

DINAMICA EGO e Land Change Modeler para simulação de desmatamento na Amazonia brasileira: análise comparativa

Thiago Carvalho de Lima¹, Carolina Marques Guilen-Lima¹, Marianne Silva Oliveira², Britaldo Soares-Filho¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
CSR - Centro de Sensoriamento Remoto
carvalholimatcl@yahoo.com.br, carolmg@gmail.com, britaldo@csr.ufmg.br

² Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais
doizenne@gmail.com

Abstract: Environmental modeling is an important tool that allows making hypotheses, diagnostics, predictions and simulations, as well as communicating scientific results clearly. Dynamic modeling of landscapes had an intense development in recent decades, along with the growing availability of remote sensing data, the popularization of GIS and the creation of methods for spatial analysis and simulation. This study compares the performance, flexibility and usability of two platforms for dynamic land-use modeling widely used, Dinamica EGO and Land Change Modeler. The comparison is based on a case study of deforestation in the Brazilian Amazon. The softwares were calibrated for the period 1997 to 2000, with the same input data and similar parameters, and were used to simulate deforestation for the year 2003. We performed a compared validation of the results, using Kappa pixel-by-pixel indices, fuzzy reciprocal similarity and landscape metrics. The simulation performed by LCM showed better results for the first two validation methods, while DINAMICA EGO presented spatial metrics closer to the ones of the observed landscapes. It is concluded that both modelers generate coherent results, although with medium performance for the case studied. The softwares may serve to distinct purposes, being LCM best for end users who want a simplified tool for simulation, while DINAMICA EGO demands more knowledge from the user, but allows modification of the model structure, adapting it to specific needs.

Palavras-chave: LUCC models, environmental modeling, modelos de usoda terra, modelagem ambiental.

1. Introdução

A modelagem dinâmica da paisagem ganhou impulso nas últimas décadas devido à ampla disponibilização de dados de sensoriamento remoto e ao desenvolvimento e popularização de plataformas de geoprocessamento. Os modelos dinâmicos tornaram-se mais sofisticados com a implementação de abordagens utilizando autômatos celulares, lógica *fuzzy* e inteligência artificial, como redes neurais, sistemas multi-agentes (Paegelow e Camacho, 2008) e algoritmos genéticos. *Softwares* que integram essas tecnologias a sistemas de informação geográfica permitem a modelagem espacialmente explícita e dinâmica, sendo úteis para a simulação de alterações nas paisagens, para o entendimento de seus padrões e tendências e para a prospecção de cenários futuros. Dentre os programas disponíveis, destacam-se DINAMICA EGO e *Land Change Modeler*, por oferecerem ambientes mais acessíveis e de fácil uso (Follador et al., 2008).

DINAMICA EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) é uma plataforma de modelagem desenvolvida pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Por meio de uma variedade de operadores, chamados ‘functores’, que executam operações matemáticas, lógicas e de análise espacial, o usuário pode elaborar modelos espacialmente explícitos, além de utilizar algoritmos para calibração e validação das simulações (Soares-Filho et al., 2009). Por ser uma plataforma versátil, o *software* tem sido utilizado em modelos de variados fins, como dinâmica de uso da terra (Soares-Filho et al.,

2004; Teixeira et al., 2009; Godoy e Soares-Filho, 2008), espalhamento de fogo (Silvestrini et al., 2011) e modelos hidrológicos (Lima et al., *no prelo*).

O Land Change Modeler (LCM) é um módulo integrado ao *software* IDRISI desenvolvido pela *Clark Labs* da *Clark University*, EUA, e dispõe ferramentas para avaliação e projeção de mudanças de cobertura da terra e suas implicações para espécies, habitats e biodiversidade. O LCM apresenta-se em uma estrutura fixa que divide a modelagem em etapas como: análise das mudanças de cobertura da terra, cálculo dos potenciais de transição, simulação de mudanças futuras além de ferramentas para avaliação de intervenções planejadas no uso da terra e impactos para biodiversidade (Eastman, 2009).

DINAMICA EGO e LCM apresentam semelhanças em sua abordagem para simulação de mudanças na paisagem. Ambos são modeladores dirigidos aos dados (*data-driven models*), que identificam padrões na paisagem a partir de dados espaciais e temporais conhecidos e que aplicam equações de transição para projetar mudanças de cobertura do solo (Mas et al., 2011). As diferenças entre os modeladores referem-se principalmente aos métodos estatísticos utilizados para o cálculo dos potenciais de mudanças. No DINAMICA EGO há um operador de método bayesiano de pesos de evidência que é geralmente usado para esse fim. No LCM, é possível utilizar os métodos de regressão logística ou redes neurais (*multilayer perceptron*).

Alguns estudos têm apresentado abordagens comparativas entre os modeladores LCM e DINAMICA EGO para modelos de desmatamento (Follador et al., 2008; Fuller et al., 2011; Péres-Vega et al., 2012). Follador et al. (2008) indicam melhor performance do DINAMICA em termos de alocação espacial das mudanças. Já em Péres-Vega et al. (2012), o LCM apresentou melhor desempenho relativo na predição do mapa global de potenciais de mudanças para mais de uma transição. É possível que sejam obtidos resultados bastante distintos para cada modelador, o que pode estar relacionado mais às diferenças na parametrização do que aos métodos ou à capacidade dos modeladores utilizados (Fuller et al., 2011).

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo comparativo do desempenho dos modeladores DINAMICA EGO e *Land Change Modeller* para um modelo de desmatamento na região da Amazônia brasileira, utilizando-se os mesmos dados e parâmetros de entrada. Este artigo complementa trabalhos anteriores citados, com intuito de auxiliar o usuário na escolha do modelador mais adequado ao seu objeto de estudo e contribuir para a melhoria dos *softwares* de modelagem dinâmica da paisagem.

2. Metodologia

2.1 Modelo de Desmatamento

Para os dois modeladores foi utilizado o modelo de desmatamento previamente elaborado no DINAMICA EGO e disponível no próprio *software* (Soares-Filho et al., 2009). A área de estudo corresponde à cena de órbita 237 e ponto 67 do satélite Landsat 5- TM, que delimita uma região do estado de Rondônia na Amazônia brasileira. As imagens classificadas para o uso da terra pelo PRODES - Monitoramento da Floresta Amazônica brasileira por Satélite - para os anos de 1997, 2000 e 2003 (Figura 1) foram utilizadas como dados de entrada para o modelo. Foram consideradas apenas duas classes de uso da terra: “floresta” e “desmatamento” e foi investigada no modelo uma única transição: “floresta para desmatamento”. Foram usadas nos modelos as seguintes variáveis explicativas da configuração espacial das mudanças, ou determinantes espaciais: altitude, áreas protegidas, atração urbana, distância a estradas pavimentadas, distância a todas as estradas, distância a assentamentos, distância a rios, declividade, solos e vegetação.

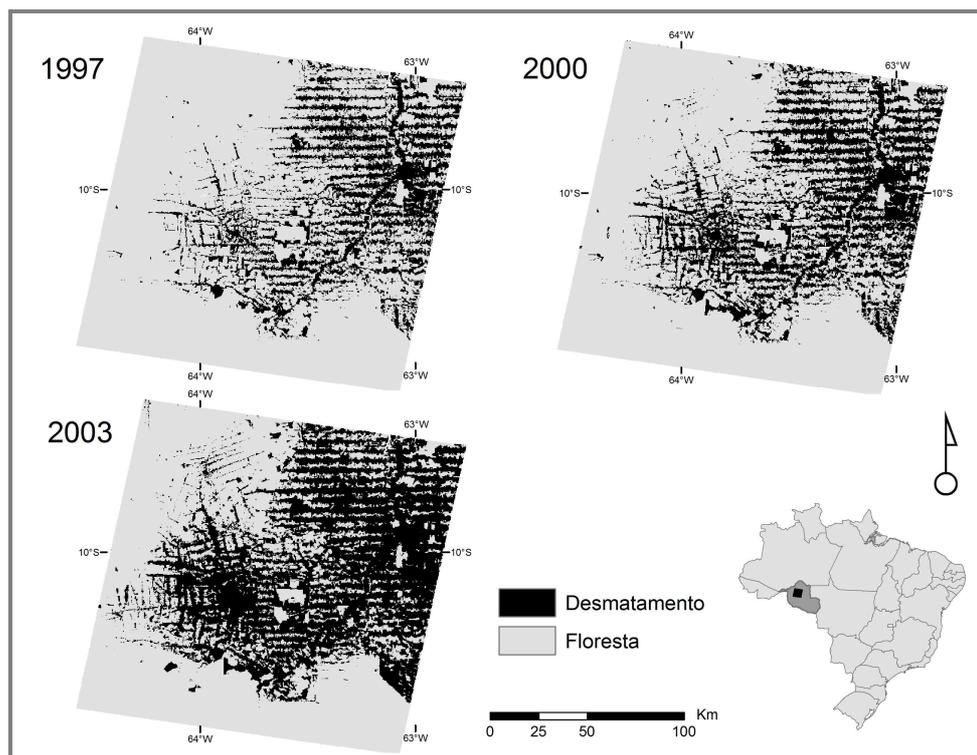


Figura 1: Mapas de paisagens utilizados no modelo de desmatamento.

2.2 Etapas da modelagem e modeladores

As etapas da modelagem para os modeladores DINAMICA EGO e LCM estão sintetizadas na Figura 2. Os dados de entrada do modelo consistem em dois mapas da paisagem, para datas distintas (inicial e final), além dos mapas dos determinantes espaciais. A partir dos mapas da paisagem, os modeladores realizam a estimativa da quantidade de mudanças, com base em cadeias markovianas, o que resulta numa matriz de transição contendo as taxas de mudanças a serem usadas na simulação. No LCM, esta etapa de análise de mudanças permite gerar gráficos com balanço de perdas e ganhos entre as classes.

A partir dos mapas de determinantes espaciais e dos mapas de mudanças da paisagem, são gerados mapas de probabilidades de mudanças, por meio de métodos estatísticos diferentes nos modeladores. No DINAMICA o potencial espacial de mudanças é calculado pelo do método bayesiano de pesos de evidência (Bonham-Carter, 1994; Rodrigues et al., 2007), que utiliza probabilidades condicionais para estabelecer a relação entre presença/ausência de mudança, dada a presença/ausência de determinado fator. Os pesos de evidência trabalham as probabilidades de transição relacionadas a cada determinante espacial, apenas posteriormente unindo-as num mapa global de probabilidades. No LCM, foi utilizado o método de regressão logística para o cálculo dos potenciais de transição, que opera a partir de amostras dos mapas de mudanças cujo tamanho é ajustável pelo usuário. No modelo em questão foi utilizado o tamanho de 10% para a amostra.

Por fim, a simulação das mudanças em ambos os modeladores é feita a partir da integração das taxas de transição com as probabilidades espaciais de mudanças (Figura 2). Para operar a alocação das mudanças quantificadas de acordo com as probabilidades obtidas, os modeladores utilizam diferentes métodos. No DINAMICA são utilizados os autômatos celulares *patcher* e *expander*. O primeiro cria novas manchas de desmatamento, a partir de um mecanismo de semeadura (Soares-Filho et al., 2009), enquanto que o segundo expande manchas de desmatamento pré-existent. No modelo, os operadores foram parametrizados com tamanho médio dos fragmentos igual a 25 ha para *patcher* e 20 ha para *expander*, variância do tamanho igual a 50 ha e isometria de 1.5 em ambos os operadores.

No LCM, a alocação pode ser realizada pelo método *soft* ou *hard prediction*. O primeiro baseia-se na caracterização de cada pixel quando à máxima probabilidade de transição a ele associadas e gera como produto um mapa contínuo da vulnerabilidade à mudança. O método *hard prediction* utiliza um algoritmo de alocação multicritério (Eastman et al., 1995) e resulta num mapa de mudanças simuladas com as mesmas classes dos mapas de entrada.

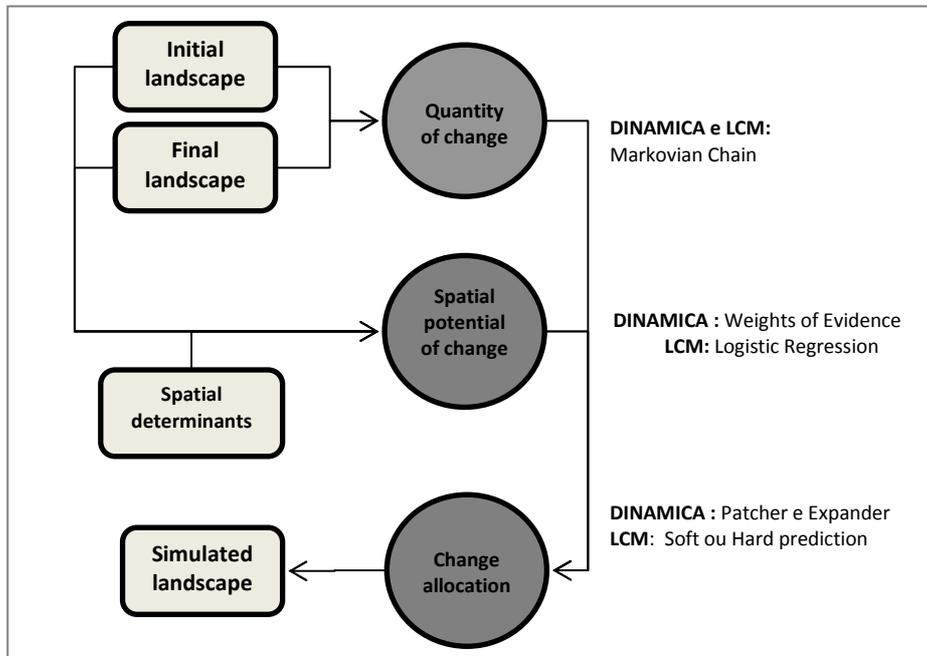


Figura 2: Fluxograma das etapas de modelagem para os modeladores DINAMICA EGO e LCM.

Para modelagem no *software* DINAMICA EGO foi utilizada a versão 1.8.8, disponível em “<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>”, para download gratuito. Para o LCM, foi utilizada a versão *Taiga* do *software* IDRISI (Eastman, 2009).

2.3 Calibração e Validação

Na calibração do modelo foram utilizados para ambos os modeladores os mapas de entrada dos anos de 1997 e 2000 e os mapas de 10 determinantes espaciais. No DINAMICA o modelo foi realizado em três iterações, cada uma correspondente a um ano do intervalo de tempo estipulado pelos dados de entrada.

A validação foi realizada para os mapas de mudanças geradas pelos modelos LCM e DINAMICA. Nesses mapas, as mudanças têm valor um e todo o resto da paisagem valor nulo, dessa forma a estrutura comum das paisagens, que se mantém inalterada no período, não influencia nos índices de validação. Para fins de análise, a validação foi separada entre validação quantitativa e espacial. Para a validação quantitativa, utilizou-se o mesmo modelo calibrado, porém atualizando-se a taxa de desmatamento para o período 2000 a 2003. O objetivo de fornecer a taxa atualizada do período é garantir que ambos os modeladores estejam com a quantidade correta de mudanças. Uma vez que o LCM não permite que a simulação seja projetada para o mesmo ano do mapa de entrada (2003), a matriz de transição do modelo calibrado foi alterada com as taxas calculadas pelo *software* DINAMICA para o período 2000-2003.

O desempenho dos modelos foi comparado através dos índices de estatística Kappa (K), Kappa diferenciado entre acertos quantitativos (K_histo) e de localização espacial (K_location) (Pontius, 2000; Pontius, 2002), calculados pixel-a-pixel (*crisp method*) pelo

aplicativo *Map Comparison Kit* (MCK) (Visser, 2004) que permite a comparação de mapas matriciais (*raster*). Além dos índices Kappa, para a validação quantitativa foi calculada a similaridade recíproca entre os mapas de mudança por lógica *fuzzy* (Hagen, 2003) no *software* DINAMICA. Pelo método de decaimento constante, um pixel de mudança não alocado exatamente no mesmo local do pixel de mudança observado é considerado correto ao se encontrar nos limites da vizinhança (Soares-Filho et al., 2009), esta que é determinada por janelas de tamanho variável, sendo neste estudo o tamanho analisado entre um a onze pixels.

Para a validação da estrutura espacial, foram calculadas as métricas de paisagem pelo *software* Fragstats (McGarigal e Marks, 1995) para os mapas de mudanças simuladas e observadas. Com base na avaliação apresentada por Cushman et al. (2008), e buscando-se avaliar os índices dos principais aspectos de uma paisagem, foram escolhidas quatro dentre as diversas métricas disponíveis: i) número de fragmentos (*proxy* de fragmentação), ii) índice de forma média dos fragmentos, iii) distância média ao vizinho mais próximo (*proxy* de conectividade) e iv) índice de agregação (McGarigal e Marks, 1995).

3. Resultados

A simulação de mudanças de uso da terra para o ano de 2003 com base na taxa de desmatamento de 1997-2000 resultou em subestimativas para a quantidade de mudanças, quando comparada à quantidade de mudanças observada na realidade. A atualização da taxa de mudanças para a taxa real do período 2000-2003 permitiu ressaltar a diferença entre os mapas simulados estritamente devido à alocação espacial, na qual houve a manutenção dos padrões obtidos anteriormente. O LCM produziu uma paisagem simulada com padrão de manchas de desmatamentos lineares, expandidas a partir das bordas de áreas desmatadas pré-existentes. Já o DINAMICA produziu um padrão espacial de mudanças mais “pulverizadas”, com manchas menores e mais dispersas na paisagem (Figura 3).

Os resultados da validação pelos índices Kappa (Tabela 1) demonstram que o modelo LCM obteve um índice de acertos aproximadamente o dobro daquele obtido pelo DINAMICA. Nos dois casos, a maior parte dos erros era devido à estimativa incorreta de quantidade de mudanças, como se pode concluir da comparação entre os índices Kappa_histo (quantidade de mudanças) e Kappa_location (alocação de mudanças). Quando a taxa de mudanças é atualizada para a taxa real do período, observou-se que, como esperado, o Kappa_histo é igual a 1, ou 100% de acerto, enquanto que a alocação espacial permanece com índices de acerto relativamente baixos, sendo 0.505 para o modelo LCM e 0.315 para o modelo DINAMICA.

Tabela 1: Resultados da validação pelo software MCK (*Map Comparison Kit*) para mudanças simuladas pelo LCM e DINAMICA.

Índice	Validação do modelo (taxa 1997-2000)		Validação espacial (taxa 2000-2003)	
	LCM	DINAMICA	DINAMICA	LCM
Kappa	0.432	0.212	0.505	0.315
Kappa_histo	0.697	0.547	1.000	1.000
Kappa_location	0.620	0.387	0.505	0.315

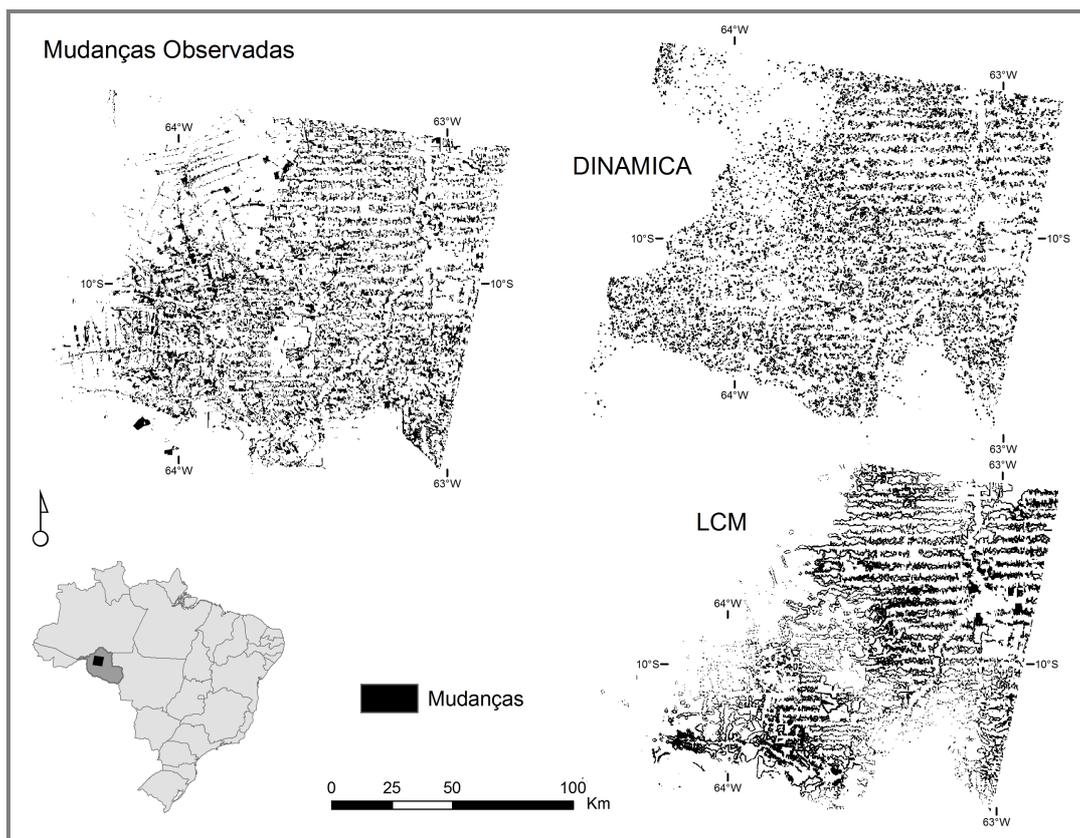


Figura 3: Mapa de mudanças observadas e mudanças simuladas no DINAMICA e LCM utilizando-se a taxa de transição real do período de 2000 a 2003.

O índice *fuzzy* de similaridade mínima recíproca (Figura 4) também demonstrou maior proximidade dos resultados do LCM com o mapa de mudanças reais. Observa-se que os índices convergem entre os dois modelos conforme se aumenta a janela de análise.

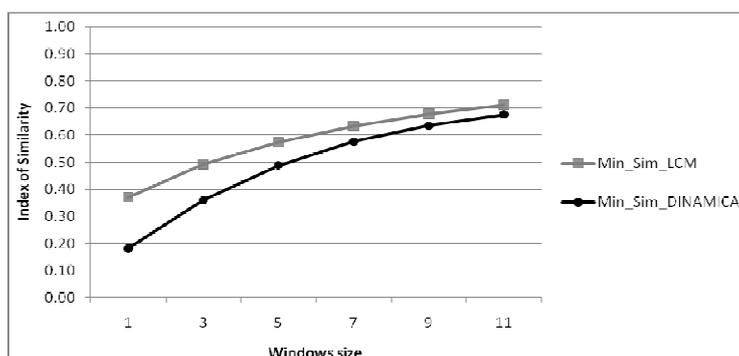


Figura 4: Resultados da validação por similaridade recíproca *fuzzy* calculada pelo software DINAMICA EGO para mudanças simuladas pelo LCM e DINAMICA.

Por fim, as métricas de paisagem calculadas para o mapa de mudanças simuladas com base na taxa atualizada de desmatamento (Tabela 2) indicam que, à exceção dos demais métodos de validação, o DINAMICA apresentou resultados mais próximos do real que o modelo LCM, como se observa pelos valores das métricas relativas ao número (NP), forma (SHAPE_NM) e agregação das manchas (AI).

Isso provavelmente deve-se ao fato de o mapa simulado pelo LCM apresentar manchas de desmatamento mais lineares, contornando áreas já desmatadas, o que não corresponde ao padrão real de desmatamentos. Exceção ocorre no índice de distância ao vizinho mais

próximo (ENN_MN), que corresponde ao aspecto de conectividade, o qual apresentou resultados iguais para ambos os modeladores.

Tabela 2: Métricas espaciais calculadas para o mapa de mudanças simuladas e observadas

Mudanças	NP	SHAPE_MN	ENN_MN	AI
Simuladas DINAMICA	3790	1.4026	0.0062	63.1037
Simuladas LCM	1800	1.4871	0.0062	70.3469
Observadas	3985	1.4148	0.0059	62.3984

4. Discussão e Conclusão

A validação indicou que ambos os modeladores tiveram uma capacidade mediana de predição da realidade para o modelo em questão (Kappa entre 0.3 e 0.5). O LCM apresentou maiores valores de ajuste pelos índices Kappa, Kappa modificados (K_histo e K_location) e similaridade recíproca *fuzzy*. Já para a estrutura espacial, de acordo com as métricas de paisagem, o DINAMICA EGO apresentou resultados mais próximos dos observados.

É importante destacar que as possibilidades de configuração espacial no DINAMICA são inúmeras, podendo aproximar-se ou afastar-se do padrão observado conforme os ajustes realizados pelo usuário nos operadores *patcher* e *expander*. Se por um lado o ajuste de parâmetros pode ser útil para tornar uma simulação verossímil, por outro lado não é recomendado realizar excessiva calibração, sob risco de se reduzir a capacidade de predição do modelo em situações diferentes das fornecidas na calibração. Esse paradoxo de super-especialização também vale para a criação do mapa de potenciais de transição, tanto pelos métodos adotados no DINAMICA EGO (pesos de evidência ou algoritmos genéticos) quanto pelos métodos usados no LCM (regressão logística ou redes neurais).

As estruturas do *Land Change Modeller* (LCM) e do DINAMICA EGO são visivelmente diferentes e, conseqüentemente, são apropriados para objetivos distintos. O primeiro é um modelo de simulação de mudanças de uso da terra, previamente elaborado, que é apresentado ao usuário na forma de abas onde são solicitados valores para parametrizar o modelo. Esse modelador apresenta a vantagem da simplicidade, permitindo que o usuário final, não necessariamente um pesquisador em modelagem, possa operar o modelo com facilidade. Como desvantagem, não permite ajustes estruturais, apenas a alteração dos parâmetros disponibilizados pelo *software*. Neste sentido, o modelo funciona como uma “caixa cinza”, em que se conhecem os dados de entrada, parâmetros e parte do seu funcionamento, porém os processos e estrutura do modelo são invisíveis ao usuário.

Com uma abordagem diferente, o *software* DINAMICA EGO apresenta-se como uma plataforma versátil de modelagem, que permite a criação e execução de modelos para diversos fins. Através de uma interface gráfica, o usuário pode usar diversos operadores, podendo ser implementados tanto modelos de paisagem quanto modelos econômicos, hídricos, climáticos, dentre outros. O usuário, para utilizar o *software*, necessita de conhecimentos mais profundos sobre modelagem, pois é necessário criar a própria estrutura do modelo. Se por um lado isso oferece uma desvantagem inicial, por outro pode mostrar-se um aspecto positivo, uma vez que um modelo pode ser adaptado às necessidades do objeto de estudo, fornecendo novos dados, adicionando interações e até mesmo integrando-o a outros modelos.

5. Referências Bibliográficas

Bonham-Carter, G. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Pergamon. 1994. 398 p.

Cushman, A. A., Mc Garigal, K., Neel, M.C. Parsimony in landscape metrics: strenght, universality and consistency. **Ecological indicators**, v.1. n. 5, p. 691-703, 2008.

- Eastman, J. R., W. Jin, P. A. K. Kyem, J. Toledano. Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 61, n.5, p. 539-547, 1995.
- Eastman, J.R. **IDRISI Taiga: Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: ClarkLabs. 2009. 327 p.
- Follador, M., Villa, N., Paegelow, M., Renno, F., Bruno R. Tropical deforestation modeling: comparative analysis of different predictive approaches. The case study of Peten, Guatemala. In: Paegelow, M. & Camacho, M.T.O. (eds.) **Modelling Environmental Dynamics – advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
- Fuller, D.O., Hardiono, M., Meijaard, E. Deforestation Projections for Carbon-rich Peat Swamp Forests of Central Kalimantan, Indonesia. **Environmental Management**. v. 48, n. 3, p. 436-447, 2011.
- Godoy, M. & Soares-Filho, B.S. Modelling intra-urban dynamics in the Savassi neighborhood, Belo Horizonte city, Brazil. In: Paegelow, M. & Camacho, M.T.O. **Modelling Environmental Dynamics – advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008. p. 319 -337.
- Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, 17 (3), p.235-249, 2003.
- Mas, J.F., Kolb, M., Houet, T., Paegelow, M., Camacho, M.T.O. Una comparación de programas de modelación de câmbios de cobertura / uso del suelo. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE. 5801 p.
- Mc Garigal, K. & Marks, B.J. **Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. Gen. Tech. Report PNW-GTR-351. Portland, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 1995. 122 p.
- Paegelow, M. & Camacho, M.T.O. **Modelling Environmental Dynamics – advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 390 p.
- Pérez-Vega, A., Mas, J.F., Ligmann-Zielinska, A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. **Environmental Modelling & Software**. v. 29, n.1, p. 11-23, 2012.
- Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., Costa, W.L.S. DINAMICA EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Florianópolis, Brasil, 21- 26 abril 2007, INPE, 3089-3096 p.
- Pontius Jr., R.G. Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 68 (10), p.1041-1039, 2002.
- Pontius Jr, R. G. & Schneider, L.C. *Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA*. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. V. 85, n.1-3, p. 239-248, 2001.
- Silvestrini, R.A., Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. **Ecological Applications** v. 21, n.5, p. 1573–1590, 2011.
- Soares-Filho, B., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G., Diaz, M.C.V., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p.745-764, 2004.
- Soares-Filho BS, Cerqueira G, Araujo W, Voll. **DINAMICA project**. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acessado em Janeiro de 2011.
- Soares-Filho, B. S., Rodrigues, H. O. , Costa, W.L. **Modeling Environmental Dynamics with DINAMICA EGO**. 2 ed (2010). Belo Horizonte, 2009. 120 p.
- Teixeira, A. M. G., Soares-Filho, B. S., Freitas, S., Metzger, J.P. Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: Implications for conservation. **Forest Ecology and Management**, v. 257, n. 4.p. 1219-1230, 2009.
- Visser, H. (Ed). **The MAP COMPARISON KIT: methods, software and applications**. RIVM report 550002005/2004. Bilthoven: RIVM. 2004. 127 p.