet játszik a felülnézeti képeken, ami módosíthatja az eredményt a színeződés idejének és intenzitásának meghatározásakor. Az idős állomány vizsgálata szintén nem ad releváns képet, hiszen az idősödő egyedek koronája ritkásabb, egészségi állapota kérdéses. Mindemellett a homogén nyárültetvényeket jellemzően rövid vágásfordulóval termelik, így idős, homogén, nagy kiterjedésű ültetvények valószínűleg nem is találhatóak hazánkban. A vizsgálati terület kiválasztásakor természetesen figyelembe kell venni, hogy az állomány milyen életkorú volt a korábbi elérhető felvételek készítésének időpontjában.

2.3. Adatok feldolgozása

A kutatás két fő lépése az adatok összerendezése és előkészítése, majd pedig az adatelemzés során a megfelelő mérőszám előállítás. Előbbit a következő szakaszokra osztottuk. (1) Az ismertetett szempontoknak megfelelően a nyárasokat vontuk be a kutatásba, így az OEA (2014) adatbázisából leválogatott nyárasokból indultunk ki (NÉBIH 2014), (2) azok közül kiemelve a középkorú, nagyobb területű ültetvényeket. Az alkalmasnak tűnő területekről (3) látható tartományba eső műholdképet (Google 2014) és (4) erdészeti adatokat (taxonok, elegyarányok, erdőrészelek határa) szereztünk (OEA 2014), (5) melyeket egymásra vetítettünk ESRI ArcGIS térinformatikai környezetben. A rendelkezésre álló információk alapján kiválasztottuk (6) a vizsgálati területet és (7) a vizsgálati időszakot, (8) majd letöltöttük az Earthexplorer (2014) felületéről a MOD09GA termékét a kiválasztott vizsgálati időszakra (2011.08.01.–2011.11.30., indoklását lásd a 3.1. fejezetben). (9) Emellett beszereztük ugyanezen időszakra vonatkozó, napi felbontású minőségi információkat (quality state, QS), melyek 1 km-es felbontásban fedte le a vizsgálati területet. A minőségi információk tartalmazzák azokat az adatokat, amely az adott területre eső műholdképek felhasználhatóságára hatással lehetnek, mint amilyen a felhőzettség, a tűz jelenléte, a légköri aeroszolmennyiség, valamint a felszín hó- vagy jégborítottsága és jellege (vízfelület/szárazföld). (10) Mindkét adatsort feldolgoztuk az ESRI ArcGIS térinformatikai szoftver Data Management, Conversion, Analysis és Spatial Analyst eszközkészleteinek Extract Subdataset, Clip, Raster to Point és Extract Multi Values to Point függvényeivel, így a letöltött adatsorokból az 2. táblázatban

szereplő rétegeket nyertük ki napi felbontásban arra a kiválasztott pontra, mely a vizsgálati területünkre esett.

réteg neve	tartalom	formátum	felbontás
sur_refl_b01	1. színcsatorna (620-670 nm), "R"	16 bites, előjeles egész (-100-16000)	500 m
sur_refl_b03	3. színcsatorna (459-479 nm), "B"	16 bites, előjeles egész (-100-16000)	500 m
sur_refl_b04	4. színcsatorna (545-565 nm), "G"	16 bites, előjeles egész (-100-16000)	500 m
State_1km	minőségi információk	16 bites pozitív egész (bitsor, LSB 0)	1 km

2.táblázat A kutatás során a MOD09GA termékből felhasznált rétegek neve, tartalma, formátuma és horizontális felbontása

A következő lépésben (11) létrehoztuk az idősoros adattáblázatot, mely a vizsgálati időszak minden napjára vonatkozóan (sorok/rekordok) tartalmazta a három színcsatorna értékét és a minőségi információkat. (12) Az adatsort a továbbiakban Microsoft Office Excel táblázatkezelő szoftverrel dolgoztuk fel, melynek során kinyertük a minőségi információkból a "cloud state" nevű kétbites és a "internal cloud algorithm flag" nevű egybites paramétereket. (13) A színcsatornákból származó adatok elemzésekor figyelmen kívül hagytuk azokat a napokat, amikor a "cloud state" paraméter értéke "cloudy" /01/ vagy "mixed" /10/, vagy az "internal cloud algorithm flag" paraméter értéke "cloud" /1/ volt, hogy ne kerüljön feldolgozásra a felhőzetről visszavert sugárzás. (14) Elhagytunk továbbá az adatsorból három olyan napot (2011.09.12., 2011.11.08. és 2011.11.17.), melyek kiugró értékeket tartalmaztak. (15) A színcsatornák értékeit a [0;1] intervallumba konvertáltuk az 1. egyenlet szerint, ahol A az eredeti [-100;16000] intervallumba eső érték, A' a konvertált érték.

$$A' = \frac{A+100}{16100} \quad 1. \text{ egyenlet}$$

2.4. Lombszíneződési mérőszám

Számos olyan, fenológiai elemzésekhez is jól használható mérőszám áll rendelkezésünkre, amelyeket távérzékelt adatokból képezhetünk (Cleland et al. 2007), és többségük alkalmas a vegetációs időszak, kihajtás és a levelek hullásának vizsgálatára, ugyanakkor ezen mérőszámok nem igazán alkalmasak a levelek színeződésének elemzésére. A zöldesség mérésére széles körben használt mérték az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Az EVI (Enhanced Vegetation Index) a megfigyelt vegetáció alatt lévő talajfelszínből, valamint a levegő részecskéi által visszavert fényből származó torzítást javítja (MOD13 2014), és így az NDVI-nél alkalmasabb a takaratlan talajfelszín és a vegetáció elkülönítésében (Zhang et al. 2003). Míg a LAI (Leaf Area Index) az egységnyi felületet takaró levélfelületet méri, a FAPAR/fPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) a fotoszintézis számára hasznos hullámhossztartományban megfigyelt, a vegetáció által elnyelt sugárzás számszerűsíti (MOD15 2014). Megemlíthetjük továbbá az ExGw (Excess Green Index) nevű mérőszámot, melyet a mezőgazdaságban hasznosítanak mint az RGB-színcsatornák alapján a fedetlen talajfelszín a vegetációtól elkülöníteni képes mutatót. E mérőszám az erdészeti fenológiai vizsgálatokban is alkalmazható (Richardson et al. 2009). Számos előnyük ellenére a felsorolt mérőszámok helyes interpretálása máig kihívást jelent (Cleland et al. 2007), főként, ha őszi lombszíneződés vizsgálatára kívánjuk használni azokat. A felsorolt mérőszámok mindegyike a

klorofillal összefüggésbe hozható zöld szín megkülönböztetésére lett kifejlesztve, és így igen kevésbé alkalmasak az őszi sárga (vörös, bíbor, barna) színek detektálására.

Az elmondottak alapján szükségét láttuk, hogy kidolgozzunk egy vagy több olyan mérőszámot, mely a zöld szín jelenléte/változása helyett célzottan a sárga szín mennyiségét, idősoros adatokon pedig a sárga szín mennyiségének változását képes megjeleníteni, így alkalmas lehet a későbbi, lombszíneződést vizsgáló fenológiai modellek függő változóját szolgáltatni. A mérőszám kialakítása szempontjából a kihívást az jelentette, hogy a sárga szín hullámhossztartományát a MODIS szenzora nem detektálja, így csak a környező hullámhosszok – a korábban bemutatott három színcsatorna – alapján nyílt lehetőség a lombszíneződésre következtetni. A mérőszámok kialakítása során három, egymástól eltérő módszert alkalmaztunk: (1) elméleti (matematikai), (2) gyakorlati (szemrevételezési) és (3) közelítési megoldás. Az elméleti megközelítés során támaszkodtunk Bede-Fazekas et al. (2015) munkájára, amely geometriai levezetéssel jutott el a 2. egyenletben látható, Leaf Coloring Index (LCI) nevű mérőszámhoz. Az R, G és B az egyes színcsatornákat jelentik, részletesen lásd a 2. táblázatban.

$$LCI = 0,5 - 0,5 * B + 0,25 * (R + G) \quad 2. \text{ egyenlet}$$

Az egyenlet jobb oldalának lineáris algebrai műveletekkel történő alakításával jutunk a 3. egyenletben bemutatott mérőszámhoz, így e két mérőszám egymásnak megfeleltethető. A gyakorlati megközelítés során számos, általunk potenciálisan megfélelő mérőszámnak tartott képletet dolgoztunk ki és vetítettünk grafikonra (iteratív módon, az idősoros adatokra vetített grafikon alapján folyamatosan fejlesztve a képleteket), az Eredmények fejezetben bemutatásra érdemes mérőszámokat pedig szemrevételezéssel választottuk ki. A közelítő megoldás során a Microsoft Office Excel Solver bővítményével illesztettünk mérőszámot egy általunk előzetesen kialakított optimális görbéhez, mely 10.24–11.10. időszakban 1 értéket vett fel, az időszak előtt és után 0,1-es lépésközökben lineárisan jutott el a 0 értékhez (10.14-ig és 11.20-tól konstans 0). E görbe természetesen adott év és vizsgálati taxon függvényében – megfigyeléseken alapuló – további pontosítást igényel, jelen célunk a módszer tesztelése és bemutatása volt. A Solver bementi paraméterek értékének előre megadott korlátok közötti változtatásával megtalálja az optimális megoldást azáltal, hogy a modell hibáját minimalizálja, vagyis minden napra kiszámítva a várt és a modellezett érték közti eltérésnégyzeteket, azok összegét mind jobban közelíti 0-hoz. A bővítmény számos alternatív optimalizációs lehetősége közül kutatásunk során a Generalized Reduced Gradient nemlineáris optimalizációs eljárást alkalmaztuk (Fylstra et al. 1998).

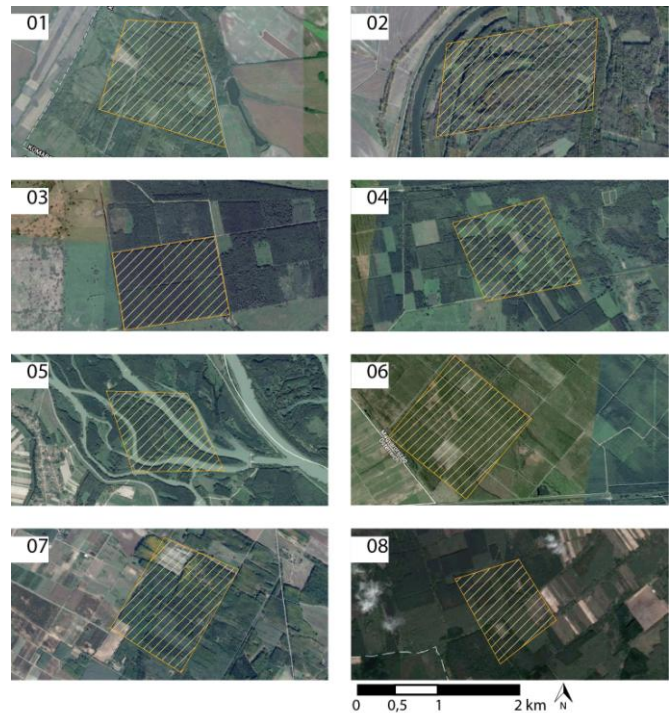
3. Eredmények

3.1. A vizsgálati terület és időszak kiválasztása

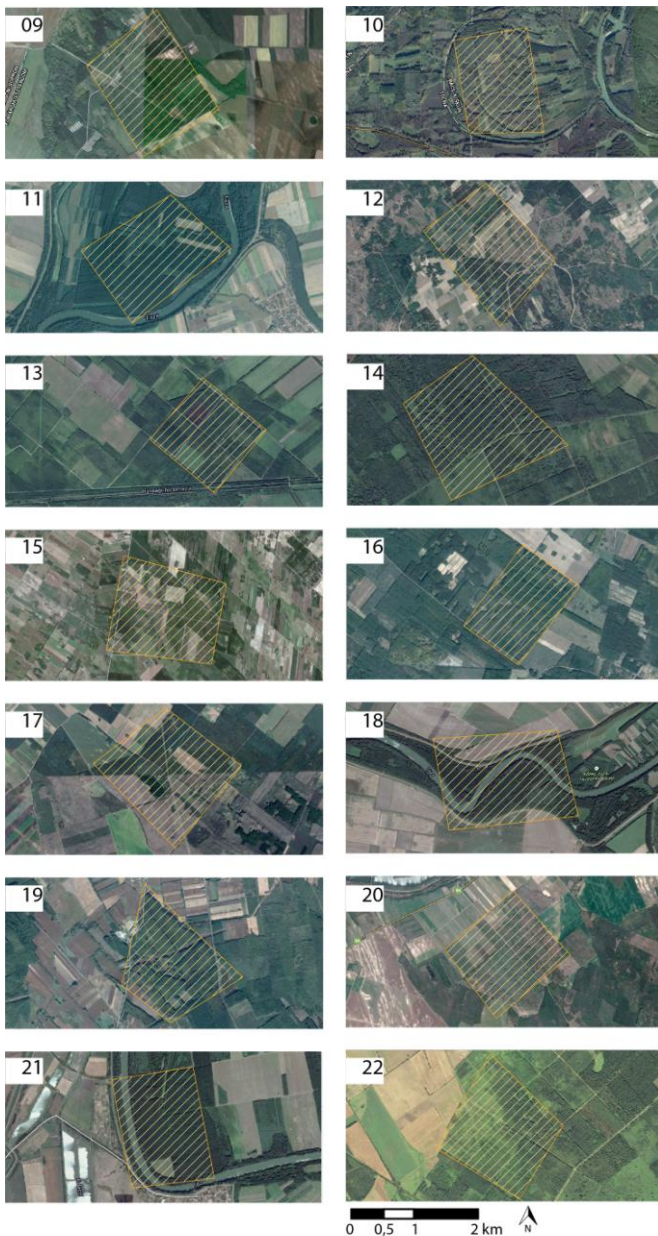
A kutatás során 24 darab, a módszertanban ismertetett szempontoknak megfelelő területet sikerült kijelölnünk Magyarország határain belül, melyeket – lépték szerint csoportosítva – az 1a., 1b. és 1c. ábrákon mutatunk be. A lehetséges vizsgálati helyszínek közül a homogenitás, életkor, kiterjedés és a műholdfelvétel raszterközéppontjainak rendszere alapján az 1b. ábrán 21-es sorszámmal feltüntetett területet választottuk ki, mely Jász–Nagykun–Szolnok megyében, a Tisza partján, Tiszaroff közigazgatási területén található. A vizsgálati területre a 750 912,325 m K és 229 521,654 m É EOV-koordináták által meghatározott középpontú cellából nyertük a színcsatornák adatait, és a 750 727,117 m K és 229 753,164 m É EOV-koordináták által meghatározott középpontú cellából nyertük a felhőzöttségre vonatkozó információkat (2. ábra). A színcsatornák adatai döntően a 23-as, kisebb részben pedig a 22-es erdőtagot fedik le, melyekben található erdőrészek zömében

100%-os (elegyetlen) Pannónia-nyár (*Populus × canadensis* 'Pannonia' syn. *Populus × canadensis* 'H 490-3'), illetve kisebb részt olasz nyár (*Populus × canadensis* 'I 214') alkotta ültetvények. A Pannónia-nyár hazánkban jelenleg a legnagyobb természetesi területtel bíró taxon (Borovics 2014). Az olasz nyárhoz hasonlóan fiatal korban erőteljesen növekszik és nőivarú (Tóth 2012, Borovics 2014). Míg az olasz nyár későn hulló lombja alig színeződik (Tóth 2012), addig a Pannónia-nyár középkésőn (október második fele) hulló levélzete zölde-aransárga (ERTI 2015). Mindkét fajta nagy alkalmazkodóképességű a termőhely tekintetében (Tóth 2012, Borovics 2014, ERTI 2015).

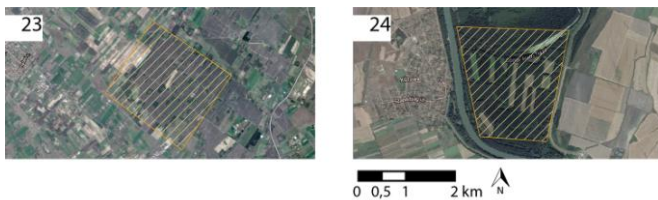
A vizsgálati területen található erdők elsődlegesen gazdasági rendeltetésűek és állami tulajdonúak (OEA 2014), természetvédelmi oltalom alatt nem állnak, de Natura2000-es védettségi övezetbe tartoznak (OEA 2014, TIR 2015).



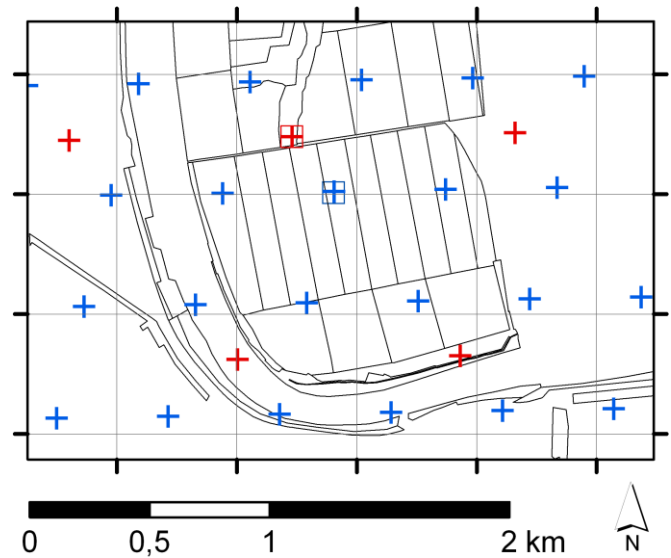
1a.ábra A kutatásba vonható területek (sárga sraff) és környezetük a látható tartományba eső műholdfelvételen (Google 2014). Az állományok a következő települések közigazgatási területére esnek: 01 – Bábolna, 02 – Bába, 03 – Csorna, 04 – Csorna, 05 – Dunasziget, 06 – Jánossomorja, 07 – Mikebuda, 08 – Nyírlugos. A más léptékben ábrázolt helyszínek az 1b. és 1c. ábrán láthatóak.



1b.ábra A kutatásba vonható területek (sárga sraff) és környezetük a látható tartományba eső műholdfelvételen (Google 2014). Az állományok a következő települések közigazgatási területére esnek: 09 – Bábolna, 10 – Baja, 11 – Besenyszög, 12 – Bócsa, 13 – Jánossomorja, 14 – Kimle, 15 – Kiskunmajsa, 16 – Mikebuda, 17 – Nagykőrös, 18 – Nagykőrű, 19 – Petneháza, 20 – Sükösd, 21 – Tiszaroff, 22 - Újrónafő.



1c.ábra A kutatásba vonható területek (sárga sraff) és környezetük a látható tartományba eső műholdfelvételen (Google 2014). Az állományok a következő települések közigazgatási területére esnek: 23 – Kiskunmajsa, 24 – Tiszabő.

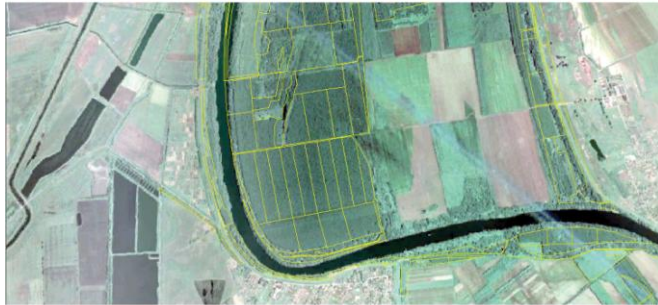


2.ábra A tiszaroffi vizsgálati terület erdőrészeleteinek határa (fekete), az 500 m-es felbontású műholdkép (kék kereszt), valamint az 1 km-es felbontású minőségi információkat tartalmazó raszter (piros kereszt) celláinak középpontja. Az elemzéshez kiválasztott cellák középpontját keretezéssel emeltük ki. A segédrács 500 méteres osztásközű.

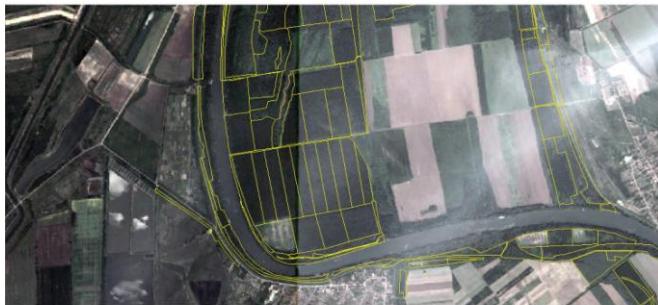
A 3. ábra szemlélteti a vizsgálati terület látható szintartományba eső műholdfelvételeit négy eltérő időszakban. A képek alapján megállapítható, hogy a nyárültetvény 2013-ra – mesterséges vagy természetes folyamatok miatt – ritkulásnak indult, több helyen a lombkoronák alatti alsóbb szintek (gyepszint és talajfelszín) látszanak, mely a kutatásunk szempontjából kedvezőtlen. Így a vizsgálati időszakot az utolsó, még bizonyosan szépen záródott lombkoronájú állapot évében, 2011-ben jelöltük ki, így 2011.08.01.–2011.11.30. közötti időszakot elemeztük. Az állomány ekkor 25 éves volt, mely megfelelt feltételeinknek.



2002



2009



2011



2013



$$I_1 = \frac{R+G}{2} - B \quad 3. \text{ egyenlet}$$

Gyakorlati megközelítéssel képeztük a 4., 5. és 6. egyenletben bemutatott, I_2 , I_3 és I_4 névvel jelölt mérőszámot. Az I_3 képletében található "c" szorzó az I_2 és I_3 könnyebb összevethetőségét szolgálja, $c = 10$ esetén a két görbe egymáshoz közeli értékeket vesz fel.

$$I_2 = 0,5 - \frac{|R-G|}{R+G+B} \quad 4. \text{ egyenlet}$$

$$I_3 = 0,5 - c * |R - G|, \quad c := 10 \quad 5. \text{ egyenlet}$$

$$I_4 = \frac{R-B}{R+B} \quad 6. \text{ egyenlet}$$

Közelítéssel megoldással állt elő az I_5 nevű, a 7. egyenletben bemutatott mérőszám. Kialakítása során az (R-G), (R-B) és (G-B) különbségek együtthatóit optimalizálta a Solver úgy, hogy a különbségek lineáris kombinációja a lehető legjobban közelítse az általunk várt, 2011.10.24 és 2011.11.10. között tetőző görbét. Az optimalizációs algoritmus a (G-B) koefficiensét 0-nak találta.

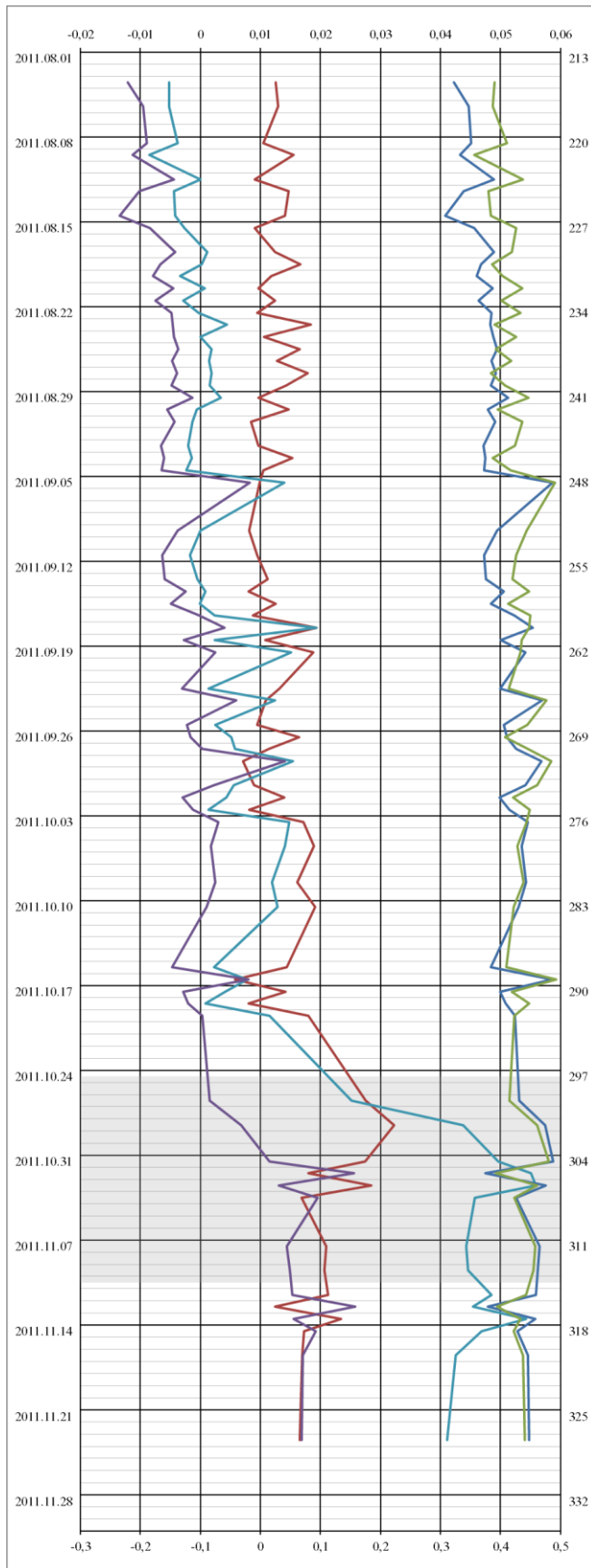
$$I_5 = 1,5448 * (R - G) + 1,6405 * (R - B) \quad 7. \text{ egyenlet}$$

Az öt mérőszám vizsgálati időszakunkra vonatkozó görbéjét a 4. ábrán mutatjuk be.

3.ábra A tiszaróffi vizsgálati terület és annak tágabb környezete látható tartományba eső műholdfelvételen (Google 2014), és az erdőrézszletek határa. A felvételek 2002.08.15-én, 2009.05.21-én, 2011.05.21-én és 2013.08.05-én készültek.

3.2. Lombszíneződési mérőszám

A módszertan ismertetésekor bemutatott három megközelítés öt olyan mérőszámot eredményezett, melyeket bemutatásra és összevetésre érdemesnek tartunk. A Bede-Fazekas et al. (2015) által bemutatott, koordináta-geometriai levezetéssel nyert LCI nevű lombszíneződési mérőszámból lineáris transzformációkkal képeztük a 3. egyenletben bemutatott, I_1 nevű mérőszámot. A 3–7. egyenletekben az R, G és B az egyes színcsatornákat jelentik, részletesen lásd a 2. táblázatban.



4. ábra Az öt mérőszám (I_1 : vörös, I_2 : kék, I_3 : zöld, I_4 : lila, I_5 : türkiz) értékének alakulása a vizsgálati időszakban (2011.08.01.–2011.11.30.). A jobb oldali skála a napok éven belüli sorszámát

jelenti, a felső, dimenzió nélküli tengely az I_1 és I_5 , míg az alsó, szintén dimenzió nélküli tengely az I_2 , I_3 és I_4 értékeinek skálája. Elsősorban a szürkével kiemelt lombszíneződési időszakban (10.24–11.10) várjuk a görbék kiugró értékét.

4. Következtetések és összegzés

A bemutatott mérőszámok némelyike alkalmas lehet a későbbiekben dísznövények őszi lombszíneződését elemző fenológiai modell építésére. Fellelhetőek olyan különbségek az egyes mérőszámok között, melyek mind közül kiemelik az I_1 jelűt. Alkalmazása mellett szól, hogy matematikailag levezetett módon, a rendelkezésre álló három színcsatorna adataiból a lehető legjobban közelíti a sárga színt, és az értékek október végi emelkedése mellett azok novemberi csökkenése is megfigyelhető (I_5 -höz hasonlóan), mely feltétlen szükséges olyan modellek építésekor, melyek nem csupán a sárgulás kezdetét, hanem végét/időtartamát is vizsgálni szeretnék. Előnye továbbá, hogy a vizsgálatba vont összes színcsatornából származó információt felhasználja, ellentétben az I_3 és I_4 mérőszámmal, melyek a B, illetve a G csatornát nem veszik figyelembe. Az I_5 nevű mérőszám jól látható kiugrást mutat az intenzív lombszíneződés időszakában, ugyanakkor előállítási módjából következően nehezen értelmezhető és alátámasztható a képlete. Az I_2 és I_3 görbéje igen hasonló módon alakult a vizsgálati időszakban, közülük az I_2 jelű mérőszám alkalmasabbnak tűnik a sárgulás elemzésére, hiszen a B csatornát is felhasználja és határozottabban megkülönbözteti a vizsgálati időszak két felét egymástól. Az egyes mérőszámok tulajdonságait a könnyebb összevethetőség érdekében a 3. táblázatban összegezzük.

mérőszám neve	előállítás módja	felhasznált csatornák	sárgulás végét mutatja	alkalmazása javasolt
I_1	elméleti	R, G, B	igen	igen
I_2	gyakorlati	R, G, B	nem	nem
I_3	gyakorlati	R, G	nem	nem
I_4	gyakorlati	R, B	nem	korlátozottan a G színcsatorna hiánya miatt
I_5	közelítéses	R, G, B	igen	korlátozottan, pontosabb kalibráció esetén igen

3. táblázat A kutatás során alkotott mérőszámok összevetése az előállítás módja és a felhasznált színcsatornák alapján, mérlegelve, hogy a vizsgálati időszakban képes volt-e kimutatni a sárgulás végét, és hogy összességében alkalmas-e későbbi fenológiai modellekbe való beépítésre

A 4. ábrán látható, hogy a különböző mérőszámok különböző időszakra vetítik a sárgulás maximumát. A három gyakorlati megközelítéssel megalkotott képlet (I_2 , I_3 és I_4) az intenzív sárgulást későbbi időszakban ábrázolja, mint az I_1 . Ismerve a vizsgálati területen álló taxonok őszi lombszíneződésének jellemző időpontját elmondhatjuk, hogy az I_1 realisabb eredményt mutat, mint a többi mérőszám. Az I_5 előállítása során lehetőség adódott a csúcs időpontját optimalizálni azáltal, hogy a közelítendő görbét miként határoztuk meg. Fontos kiemelni, hogy ez a megközelítés megteremti a lehetőségét annak, hogy az ősszel különböző színárnyalatba hajló taxonokra különböző mérőszámokat optimalizáljunk.

A szerzők szeretnék felhívni a figyelmet, hogy bár vizsgálatukat mind térben, mind időben erősen behatárolták, a módszertan és az eredmények így is méltók a bemutatásra és elemzésre. Olyan mérőszámokat képeztünk, melyeket később a dísznövények őszi

lombszíneződését vizsgáló fenológiai modellek építéskor függő változóként felhasználhatunk. Fontos ugyanakkor hangsúlyozni, hogy a fenológiai modell építése előtt a kiválasztott mérőszám további tesztelése lehet szükséges. A mérőszám értékét a predikciós időszakra kiszámító fenológiai modellek futtatásával alkalmunk nyílik megvizsgálni, hogy a 21. századi éghajlatváltozás milyen hatást fejt majd ki a lomb sárgulásának ütemére (kezdetére, hosszára) és intenzitására, és a predikciók alapján a tájépítészeti dísznövény-alkalmazás egyes elemeinek megváltoztatására adhatunk javaslatot.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0005 projekt támogatta. A szerzők ezúton szeretnék őszinte köszönetüket kifejezni Magyar Zsoltnak (Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal, Erdészeti Igazgatóság) a gyors és segítőkész adatszolgáltatásért és Zdeněk Martináseknek az önzetlen segítségért.

Irodalomjegyzék

Badeck F.-W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. (2004): Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162, 295–309.

Bede-Fazekas, Á. (2010): Correlations between garden design plant applications and climate change. In: Palocz-Andresen, M., Németh, R. Szalay, D. (szerk.): TÁMOP-Humboldt College for Environmental and Climate Protection. Sopron: University of West Hungary Press. pp. 78–85.

Bede-Fazekas, Á. (2011): Impression of the global climate change on the ornamental plant usage in Hungary. *Acta Universitatis Sapientiae Agriculture and Environment*, 3, 210–220.

Bede-Fazekas Á., Trásy K., Csóka Gy. (2015): Changing visual value of deciduous species in the climate change. In: Wolf, J., Nečasová, J., Nečas, T. (szerk.): Proceedings of the international conference "Horticulture in quality and culture of life". Faculty of Horticulture in Lednice, Lednice, Csehország. pp. 381–390.

Borovics A. (2014): Energiaültetvények szerepe a klímaváltozásban. In: Bidló A., Király A., Mátyás Cs. (szerk.): Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetőségei. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron. pp. 144–152.

Chmielewski F.-M., Rötzer T. (2001): Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101–112.

Chuine I., Kramer K., Hänninen H. (2003): Plant Development Models. In: Mark D. Schwartz (szerk.): Phenology: An Integrative Environmental Science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Hollandia. pp. 217–235.

Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. (2007): Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 357–365.

Cramer W., Yohe G. W., Auffhammer M., Huggel C., Molau U., da Silva Dias M. A. F., Solow A., Stone D. A., Tibig L. (2014): Detection and attribution of observed impacts. In: Field C. B.,

Barros V. R., Dokken D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D., Bilir T. E., Chatterjee M., Ebi K. L., Estrada Y. O., Genova R. C., Girma B., Kissel E. S., Levy A. N., MacCracken S., Mastrandrea P. R., White L. L. (szerk.): *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Nagy-Britannia és New York, USA. pp. 979–1037.

Czúcz B. (2010): Az éghajlatváltozás hazai természetközeli élőhelyekre gyakorolt hatásainak modellezése. Doktori disszertáció. Budapesti Corvinus Egyetem, Kertészettudományi Kar, Budapest.

Delpierre N., Dufrêne E., Soudani K., Ulrich E., Cecchini S., Boé J., François C. (2009): Modelling interannual and spatial variability of leaf senescence for three deciduous tree species in France. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 938–948.

Earthexplorer (2014): Térinformatikai adatközpont. URL: earthexplorer.usgs.gov. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.11.30.

ERTI (2015): Populus × euramericana cv. Pannónia. URL: www.erti.hu/hu/szolgc3%A1ltatc3%A1sok/nyc3%A1r-fajtavc3%A1lasztc3%B3/pannc3%B3nia. Utolsó hozzáférés dátuma: 2015.03.22.

Fylstra D., Lasdon L., Watson J., Waren A. (1998): Design and Use of the Microsoft Excel Solver. *Interfaces*, 28, 29–55.

Galántai M., Tóth I. (2001): Dísznövény zsebkönyv. Hová, mit ültessünk? Mezőgazda Kiadó, Budapest.

Google 2014. Látható tartományba eső műholdképek Magyarország területéről. Képek tulajdonosa: DigitalGlobe és CNES/Astrium. URL: www.earth.google.com. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.11.30.

Hänninen H., Tanino K. (2011): Tree seasonality in a warming climate. *Trends in Plant Science*, 16, 412–416.

Hughes L. (2000): Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 56–61.

Kovács-Láng E., Kröel-Dulay Gy., Czúcz B. (2008): Az éghajlatváltozás hatásai a természetes élővilágra és teendők a megőrzés és kutatás területén. *Természetvédelmi Közlemények*, 14, 5–39.

Linderholm H. W. (2006): Growing season changes in the last century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 1–14.

Menzel A., Fabian P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659.

MOD09 (2015): MODIS Surface Reflectance User's Guide. URL: modis-sr.ltdri.org/guide/MOD09_UserGuide_v1_3.pdf. Utolsó hozzáférés dátuma: 2015.03.31.

MOD09GA (2014): Surface Reflectance Daily L2G Global 1km and 500m. URL: lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mod09ga. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.07.01.

- MOD13 (2014): MODIS Data Product Non-Technical Description - MOD 13. URL: modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/nontech/MOD13.php. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.07.01.
- MOD15 (2014): MODIS Data Product Non-Technical Description - MOD 15. URL: modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/nontech/MOD15.php. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.07.01.
- MODIS (2014): About MODIS. URL: modis.gsfc.nasa.gov/about. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.07.01.
- NÉBIH (2014): Hazai és nemesnyáras faállománytípusú erdőrészteltek Magyarországon. Nem publikált elektronikus adat. Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal, Erdészeti Igazgatóság.
- OEA (2014): Országos Erdőállomány Adattár. URL: www.kormanyhivatal.hu/hu/ugytipusok/erdo-es-mezogazdasaggal-noveny-es-talajvedelemmel-kapcsolatos-ugyek/erdeszeti-ugyek/erdo-nyilvantartasba-vetelevel-orszagos-erdoallomany-adattaral-kapcsolatos-ugyek/adatszolgaltatas-az-orszagos-erdoallomany-adattarbol-es-a-nyilvantarto-terkeprol. Utolsó hozzáférés dátuma: 2014.10.01.
- OTKA (2015): Műholdas fenológiai megfigyelések módszertani megalapozása ökológiai rendszer globális változásra adott reakciójának detektálására. URL: nyilvanos.otka-palyazat.hu/index.php?menuid=930&lang=HU&num=81979. Utolsó hozzáférés dátuma: 2015.03.31.
- Parry M. L., Canziani O. F., Palutikof J. P., van der Linden P. J., Hanson C. E. (szerk.) (2007): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Egyesült Királyság.
- Peñuelas J., Sardans J., Estiarte M., Ogaya R., Carnicer J., Coll M., Barbeta A., Rivas-Ubach A., Llusà J., Garbulsky M., Filella I., Jump A. S. (2013): Evidence of current impact of climate change on life: a walk from genes to the biosphere. *Global Change Biology*, 19, 2303–2338.
- Richardson A. D., Braswell B. H., Hollinger D. Y., Jenkins J. P., Ollinger S. V. (2009): Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications*, 19, 1417–1428.
- TIR (2015): Természetvédelmi Információs Rendszer. URL: geo.kvvm.hu/tir. Utolsó hozzáférés dátuma: 2015.03.25.
- Tóth I. (2012): *Lomblevelű díszfák, díszcserjék kézikönyve*. Tarkavirág Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., Budapest.
- USGS (2015): USGS Global Visualization Viewer: About Browse Image. URL: glovis.usgs.gov/AboutBrowse.shtml. Utolsó hozzáférés dátuma: 2015.03.31.
- Vitasse Y., Delzon S., Dufrêne E., Pontailler J.-Y., Louvet J.-M., Kremer A., Michalet R. (2009): Leaf phenology sensitivity to temperature in European trees: Do within-species populations exhibit similar responses? *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 735–744.
- Vitasse Y., François C., Delpierre N., Dufrêne E., Kremer A., Chuine I., Delzon S. (2011): Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151, 969–980.
- Zhang X., Friedl M. A., Schaaf C. B., Strahler A. H., Hodges J. C. F., Gao F., Reed B. C., Huete A. (2003): Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475.
- Zhang X., Goldberg M. D. (2011): Monitoring fall foliage coloration dynamics using time-series satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 382–391.
- Zhang X., Goldberg M. D., Yu Y. (2012): Prototype for monitoring and forecasting fall foliage coloration in real time from satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 158–159, 21–29.
- Zhao M., Peng C., Xiang W., Deng X., Tian D., Zhou X., Yu G., He H., Zhao Z. (2013): Plant phenological modeling and its application in global climate change research: overview and future challenges. *Environmental Reviews*, 21, 1–14.

© 2015 by the authors; licensee RS&GIS, Hungary.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).