



Tájdinamika – módszertani fejlemények

Lóczy Dénes

1. Abstract

A tájszerkezet változásainak kutatása fontos lehet a környezetgazdálkodási döntések előkészítésében. A tájdinamikai modellek részben analitikusan a tájalkotó tényezők, elemek átalakulását vizsgálják, nem ritkán azonban holisztikus jellegűek, a földhasználattal együtt bekövetkező, gyakran mélyreható változásokat igyekeznek megragadni. Rendszerelvű megközelítésben tárják fel a tájváltozást irányító természeti és társadalmi-gazdasági tényezőket. Módszertani szempontból az analitikus modellek aszerint csoportosíthatók, hogy térfelfogásuk diszkrét vagy folytonos, egyetlen vagy több változóra összpontosít, determinisztikus vagy sztochasztikus modellek. A diszkrét modellek közül azok a tájmozaik modellek a legnépszerűbbek, amelyek kétdimenziósak, raszteres, távérzékeléses forrásokra épített földrajzi információs rendszert alkalmaznak a tájszerkezet tér- és időbeli bemutatására. A prognóziskészítés egyik nagy problémája, hogy a jelenlegi átalakulások statisztikai elemzéséből kirajzolódó trendek nem biztos, hogy a jövőre is érvényesek. Ezért van szükség olyan dinamikus és integrált modellekre, amelyek közül az értekezés szintén bemutat néhányat.

2. Bevezetés

A tájváltozás feltárására irányuló vizsgálatok részben a táj működésének megértését, részben gyakorlati célból a tájak kezelését, védelmét segítik elő. A tájdinamikai kutatások nehézségei egyrészt abból fakadnak, hogy a táj sokféle tényező egymással összefüggő rendszere. Bármelyik módosulása hat a többire.

A tájdinamika legszembevetőbb és legjobban megragadható összetevője kétségtelenül a földhasználat változása. Kérdéses azonban, hogy a földhasználat-változás feltárásával megfelelő módon jellemezzük-e a táj egészének átalakulását (Lambin, E. F. & Geist, H. J. 2006). Igaz ugyan, hogy egy új földhasználat gyökeresen átalakítja a táji viszonyokat, néha azonban e nélkül is, rejtett módon (pl. a talajban) lényeges változások mehetnek végbe. Az sem egyértelmű, hogy minden tájváltozás degradáció-e, tehát valamilyen szempontból rontja-e a táj minőségét. (A modellek jelentős része a tájdegradációval foglalkozik.) A természetes és az antropogén hatások egymással szoros kölcsönhatásban működve alakítják a tájat, ezért a társadalmi-gazdasági háttér feltárása az oknyomozó vizsgálatok elengedhetetlen része.

A tájdinamikai modellezés feladata tehát, hogy feltárja a tájváltozásban szerepet játszó kölcsönhatások szerkezetét, a visszacsatolásokat, meghatározza a tájat érintő emberi döntések és a változások egyéb hajtóerőinek viszonylagos jelentőségét (Lambin, E. F. 2004). Kétféle alapvető megközelítésmód lehetséges: vagy egészében, holisztikusan igyekszünk megragadni a táj egészének változását, vagy pedig analitikusan, az egyes tényezőket és hatásaikat kíséreljük meg matematikai eljárásokkal elemezni (Baker, W.L. 1989). A tájváltozás az alábbiakban általában leszűkített értelemben szerepel: a földhasználat átalakulását jelenti.

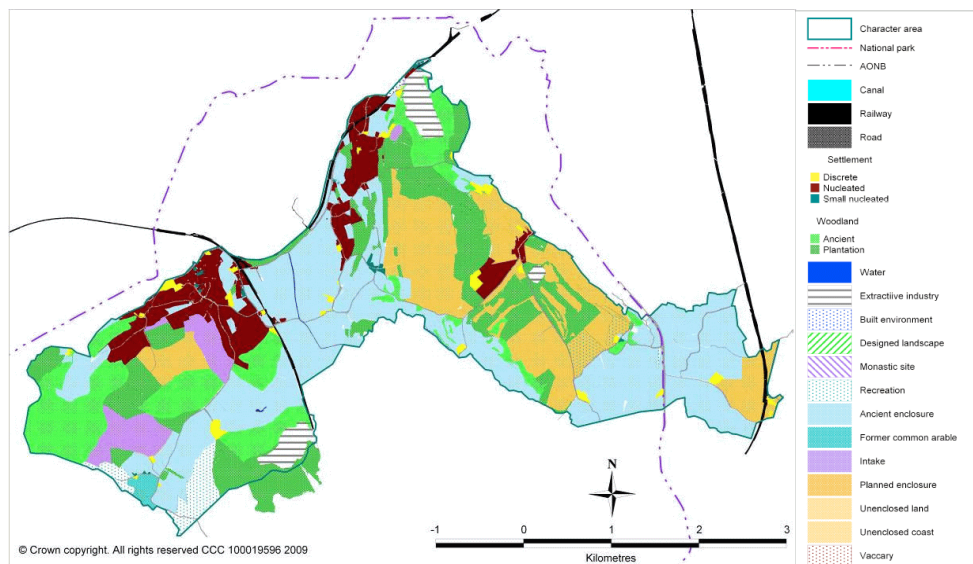
3. Egy holisztikus megközelítés: a történelmi táj jellemzés

Egyfajta holisztikus megközelítés az English Heritage nevű, kulturális értékek védelmére létesített szervezet történelmi táj jellemzési (Historic Landscape Characterization, HLC) kezdeményezése Clark, J. et al. 2004). Gyökerei az 1960-as évek természetvédelmi rendeleteiig nyúlnak vissza. Ekkor merült fel a tájak integrált kezelésének igénye, amelyet a minősítés módszertanának kidolgozása követett. Az első tájjellemzési programot Cornwallban valósították meg 1994-ben (Griffin, M. A. 1996; Fairclough, G. J. et al. 1999). Hamarosan országos méretűvé vált, és az Egyesült Királyság területének több mint felét már felmérték (1. ábra). Sőt, a módszert már egész Európában alkalmazzák (Clark, J. et al. 2003).



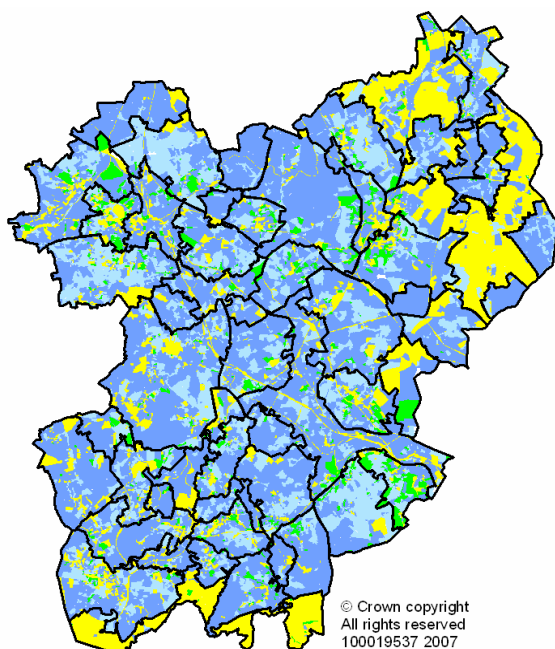
1. ábra. A HLC program helyzete 2004 áprilisában. A fekete színnel jelölt grófságokban már elkészült a leírás, a sötétszürkékben folyamatban volt, a világosabb tónussal jelöltekben pedig 2003–2004-ben kezdődött a kutatás (forrás:

A HLC alapfeltevése, hogy – szerencsés esetben, a történelem viharaitól jobban megkímélt országokban – a táj nagyon régi események nyomát, ill. történelmi jellegét sokáig megőrizheti (2. ábra). Ugyanakkor a táj története során folyamatosan újabb és újabb elemekkel gazdagodik. A jól elkülönülő tájjelleg-területek bizonyos tájtípusok sajátos kombinációiból jönnek létre. A HLC módszer célja, hogy a jelenlegi tájban kimutassa a történeti hatásokat, de nem egyenként, hanem ahogyan a táj mintázatában komplex módon tükröződnek. A modell kidolgozói a tájat állandó változásban levő jelenségnek tartják, nem merevítik „fosszilis tájjá”. A modell nem zárja ki a jövőbeli átalakulást sem, hiszen ez általában nem is lehetséges, de megvizsgálja a táj érzékenységét, milyen mértékben tud befogadni változásokat azonossága elvesztése nélkül, ill. hol húzódnak a kívánatos változások korlátai.

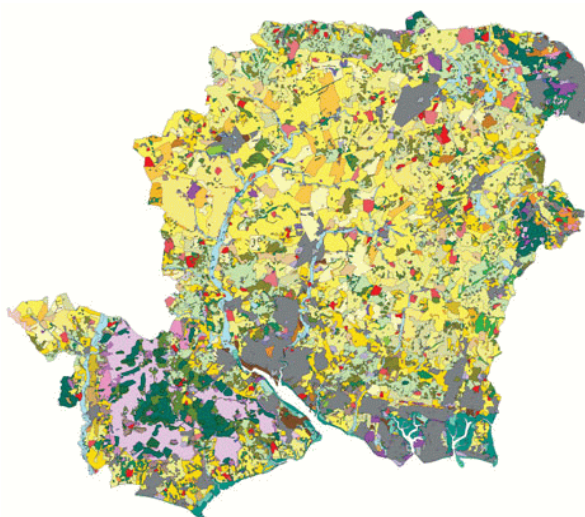


2. ábra. Arnside és Beetham tájjelleg terület Cumbria grófságban (forrás: CCC 2009).

A HLC a gyakorlatban elsősorban a tájszerkezet térképezését jelenti. Ebben központi kategória az *időtávlat* (*time-depth*), az az idő, amely azóta telt el, hogy a táj (pl. legelő-elkülönözéssel) elnyerte alapvető kultúrjellegét. Kimutatható az egyes kultúrhatások egymásra rétegződése. A tájjelleg-jellemzés nem korlátozódik a mezőgazdasági tájakra. Világosan megmutatkozik, hogy az olyan iparvidékek, mint a közép-angliai Black Country szerkezete is sajátos, többretegű, szintén jellegzetes kultúrtörténeti értékeket hordoz (Quigley, P. 2007 – 3. ábra). Eredményei jól alkalmazhatók a helyi területi tervezésben, mezőgazdálkodási, közlekedési, telekommunikációs fejlesztések megalapozásában (mint pl. a Hampshire grófsági HLC esetében is, Hampshire County Council 2001 – 4. ábra).



3. ábra. A jelenlegi tájkarakter kialakulásának ideje („time-depth”) a Black Country területén, Közép-Angliában (forrás: Black Country HLC, 4. változat, 2007).
A sárgával jelölt területek jellege a 1880 előtt alakult ki, a zöldké a 19. sz. legvégén, a világoskéké a 20. sz. elején, a sötétkékeké pedig a 20. sz. közepén, végén.



4. ábra. Hampshire angliai grófság történelmi tájjelemzése (HLC)
(forrás: Hampshire County Council).

4. Analitikus (matematikai) modellek

A földhasználat változását elemző, földrajzi jellegű modelleket általában a következő osztályokba szokás sorolni (Veldkamp, W.S.A. & Lambin, E.F. 2001; Heistermann, M. et al. 2006):

- empirikus-statisztikus,
- optimalizációs,
- dinamikus (folyamat-alapú) és
- integrált (kombinált) modellek.

4.1. Empirikus–statisztikus modellek

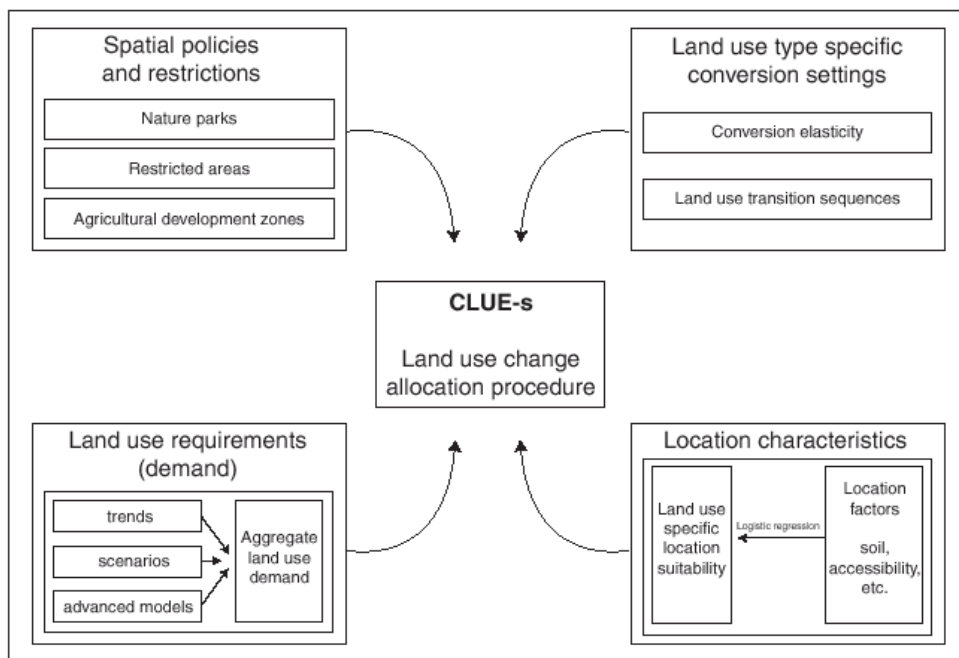
A tapasztalt tájváltozási tendenciákon alapuló modellek egy vagy több változó kapcsolatát vizsgálják a táji hierarchia valamelyik szintjén. Tapasztalati összefüggések alapján, többszörös regresszióval igyekeznek kimutatni a feltárt változások mögött rejlő hajtóerőket. Ezek időben módosuló hatásait és azoknak térbeli érvényesülését regressziós elemzéssel általában nehéz egyértelműen kimutatni. Az empirikus modellekben az „aggregáció mértéke” nagy, ami azt jelenti, hogy a változó(k)nak a vizsgált egységen belüli megoszlása ritkán jelenik meg.

4.1.1. A CLUE-modellecsalád

A Földhasználat-váltás és hatásai (Conversion of Land Use and its Effects, CLUE) nevű modell különböző területi felbontásban létezik. Eredetileg regionális, országos és kontinentális vizsgálatokra alkalmazták Kínában (CLUE-China – Verburg, P. H. et al. 1999) és Latin-Amerika trópusi területein (CLUE-Neotropics – Wassenaar, T. et al. 2007). Az előrejelzések alapja az egyes földhasználatok iránt várhatóan felmerülő, országos méretű *területigény* volt. A modell másik fő modulja a földhasználatok térbeli elhelyezését célzó „telepítő” modul. A korábbi statisztikai módszerekhez képest nagy előnye, hogy képes dinamikusan szimulálni a különböző földhasználat-típusok közötti versengést. Az alkalmazott allokációs szabályok is meghaladják a hagyományos empirikus vizsgálatok szintjét. Ezek eredményeként a földhasználat térbeli elhelyezkedését mutató valószínűségi térképhez lehet jutni. Az egyezés a valósággal különböző statisztikai eljárásokkal (ilyen pl. a Relative Operating Characteristic, ROC validáció – Pontius, R. G. & Schneider, L. C. 2000) ellenőrizhető.

A latin-amerikai vizsgálat (Wassenaar, T. et al. 2007) inkább az erdőirtás, ill. a szántóföldek és a legelők terjeszkedésének tendenciát kívánta feltárni (1990 és 2010 között), valamint a változásokat lokalizálni, gócpontjaikat (hot spots) kimutatni. A hajtóerők közé beépítették a tájdegradációt is, amely oda vezet, hogy a kimerült területek helyett a gazdálkodók máshol fognak az erdő irtásába. A kisebb területeket nagyobb (1x1 km-es) felbontásban tanulmányozó CLUE-S modell (Verburg, P. H. et

al. 2002) még pontosabb képet ad a változatos társadalmi peremfeltételek – gyakran közvetett módon keletkező – „lenyomatáról” a földhasználat változásában (5. ábra).



5. ábra. A CLUE-S földhasználat-változás modell sémája a peremfeltételek (a területfejlesztési politika, korlátozások; az egyes földhasználat-változások sajátos feltételei; a földhasználati igények és a termőhelyi feltételek) feltüntetésével (forrás: Verburg, P. H. et al. 2002).

4.2. Optimalizációs (közgazdasági) modellek

Az ilyen modellezés célja az erőforrások gazdasági szempontból optimális térbeli elhelyezése. Feladata annak kimutatása, hogy a piaci viszonyok hogyan befolyásolják a földhasználati döntéseket. Lényegében ezek egyensúlyi (kereslet-kínálat) modellek. Speciális céljaikon kívül abban térnek el egymástól, hogy milyen tágan értelmezik a piaci hátteret (és a nem piaci jellegű hatásokat).

4.2.1. Általános egyensúlyi modellek

(Computable General Equilibrium, CGE models)

A CGE modellek tökéletesen leírható, minden időkeresztmetszetben egyensúlyban levő piaci viszonyokkal számolnak. A gazdasági ágak közötti visszacsatolások feltárhatók.

Földrajzi szempontból gondot okoz az optimalizációs modellek kisebb felbonthatása, ezért a természettudományi modellekhez leskálázással kapcsolhatók.

4.2.1.1. A GTAP modellcsalád

A Globális Kereskedelem Elemzés Projekt (Global Trade Analysis Project, GTAP) közgazdasági megközelítésű általános egyensúlyi modell, amely a nem mezőgazdasági ágazatok mezőgazdaságra gyakorolt hatásával is számol (Meijl, H. van et al. 2007). Azért van szükség rá, mert a korábbi modellek nem tudták megállapítani az alternatív földhasználatok elmaradt hasznát a globális éghajlatváltozás szempontjából (Hertel, Th. W. et al. 2008). A GTAP modellek egyaránt vizsgálják a mező- és az erdőgazdálkodás szerepét az üvegházhatású gázok kibocsátásában, ill. annak mérséklésében. Egyben azt is előrevetítik, milyen következményekkel jár az éghajlatváltozás ezekre a gazdasági ágakra.

A GTAP–AEZ modell pl. az egyes agroökológiai körzetek (Agro-Ecological Zones, AEZ) szintjén hasonlítja össze a terméseredményeket, ha bizonyos feltételek teljesülnek (hasonló a termékszerkezet, a hatékonyság szintje és a költségszint, valamint nagy mértékű az egyes körzetek közötti helyettesíthetőség). Egy másik változat, a GTAPE–L azt vizsgálja, hogy az egyes földhasználat-típusok mennyi üvegházhatású gázt bocsátanak ki (ld. alább az IMAGE modellt).

4.2.2. Részleges egyensúlyi modellek (Partial Equilibrium Models, PEM)

Ezek a piacok jól meghatározott csoportjára alkotnak kereslet/kínálat függvényeket, más piacokat csak jelképesen vagy egyáltalán nem vesznek figyelembe.

4.2.2.1. Az IMPACT modell

Az IMPACT modell a globális földhasználat-változásokra irányul (Rosegrant, M. et al. 2002). A Föld 36 makrorégiójának elemzésével a világ élelmiszerellátásának helyzetét veti össze a termelési és kereskedelmi lehetőségekkel. Előrejelzései 2020-ig szólnak.

4.2.2.2. A FASOM modell

Az Erdészeti és Mezőgazdasági Szektor Optimalizációs modelljét (Forest and Agricultural Sector Optimization Model, FASOM – Adams, D. M. et al. 1996, 2005) eredetileg arra fejlesztették ki, hogy az erdők szénmegkötő szerepét szolgáló intézkedések jóléti és piaci hatásait értékeljék. Manapság az erdő- és mezőgazdasági politika egyéb területein is alkalmazzák. A FASOM modell kiszámolja a földterületek ágazati mérlegét, a földhasználat-váltás költségeit. A földhasználat-váltást a program az agroökológiai alkalmasság szerint korlátozza. Az optimalizálás érdekében maximalizálja a fogyasztók és a termelők össz-értéktöbbletének (nettó jövedelmének) nettó jelenértékét, ennek alapján modellezi a földhasználati módok arányainak várható átalakulását.

4.3. Dinamikus (folyamat-alapú) modellek

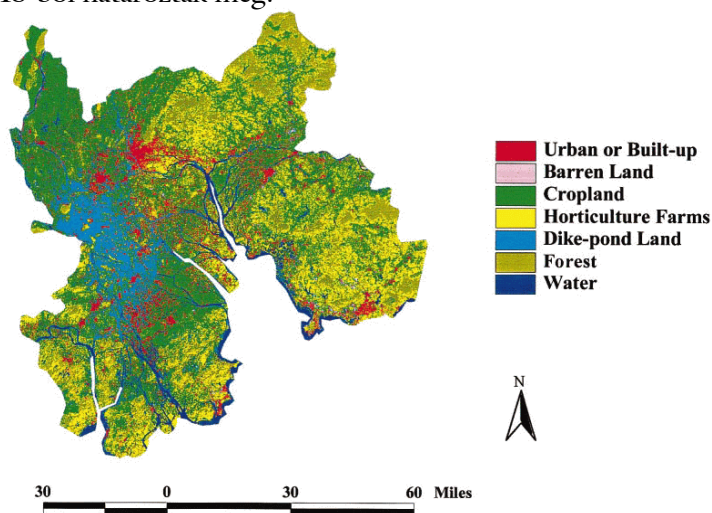
A dinamikus modellek a hangsúlyt az átalakulási folyamat időbeliségére helyezik. A földhasználat átalakulását folyamatában, de diszkrét módon, időszletek meghatározásával kívánják jellemezni (Agarwal, C. et al. 2002).

4.3.1. Markov-láncon alapuló modellek

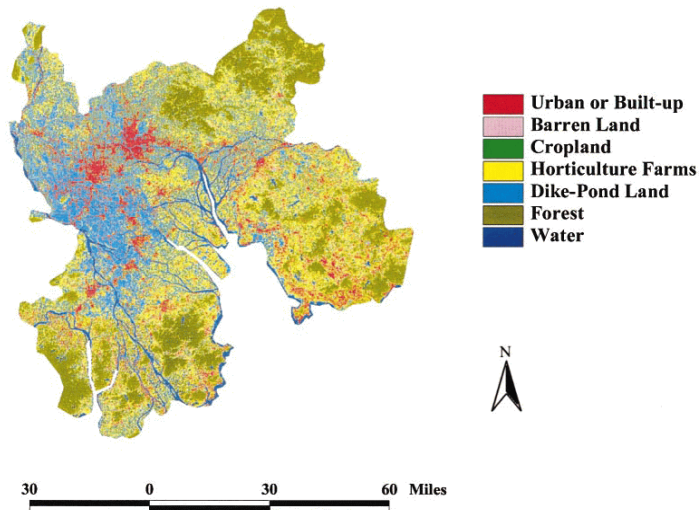
A Markov-modellek diszkrét megközelítésű matematikai modellek. Lényegük, hogy valamely esemény előfordulási valószínűsége az előzményekből becsülhető. Láncnak azért nevezik őket, mert egyszerűen celláról cellára, időszetről időszetre követik a földhasználat átalakulását. A változások nyilvántartására *Markov-mátrixot* („átmenet-mátrix”) alkalmaznak. A földhasználat-váltás minden típusára kiszámítható a változás P valószínűsége, amelynek értékei szintén mátrix alakjában foglalhatók össze. Az átló mentén a változatlan hasznosítású cellák aránya olvasható le. A földhasználat változása a mátrixok között vektorokkal írható le.

A Markov-modell a változás valószínűségét azonban állandónak feltételezi az egész vizsgált területre, ami a valóságos helyzetre ritkán érvényes. A szomszédsági viszonyokat nem veszi figyelembe, ezért gyakran sejt-automata modellel kell kombinálni.

Természetesen földrajzi információs rendszerrel együtt is alkalmazható. Abban a Markov-láncon alapuló modellben, amelyet Weng, Q.h. (2002) készített a Gyöngy-folyó deltájának (Kína Quangdong tartománya) földhasználatára három vizsgált időszetre (1989, 1994 és 1997 – 6–8. ábra), az átmenetek valószínűségét (10. ábra) távérzékeléses módszerekkel, Landsat TM felvételek interpretációjával készített GIS-ből határozták meg.



6. ábra. A Gyöngy-folyó deltájának földhasználat (Kína Quangdong tartománya) 1989-ben (forrás: Weng, Q.h. 2002).



7. ábra. A Gyöngy-folyó deltájának földhasználata (Kína Quangdong tartománya) 1997-ben (forrás: Weng, Q.h. 2002)

Table 1. Land use/cover change matrix, 1989–1997 (in hectares)

1989	1997							1989 Total
	Urban or built-up	Barren land	Cropland	Horticulture farms	Dike-pond land	Forest	Water	
Urban or built-up	54 189	493.38	20 890.8	35 816.8	15 887.4	3082.77	7407.36	137 768
Barren land	11 603.4	661.77	4156.02	8690.4	1285.47	1414.53	1293.75	29 105
Cropland	77 151.5	4651.11	152 400	215 536	55 272.7	44 497.1	29 258.4	578 767
Horticulture farms	32 660.8	3775.23	44 972.9	132 372	12 850.2	43 752.3	8222.22	278 605
Dike-pond land	14 902.8	321.03	33 931.4	20 238.6	42 489.7	2640.96	31 327.4	145 852
Forest	8378.64	3028.59	26 294.7	102 589	3906.72	128 048	5436.81	277 683
Water	4571.37	472.95	16 156.6	10 366.1	11 179.7	1845.09	64 414.3	109 006
1997 total	203 458	13 404	298 803	525 609	142 872	225 281	147 360	1 556 787
Change (ha)	65 690	-15 701	-279 964	247 004	-2980	-52 402	38 354	702 095
Change (%)	+47.68	-53.93	-48.37	+88.66	-0.02	-18.87	+3.19	12.82

8. ábra. A Markov-modell „átmenet mátrixa” a Gyöngy-folyó deltájának 1989 és 1997 közötti földhasználat-változása példáján (forrás: Weng, Q.h. 2002).

A GEOMOD2 modell (Pontius, R. G. et al. 2001) szintén több időszeten keresztül prognosztizálja a földhasználat átalakulását. A kalibrálás során úgy állapítják meg az átmenetek (földhasználat-váltások) valószínűségét, hogy felméri a kalibrálási időszakban a cellák hány százalékát érintette a változás.

Table 4. Expected values of land use/cover transitional probabilities under Markov hypothesis, 1989–1997

1989	1997						
	Urban or built-up	Barren land	Cropland	Horticulture farms	Dike-pond land	Forest	Water
Urban or built-up	0.2122	0.0120	0.1842	0.3334	0.0939	0.0851	0.0792
Barren land	0.1735	0.0121	0.1862	0.3817	0.0759	0.0983	0.0723
Cropland	0.1225	0.0089	0.2114	0.3723	0.0904	0.1134	0.0811
Horticulture farms	0.0972	0.0085	0.1761	0.3858	0.0602	0.2090	0.0633
Dike-pond land	0.1049	0.0062	0.2306	0.2475	0.1558	0.0709	0.1841
Forest	0.0441	0.0063	0.1357	0.3803	0.0328	0.3526	0.0484
Water	0.0145	0.0013	0.0339	0.0445	0.0207	0.0156	0.8696

9. ábra. A földhasználat-váltások valószínűségi mátrixa a Gyöngy-folyó deltájában 1989–1997 között (forrás: Weng, Q.h. 2002).

4.3.2. Sejtautomata modellek

A sejtautomata-modellezés (cellular automaton – CA) a teret és az időt diszkrétan értelmező, numerikus szimulációs módszer (White, R. & Engelen, G. 1997). John Conway híres „életjátéka” (Game of Life) nyomán terjedt el. A raszteres „sakktáblaként” felfogott térben „élő” és „halott” négyzetek helyezkednek el. Ezek élő vagy halott állapotban vannak, ill. szaporodni is képesek, a *szomszédságuk* függvényében megfogalmazott *játékszabályok* szerint. A kétdimenziós CA módszerek sakktáblaszerű térszemléletét a 3D módszerekben időszelletekből felépített kockák váltják fel. Vannak kísérletek arra is, hogy a CA módszert folytonossá tegyék, ilyen pl. a lebegő-pontos eljárás.

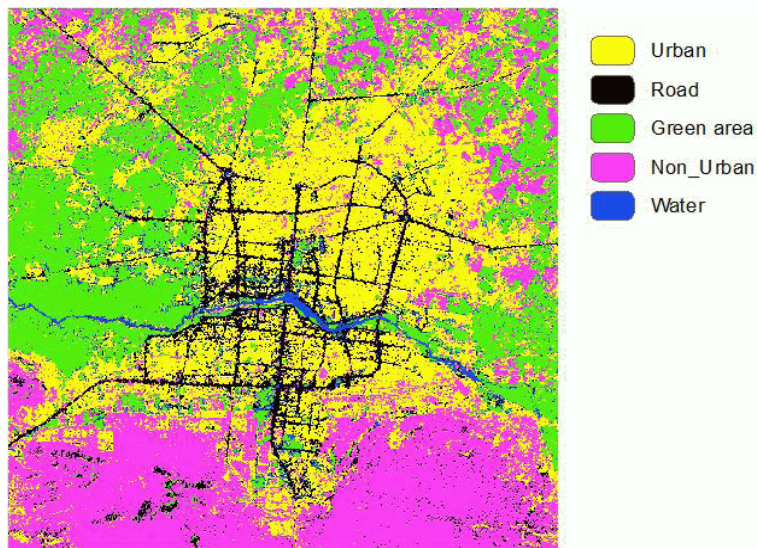
A sejtautomaták alkalmazhatnak reverzibilis szabályokat, amelyek a kezdeti állapotokból indulnak ki, és determinisztikusan működnek. Az irreverzibilis szabályrendszerek sztochasztikusak (pl. Monte Carlo szimulációk). A szabályrendszert induktív úton, a megmaradási törvényekből vagy empirikus szabályszerűségekből, ill. deduktív módon, szakértői rendszerekben tudásgenerálással állítják elő.

Mivel a 2D CA módszerek kitűnően megfelelnek multispektrális felvételek időszelletekben történő feldolgozására, hagyományosan a városok területi terjeszkedésének előrejelzésére használják (Clarke, K. C. et al. 1997; Stevens, D. et al. 2006). Ez a megközelítés annyira elterjedt, hogy egyesek már „sejtgeográfáról” értekeznek (Tobler, W. R. 1979). Betanításra, kalibrálásra és a CA szabályok finomítására is műholdfelvételeket lehet alkalmazni.

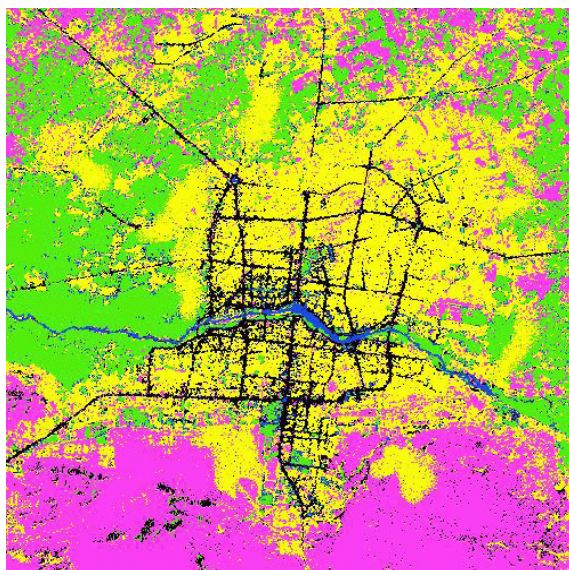
Teherán esetében pl. sikerült a gyors városnövekedés tendenciáit megbízhatóan (az idézett példában 85%-os pontossággal) előrejelezni a CA módszerrel (Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009 – 10–13. ábra). A kétféle forgatókönyv szerint készült prognózis *szabálylistája* (1. táblázat) jól illusztrálja a sejtautomata működését.

1. táblázat. A városnövekedés minősítési és szomszédsági szabályai a CA módszerrel végzett teheráni vizsgálatban
(Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009 nyomán)

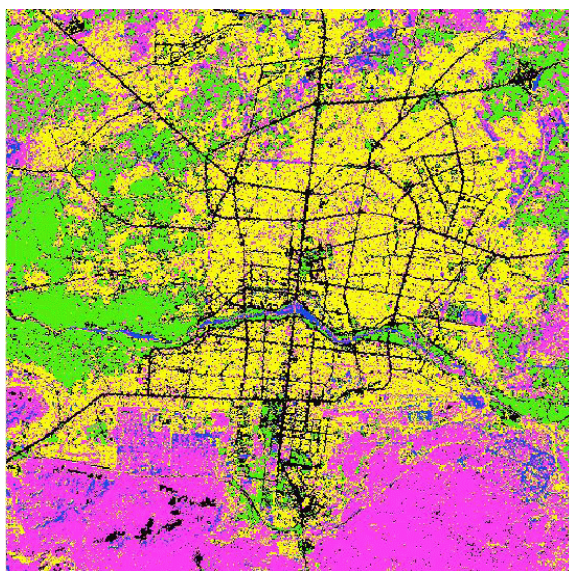
1. forgatókönyv		
IF (ha a vizsgált cella ...)		THEN (akkor az adott cellában ...)
1, vízfelület		nem engedélyezett a városnövekedés
2, közút		nem engedélyezett a városnövekedés
3, lakott terület	OR (vagy ...) kereskedelmi terület	ugyanaz marad, változtatás nélkül
4, zöldterület	AND (és ...) a szomszédságában 4 cella városi terület	változzon városi területre
2. forgatókönyv		
IF (ha a vizsgált cella ...)		THEN (akkor az adott cellában ...)
1, vízfelület		nem engedélyezett a városnövekedés
2, közút		nem engedélyezett a városnövekedés
3, lakott terület	OR (vagy ...) kereskedelmi terület	ugyanaz marad, változtatás nélkül
4, zöldterület	AND (és ...) a szomszédságában 3 cella városi terület	változzon városi területre



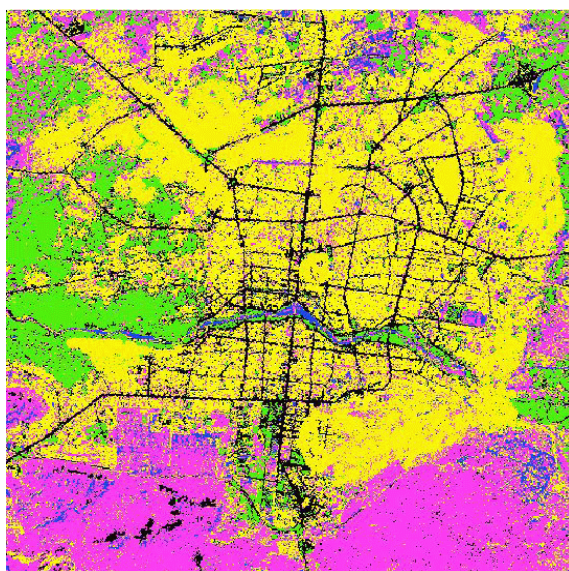
10. ábra. Teherán földhasználata 1990-ben Landsat-5 űrfelvétel interpretációja alapján
(forrás: Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009).



11. ábra. Teherán 1990. évi földhasználatának szimulációja sejtautomata-moddellel
(forrás: Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009).



12. ábra. Teherán földhasználata 2001-ben, úrfelvétel interpretációja alapján
(forrás: Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009).



13. ábra. Teherán földhasználata 2001-ben, a modell által szimulálva
(forrás: Kiavarz Moghaddam, H. & Samadzadegan, F. 2009).

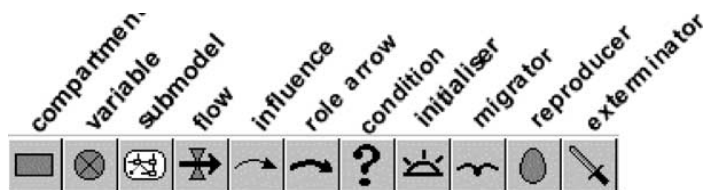
A tájökológiában a CA módszert a tájmintázat fragmentáció és a foltképződés tendenciáinak (Bascompte, J. & Sole, R. V. 1996), a trópusi övben az esőerdők dinamikájának (Alonso, D. & Sole, R. V. 2000) nyomonkövetésére alkalmazzák.

Sajátos sejtautomata a Per Bak (Brookhaven National Laboratory) által kidolgozott „homokkupac” (sandpile) CA (Bak, P. et al. 1987). Ebben is helyi küszöbértékszabályok irányítják a folyamatokat. Ez a „világkép” a foltok terjeszkedését a homok kritikus rézsűszögének analógiájára képzelel el, amelyek már meredekebbek nem lehetnek. A homok további felhalmozódása kiegyenlítődési folyamatot indít el. Ha pl. a homokkupac egységei, „blokkjai” közül valamelyik több mint 3 blokkal gyarapodik, azok a fő égtájak irányában oszlanak el.

Peremfeltételeken alapuló forgatókönyvet dolgoztak ki az afrikai Szudán-Száhel övezetre a SALU (Sahelian Land Use) modell megalkotói (Stephenne, N. & Lambin, E. F. 2004). Az „if ... then” szabályok segítségével tesztelni lehetett az övezetek átalakulására, annak hajtóerőire vonatkozó hipotéziseiket. Kimutatták pl., hogy a vizsgált övben a vidéki népesség létszámának növekedése lényegesen hatékonyabb hajtóerő, mint a városi népességé. Egy ilyen vizsgálat közvetlenül alátámasztja a politikai döntéshozatalt (Lambin, E. F. 2004).

A földhasználati folyamatok modelljeinek felépítését is hatékonyan segítik a vizuális modellező programok, mint újabban a SIMILE (Muetzelfeldt, R. & Massheder, J. 2003). Ez egy Nagy-Britanniában kifejlesztett, folytonos tér-idő szemléletű

eszköz, amely a modellezendő folyamatokat segít megtervezni, egyszerű jelrendszer alkalmazásával (14. ábra).



14. ábra. A SIMILE modellépítő eszközben használt 11 jel: készlet, változó, almodell, bemenet/kimenet, hatótényező, meghatározó tényező, feltétel, inicialiser, migrátor, reprodukáló, megszüntető (forrás: Muetzelfeldt, R. & Massheder, J. 2003).

4.4. Integrált (kombinált) modellek

Az integrált modellek dinamikusan mutatják be az oksági kapcsolatok hatásait a földhasználat változására (Leemans, L. & Serneels, S. 2004). A természeti és a társadalmi–gazdasági hajtóerők egymással kölcsönhatásban, visszacsatolásaikkal együtt jelennek meg bennük. A modellezés jelenlegi fejlettségi szintjén az ilyen megközelítések képesek a leginkább döntéshozókészítő szerepet betölteni.

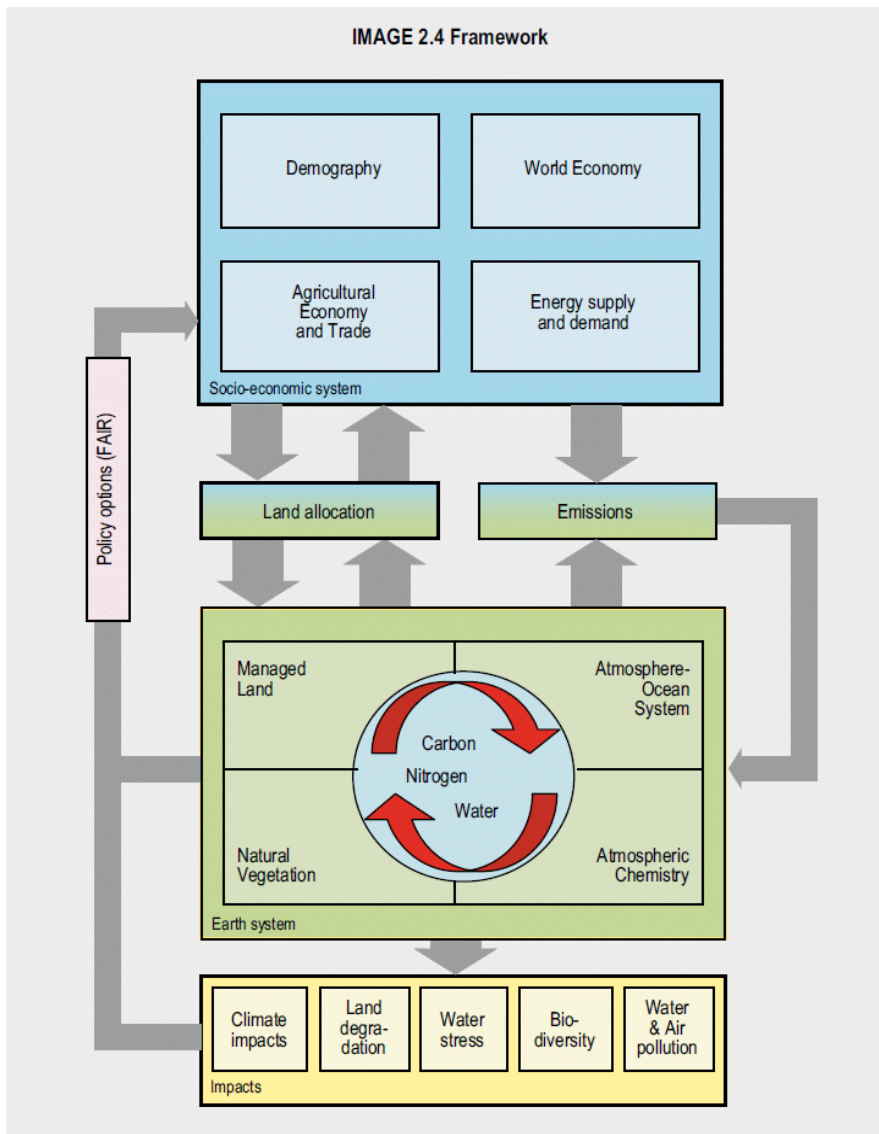
A modellek alapvető ismérve, hogy az egész Föld földhasználatát kívánják-e bemutatni (Dolman, A et al. 2003), vagy kisebb területekre korlátozódnak, egészen a helyi modellekig (Schaldach, R. & Priess, J. A. 2008). Különböző méretarányú változások esetében ugyanis különböző az egyes hajtóerők jelentősége. Milyen hajtóerők parametrizálhatók? Az éghajlati tényezők, a vízellátottság, a talajminőség (ökológiai alkalmasság, ill. termőképesség), a kulturális hagyományok (életviteli szokások), a jövedelmi viszonyok, a gazdálkodás körülményei és különböző politikai döntések alapvetően befolyásolhatják a földhasználat alakulását.

4.4.1. A GEONAMICA programon alapuló modellek

A GEONAMICA kereskedelmi forgalomban hozzáférhető programcsomag. Sejt-automata modellezésen alapul (White, R. & Engelen, G. 1997), amelyet térinformatikai módszerekkel ötvözve lehet a földhasználat-változás prognosztizálására felhasználni. Egészen részletes (100×100 m vagy 500×500 m) térbeli felbontásban is alkalmazzák, pl. a MODULUS (2000) modellben, amely a Földközi-tenger térségének környezeti degradációját természeti, gazdasági és társadalmi szempontból tanulmányozza. Szintén a mediterrán területekkel, az egyes vízgyűjtők elszívatógósásával foglalkozik a MedAction rendszer (Delden, H. van et al. 2007).

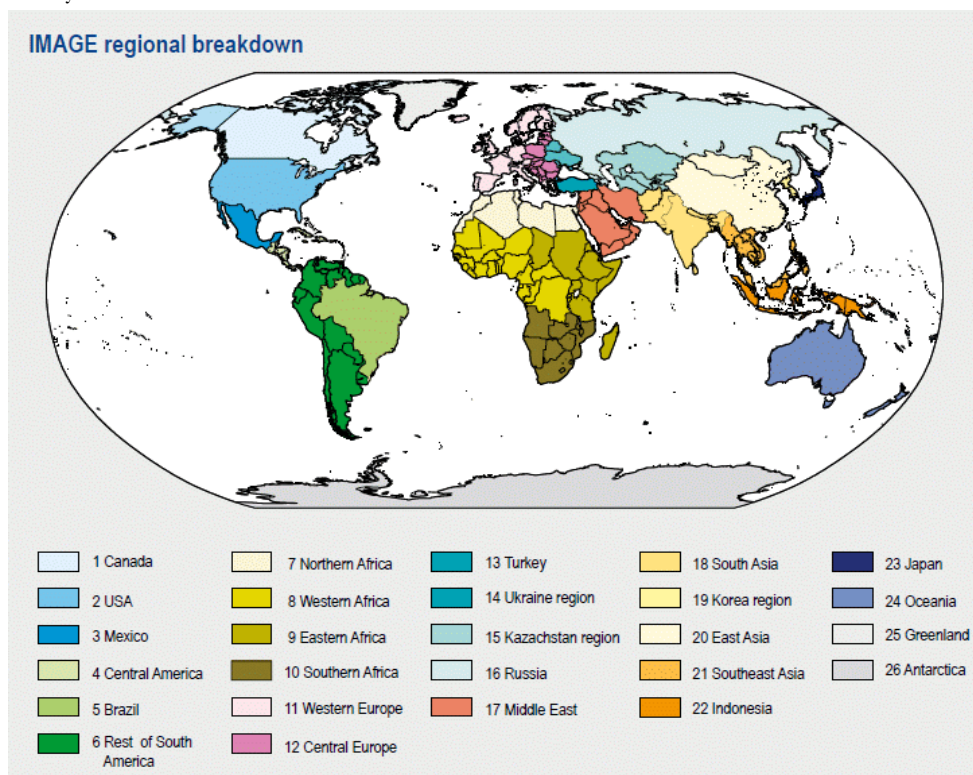
4.4.2. Az IMAGE modellek

A Globális Környezet Integrált Értékelő Modellje (Integrated Model to Assess the Global Environment) a 80-as évek óta létezik. Jelenleg az IMAGE 2.4 verzióját alkalmazzák, amely általános célú, integrált dinamikus modell (MNP, 2006; Alcamo, J. et al. 1998 – 15. ábra).



15. ábra. Az IMAGE 2.4 modell felépítése (forrás: MNP 2006).

Az IMAGE tulajdonképpen a földi rendszer modellje (Earth System Science – Steffen, W. 2003). *Aglobális éghajlatváltozási* modellekhez kapcsolódva 100 évre előre ad prognózt, a világ 24 makrorégiójára (országcsoportjára) (16. ábra). A földhasználatot elsősorban a belőle fakadó üvegházhatásúgáz-kibocsátások szempontjából vizsgálja (Strengers, B. et al. 2004), másrészt arra irányul, hogy kimutassa, milyen következményekkel jár a hasznosítás átalakulása az ökoszisztémák és a globális környezet számára.



16. ábra. Az IMAGE 2.4 modell regionális lebontása 24 ország(csoport)ra (forrás: MNP, 2006).

Az IMAGE modellek földhasználat-változási modulja raszteres térbeli allokációs program, egyebek között a GTAP modellel is kombinálódik. Két lépcsője van: először a mezőgazdasági területekre agroökológiai potenciált, az erdőkre hozampotenciált számol (MNP, 2006), majd meghatározza a különböző mező- és erdőgazdasági termékek, valamint a bioenergia iránti igényt. A természetes növényzethez képest állapítja meg, hogy az egyes földhasználati típusok mekkora kibocsátásokkal járnak. A modell kidolgozói az állattenyésztésből származó kibocsátásokra is különös figyelmet fordítanak. Heurisztikus „telepítő” szabályai cellánként választják ki az optimális földhasználatot.

Irodalom

- ADAMS, D. M., ALIG, R. J., CALLAWAY, J. M., MCCARL, B. A. & WINNETT, S. M. 1996. The Forest and Agricultural Sector Optimization Model (FASOM): Model Structure and Policy Applications. U.S. Department of Agriculture Forest Service – Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. 60 p. Research Paper PNW-RP-495.
- ADAMS, D. M., ALIG, R., MCCARL, B. A. & MURRAY, B. C. 2005. FASOMGHG Conceptual Structure, and Specification: Documentation. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Washington, DC.
- http://agecon2.tamu.edu/people/faculty/mccarl-bruce/papers/1212FASOMGHG_doc.pdf.
- AGARWAL, C., GREEN, G. M., GROVE, J. M., EVANS, T. P. & SCHWEIK, C. M. 2002. A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. (U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. Newton Square, PA. (General Technical Report NE-297).
- <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/5027>.
- ALCAMO, J., LEEMANS, R. & KREILEMAN, E. 1998. Global Change Scenarios of the 21st Century – Results from the IMAGE 2.1. Elsevier Science, Oxford. 392 p.
- ALONSO, D. & SOLE, R. V. 2000. DivGame: a cellular automata model of rainforest dynamics. *Ecological Modelling*, 133.1–2. 131–141.
- BAK, P., TANG, C. & WIESENFELD, K. 1987. Self-organized criticality: an explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters* 59.5. 381–384.
- BAKER, W. L. 1989. A review of models of landscape change. *Landscape Ecology* 2.2. 111–133.
- BALZTER, H., BRAUN, P. W. & KÖHLER, W. 1998. Cellular automata models for vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 107. 113–125.
- BASCOMPTE, J. & SOLE, R. V. 1996. Habitat fragmentation and extinction thresholds in spatially explicit models. *Journal of Animal Ecology* 65.4. 465–473.
- BELL, E. J. 1974. Markov analysis of land use change: an application of stochastic processes to remotely sensed data. *Socio-Economic Planning Science*, 8. 311–316.
- BRIASSOULIS, H. 2000. Analysis of Land Use Change: Theoretical and Modelling Approaches. The Web Book of Regional Science. Regional Research Institute, West Virginia University. <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>.
- BURNIAUX, J.-M. & LEE, H.-L. 2003. Modelling land use changes in GTAP. Center for Global Trade Analysis Project, Purdue University, West Lafayette, IN.
- <http://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1509.pdf>.
- CCC 2009. A guide to using the Cumbria Historic Landscape Characterisation database for Cumbria's planning authorities. Cumbria County Council, Carlisle. 122 p.
- CLARK, J., DARLINGTON, J. & FAIRCLOUGH, G. J. 2003. Pathways to Europe's Landscape. English Heritage, London. 113 p.
- CLARKE, K. C., HOPPEN, S. & GAYDOS, L. 1997. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24. 247–261. <http://www.geog.ucsb.edu/~kclarke/Papers/clarkehoppengaydos.pdf>
- DELLEN, H. VAN, LUJA, P. & ENGELEN, G. 2007. Integration of multi-scale dynamic spatial models of socio-economic and physical processes for river basin management. *Environmental Modelling & Software*, 22: 223–238.
- DOLMAN, A., VERHAGEN, A. & ROVERS, C. (eds.) 2003. Global Environmental Change and Land Use. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

- FAIRCLOUGH, G. J., LAMBRICK, G. & MCNAB, A. 1999. *Yesterday's World, Tomorrow's Landscape*. English Heritage, London.
- GARDNER, R. H., MILNE, B. T., TUNER, M. G. & O'NEILL, R. V. 1987. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1. 19–28.
- GRIFFIN, M. A. 1996. *Cornwall Landscape Assessment 1994*. Cornwall County Council, Truro, 197 p.
- Hampshire County Council 2001. *Hampshire Landscape Characterisation*. Hampshire County Council, Winchester.
- <http://www.hants.gov.uk/landscape.html>.
- HEISTERMANN, M., MÜLLER, CH. & RONNEBERGER, K. 2006. Land in sight? Achievements, deficits and potentials of continental to global scale land-use modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114. 141–158.
- HERTEL, TH. W., ROSE, S. & TOL, R. S. J. 2008. *Land Use in Computable General Equilibrium Models: An Overview*. GTAP Working Paper No. 39.
- KIAVARZ MOGHADDAM, H. & SAMADZADEGAN, F. 2009. Land Use Change Modeling in Tehran Using Geo Cellular Automata. In: *GIS Ostrava 2009*. Institute of Geoinformatics, Technical University of Ostrava. 6 p.
- http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2009/sbornik/Lists/Papers/093.pdf.
- LAMBIN, E. F. 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21. 375–393.
- LAMBIN, E. F. 2004. Modelling Land-Use Change. In: Wainwright, J. & Mulligan, M. (Eds.): *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*. John Wiley and Sons, Chichester. 245–254.
- LAMBIN, E. F. & GEIST, H. J. (eds.) 2006. *Land Use and Land Cover Change: Local Processes, Global Impacts*. Springer Verlag, Berlin. 222 p.
- LEEMANS, L. & SERNEELS, S. 2004. Understanding land-use change to reconstruct, describe or predict changes in land cover. *GeoJournal*, 61. 305–307.
- MEIJL, H. VAN, RHEENEN, T. VAN, TABEAU, A. & EICKHOUT, B. 2007. The impact of different policy environments on agricultural land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114. 21–38.
- MEYER, W. & TURNER, II, B. (eds.) 1994. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*. Global Change Institute. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge. 410 p.
- MNP 2006. *Integrated modelling of global environmental change. An overview of IMAGE 2.4*. Ed. by Bouwman, A. F., Kram, T. & Klein Goldewijk, K. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, The Netherlands. 228 p.
- MODULUS 2000. *MODULUS: A Spatial Modelling Tool for Integrated Environmental Decision-Making. Final Report 1–2*. Ed. by Engelen, G., van der Meulen, M., Hahn, B., Uljee, I. RIKS, Maastricht – Commission of the European Union, Brussels <http://www.riks.nl/projects/modulus>.
- MUETZELFELDT, R. & MASSHEDER, J. 2003. The Simile visual modelling environment. *European Journal of Agronomy* 18. 345–358.
- PEARSON, S. M. & GARDNER, R. H. 1997. Neutral models: useful tools for understanding landscape patterns. In: Bissonette, J. A. (ed.): *Wildlife and landscape ecology: Effects of pattern and scale*. Springer Verlag, New York. 215–230.

- PONTIUS, R. G., CORNELL, J. D. & HALL, C. A. S. 2000. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85. 191–204.
- PONTIUS, R. G. & SCHNEIDER, L. C. 2000. Land-use change validation by a ROC method. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85. 269–280.
- QUIGLEY, P. 2007. The Creation of Character Area Boundaries through the Analysis of HLC Polygons: A Technical Paper. In: *Black Country HLC*, English Heritage, London. 13 p.
http://www.english-heritage.org.uk/upload/pdf/Creation_of_Black_Country_Character_Areas_v4.pdf.
- ROSEGRANT, M., MEIJER, S. & CLINE, S. 2002. International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT): Model description. International Food Policy Research Institute, Washington, DC.
<http://www.ifpri.org/themes/impact/impactmodel.pdf>.
- SCHALDACH, R. & PRIESS, J. A. 2008. A Review of Modelling Approaches on the Regional to Global Scale.
<http://www.livingreviews.org/lrlr-2008-1>.
- SOARES-FILHO, B. S., ARAÚJO, A. DE A., CERQUEIRA, G. C. & ARAÚJO, W. L. 2001. DINAMICA – A Landscape Dynamics Simulation Software. Proceedings of the XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing (SIBGRAPI'01), Belo Horizonte, M G. Brazil.
- STEFFEN, W., SANDERSON, A., TYSON, P. D., JÄGER, J., MATSON, P. A., MOORE, B., OLDFIELD, F., RICHARDSON, K., SCHNELLNHUBER, H. J., TURNER, B. L. & WASSON, R. J. 2003. *Global Change and the Earth System. A Planet Under Pressure*. Springer, Berlin.
- STEPHENNE, N. & LAMBIN, E. F. 2004. Scenarios of land-use change in Sudano-sahelian countries of Africa to better understand driving forces. *GeoJournal*, 61. 365–379.
- STEVENS, D., DRAGIČEVIĆ, S. & ROTHLEY, K. 2006. *iCity*: A GIS-CA modelling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22. 761–773.
- STRENGERS, B., LEEMANS, R., EICKHOUT, B., DE VRIES, B. J. M. & BOUWMAN, A. F. 2004. The land-use projections in the IPCC SRES scenarios as simulated by the IMAGE 2.2 model. *GeoJournal*, 61. 381–393.
- TOBLER, W. R. 1979. CELLULAR GEOGRAPHY. IN: GALE, S. & OLSSON, G. (eds.): *Philosophy in Geography*. D. Reidel, Dordrecht. 279–386.
- VELDKAMP, A. & FRESCO, L. O. 1996. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to stimulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling*, 91. 231–248.
- VELDKAMP, A. & LAMBIN, E. F. 2001. Predicting land use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 85. 1–6.
- VELDKAMP, A., ZUIDEMA, G. & FRESCO, L. O. 1996. A model analysis of the terrestrial vegetation model of IMAGE 2.0 for Costa Rica. *Ecological Modelling*, 93. 163–773.
- VERBURG, P. H., VELDKAMP, W. S. A. & FRESCO, L. O. 1999. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China. *Applied Geography*, 19. 211–233.
- VERBURG, P. H., VELDKAMP, W. S. A., ESPALDON, R. L. V. & MASTURA, S. S. A. 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*, 30.3. 391–405.
- WASSENAAR, T., GERBER, P., ROSALES, M., IBRAHIM, M., VERBURG, P. H. & STEINFELD, H. 2007. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17. 86–104.

- WENG, Q.H. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management*, 64. 273–284.
- WHITE, R. & ENGELEN, G. 1997. Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24. 235–246.
- WU, F. 1998. Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 53. 293–308.
- WU, F. 2002. Calibration of stochastic cellular automata: the application to rural-urban land conversions. *International Journal of Geographical Information Science*, 16. 795–818.
- YUAN, H., VAN DER WIELE, C. F. & KHORRAM, S. 2009. An automated Artificial Neural Network system for land use/land cover classification from Landsat TM imagery. *Remote Sensing* 1. 243–265.
- ZUIDEMA, G., VAN DEN BORN, G. J., ALCAMO, J. & KREILEMAN, G. J. J. 1994. Simulating changes in global land-cover as affected by economic and climatic factors. *Water, Air and Soil Pollution*, 76. 163–198.