

Esboço de modelagem da dinâmica da paisagem no Município de Lages-SC

Marcos Wellausen Dias de Freitas¹
João Roberto dos Santos¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{freitas, jroberto}@dsr.inpe.br

Abstract. In this study, we attempted to outline a landscape dynamics modeling based on deterministic cellular automata in the municipality of Lages, SC, Brazil, between the 2002 and 2008 years. To evaluate this methodological strategy we used the approach based on the actual or historical land use for the generation of future scenarios and compared their results with a model with the same modeling logic (CLUE-S model). The spatial dynamics modeling between the years 2002 and 2008 was developed in accordance with the following steps: classification of multitemporal Landsat-TM images, exploratory spatial data analysis of the processes of land use and land cover change, definition of transition rates between 2002 and 2008, generation of probability maps based on logistic regression analysis and spatial allocation of land use and land cover types. The driving factors of land use and land cover change used in this preliminary modeling was Digital Elevation Model, slope, distance to rivers, distance to main and secondary roads, landscape units (geosystems), population density, literacy rate and dependency ratio. The validation of this approach was based on the fuzzy similarity method presented a better performance, while the CLUE-S model outperformed by the multi-resolution goodness of fit evaluation method. In general, the model generated by its own approach showed similar results to the CLUE-S model, which denotes the potential of this methodology.

Palavras-chave: spatial dynamic modeling, cellular automata, land use and cover change, modelagem dinâmica espacial, autômatos celulares, mudanças de uso e cobertura da terra.

1. Introdução

As mudanças de uso e cobertura da terra, conhecidas internacionalmente como LUC (Land Use and Cover Change), são um dos principais fatores de atenção na atualidade frente às questões ambientais globais em curso a partir de meados do século XX (Turner II et al., 2007). Os modelos teóricos e computacionais de mudanças de uso e cobertura da terra apresentam diferentes abordagens metodológicas de acordo com os dados disponíveis e com as áreas estudadas. Grande parte desses estudos vem atualmente utilizando dados e técnicas de Sensoriamento Remoto e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), em conjunto com ferramentas e métodos estatísticos multivariados e dados censitários ou de campo.

Neste trabalho, buscou-se um esboço de modelagem da dinâmica da paisagem baseado em autômatos celulares determinísticos no Município de Lages-SC, inserido na Bacia do Rio Uruguai, entre os anos de 2002 e 2008. O enfoque deste trabalho são as mudanças de uso e cobertura da terra ocorridas neste período e os fatores condicionantes físicos, ecológicos e sociais de tais mudanças que servem para a geração de cenários futuros. Para a avaliação desta estratégia metodológica, foi utilizada a abordagem que utiliza o histórico uso do solo ou o atual, para a geração de cenários futuros, comparando os seus resultados com um modelo que apresenta a mesma lógica de modelagem, o CLUE-S (Verburg et al., 2002).

2. Metodologia de Trabalho

A modelagem dinâmica espacial entre os anos de 2002 e 2008 foi desenvolvida de acordo com as seguintes etapas: classificação multitemporal de imagens Landsat-TM, análise espacial exploratória dos processos de mudanças de uso e cobertura da terra, definição de taxas de transição no período considerado, geração dos mapas de probabilidades de uso e espacialização das mudanças de uso e cobertura da terra.

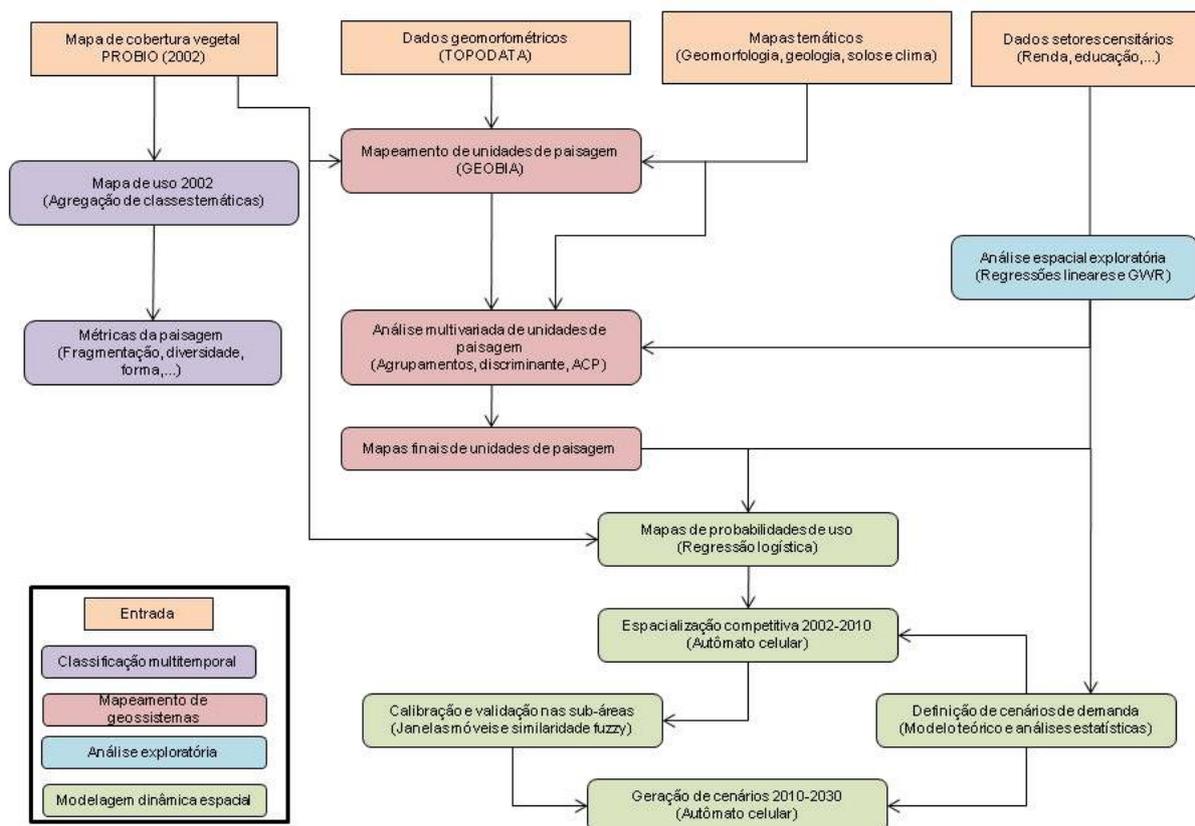


Figura 1. Fluxograma metodológico do presente trabalho.

2.1 Materiais

Para o mapeamento de uso e cobertura da terra foram utilizadas imagens multitemporais Landsat-5 TM, cena 221/79 (12/11/2002 e 03/10/2008), classificadas de acordo com procedimentos detalhados em Freitas e Santos (2010a). A base cartográfica foi composta por cartas topográficas na escala 1:100.000 e de malhas de municípios (17 no total) e setores censitários rurais de 2000 (206 no total). Os dados censitários utilizados foram do Censo Demográfico de 2000 no nível de agregação de setores censitários rurais. Dados geomorfométricos do projeto TOPODATA foram utilizados para a caracterização de tais variáveis (como o declividade e Modelo Digital de Elevação - MDE). Os softwares utilizados foram Definiens Developer 7 (classificação de imagens orientada a objetos), ArcGIS 9.3 (operações de geoprocessamento), Geoda 0.95i (análise espacial exploratória), SAM 3.0 (regressão espacial), XLStat 2009 (análise estatística), SPSS 17 (análise regressão logística), CLUE-S (modelagem dinâmica comparativa e validação), DINAMICA EGO (validação), ambientes Matlab e IDL de programação de rotinas (modelagem dinâmica própria).

2.2 Análise espacial exploratória

A análise espacial exploratória foi realizada com base em modelos de regressão linear e de regressão espacial global (SAR) e local (GWR), com resultados mais adequados da última, aplicados no nível de agregação de setores censitários para a definição de variáveis a serem utilizadas na modelagem preliminar. As variáveis dependentes foram definidas como as taxas de conversão dos processos de LUCC identificados, tais como: degradação, recuperação, expansão agrícola, retração agrícola, expansão da silvicultura e urbanização. Esta análise espacial exploratória (Freitas e Santos, 2010b) mostrou uma grande interação entre as variáveis físicas, ecológicas e sociais em praticamente todos os modelos, com destaque para variáveis sociais (densidade populacional, razão de dependência, taxa de alfabetização, idade

e renda), infraestruturais (distância a estradas) e topográficas (declividade e amplitude altimétrica) que foram utilizadas nas etapas posteriores da modelagem.

2.3 Definição de taxas de transição

A definição das taxas de transição foi realizada conforme o modelo DINAMICA EGO que realiza uma operação de tabulação cruzada dos mapas de uso e cobertura da terra inicial e final para geração da matriz de probabilidades de transição e definição de taxas de transição. Tais taxas são calculadas com base em cadeias de Markov, utilizadas para a projeção de taxas futuras de transição de acordo com o princípio de permanência das condições iniciais através de um processo estacionário (Soares-Filho, 1998; Soares-Filho et al., 2002).

2.4 Geração de mapas de probabilidades

Nesta pesquisa, a geração dos mapas de probabilidades de uso foi baseada na regressão logística stepwise (Hosmer e Lemeshow, 2000; Verburg et al., 2002; Soares-Filho, 2002), como no modelo CLUE-S. Como resultado desta abordagem foram produzidos mapas de probabilidades de mudanças de acordo com a seguinte função (Equação 1):

$$\text{Log} \left(\frac{P_i}{1-P_i} \right) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} \quad (1)$$

onde P_i é a probabilidade de uma célula ser convertida em um certo uso da terra k , em uma localização i e com X_n fatores condicionantes. Assim, foi utilizado o método acima exposto baseado em regressão logística, com o uso da ferramenta de conversão de arquivos do CLUE-S, para a geração de amostras balanceadas e com distâncias mínimas de amostragem.

2.5 Espacialização das mudanças de uso e cobertura da terra

A espacialização das mudanças de uso e cobertura da terra podem ser implementadas com base em autômatos celulares determinísticos (Ozah et al., 2010) e estocásticos (Soares-Filho, 2002), ou ainda através de métodos iterativos de alocação competitiva (Verburg et al., 2002). Tais modelos apresentam bons resultados, porém limitam a interação do modelador na definição das simulações, pois utilizam abordagem iterativa ou estocástica que permitem a alteração de alguns parâmetros, porém sem uma participação direta na definição das transições. Nesta pesquisa, a espacialização das mudanças de uso e cobertura da terra será gerada através de uma abordagem baseada em autômatos celulares determinísticos com vizinhança Moore (8 vizinhos), implementada em ambiente de desenvolvimento IDL e Matlab, a qual permite uma maior interação no processo de modelagem com a definição individualizada de cada tipo de transição (tanto da demanda quanto da forma espacial).

Em relação aos métodos vistos acima, a abordagem proposta permite uma maior participação do modelador no processo de modelagem através da definição das regras de transição para cada uso, baseada em operações relacionais aplicadas em planos de informação. Estes planos correspondem a: vizinhança (número de vizinhos; exemplo: maior que 6 vizinhos), probabilidade de uso/transição predominante (exemplo: com classe predominante de floresta) e dos mapas de probabilidades de uso ou transição (exemplo: igual ou maior a 0,75 de probabilidade de uso de campo); além da possibilidade de utilização dos fatores condicionantes diretamente nas regras de decisão (exemplo: espacializar um tipo de transição no geossistema A ou em setores censitários com taxas de alfabetização menores que 80%).

Esta abordagem para a geração dos modelos ainda está em fase de desenvolvimento, sendo composta atualmente pelas seguintes etapas: a) geração dos mapas de probabilidade de uso ou transição (FIGURA 1a); b) cálculo de vizinhos (FIGURA 1b) e de probabilidades predominantes de uso ou transição das células (FIGURA 1c); c) definição das transições e

regras de decisão através de um procedimento iterativo de comparação dos resultados com as taxas de transição, até serem atingidos valores aproximados; d) alocação das transições sobre o mapa inicial de uso e cobertura da terra. Um teste de tal abordagem foi realizado para o Município em Lages-SC, no qual foram utilizadas as regras de transição (Tabela 1) com programação de rotinas em IDL e Matlab.

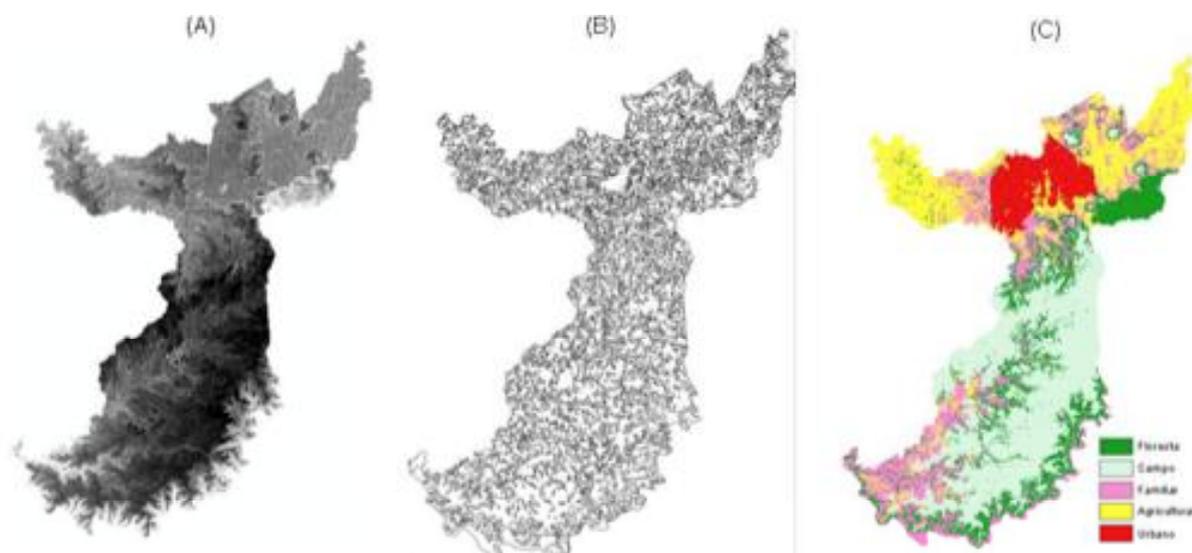


Figura 1. Mapa de probabilidade de uso e cobertura de floresta (a), mapa de número de vizinhos e mapa de probabilidades de uso e cobertura da terra (c).

Tabela 1. Regras de transição utilizadas na espacialização baseada em autômatos celulares.

Transição	Uso inicial	Vizinhança	Probabilidade
Floresta - Silvicultura	Floresta	<9	Silv.>0.45
Floresta - Agricultura Familiar	Floresta	<7	Fam.>0.70
Floresta - Agricultura Grande Porte	Floresta	<6	Cult.>0.99
Campo - Silvicultura	Campo	<9	Silv.>0.49
Campo - Agricultura Familiar	Campo	<9	Fam.>0.82
Campo - Agricultura Grande Porte	Campo	<5	Prob_maior = Agric.
Silvicultura - Agricultura Familiar	Silvicultura	<9	Fam.>0.85
Silvicultura - Agricultura Grande Porte	Silvicultura	<5	Prob_maior = Agric.
Agricultura Familiar - Floresta	Familiar	<9	Flor.>0.79
Agricultura Familiar - Silvicultura	Familiar	<9	Silv.>0.47
Agricultura Fam. - Agr. Grande porte	Familiar	<4	Prob_maior = Agric.
Agricultura Grande Porte - Silvicultura	Agricultura	<9	Silv.>0.45
Agricultura Grande Porte - Familiar	Agricultura	<9	Fam.>0.82

2.6 Calibração e validação

Na calibração e validação dos modelos foram utilizados procedimentos quantitativos como o procedimento de ajuste de múltipla resolução baseado em janelas móveis (Costanza, 1989) e da adaptação do método baseado na similaridade nebulosa (*fuzzy*) de Hagen (2003),

denominado como cálculo da similaridade recíproca (*Calc Reciprocal Similarity*). Este emprega janelas de múltipla resolução com uma função de decaimento exponencial com a distância para a comparação entre os mapas iniciais, finais e simulados de uso e cobertura da terra (Soares-Filho et al., 2009). Nesta etapa, a abordagem empregada foi comparada com resultados oriundos do modelo CLUE-S (Verburg et al., 2002) para a mesma área de estudo, com as mesmas taxas de transição e com os mesmos mapas de probabilidade, porém com um processo de alocação competitiva para a espacialização das mudanças de uso e cobertura da terra.

3. Resultados e Discussão

Para fim de avaliação preliminar da modelagem de uso e cobertura da terra entre os anos de 2002 e 2008, foram comparados os modelos CLUE-S e a abordagem própria implementada preliminar (Figura 2) com a referência que é o mapa de uso e cobertura da terra de 2008. Neste foram classificadas as seguintes classes de uso e cobertura da terra: floresta, campo nativo, silvicultura, agricultura familiar, agricultura de grande porte, urbano e água (Freitas e Santos, 2010a). Todas as classes que apresentaram mudanças de uso e cobertura da terra foram modeladas com exceção da classe urbano e água para fins de melhor comparabilidade dos resultados com os do modelo CLUE-S.

Os fatores condicionantes utilizados nesta modelagem preliminar foram MDE, declividade, distância a rios, distância a estradas principais e secundárias, unidades de paisagem (geossistemas), densidade populacional, taxa de alfabetização e razão de dependência. Os resultados da análise de regressão logística utilizados na geração dos mapas de probabilidades podem ser vistos na Tabela 2, sendo que todos os fatores utilizados no CLUE-S e na abordagem própria baseada em autômatos celulares foram os mesmos.

Tabela 2. Coeficientes das análises de regressão logística usados nos modelos CLUE-S e na abordagem própria.

Variável	Floresta		Campo		Silvicultura		Familiar		Agricultura	
	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)	Beta	Exp(β)
Constante	4.234		-2.404		5.237		9.686		23.595	
MDE	-0.004	0.996	0.008	1.008	-	0.994	-0.009	0.991	-0.022	0.978
					0.006					
Declividade	0.029	1.029	-0.038	0.963					-0.137	0.872
Distância a rios	0	0.999	0.001	1.001						
Distância a vias secundárias	0	1	0	1			0	0.999	-0.001	0.999
Distância a vias principais					0	1	0	1		
Taxa alfabetização			-0.055	0.947						
Renda média			0	0.999						
Geossistemas										
Geossistema 0									-22.185	0
Geossistema 3			-20.102	0	-	0.182	-0.979	0.376		
					1.706					
Geossistema 5					-	0.779			2.706	7.973
					0.250					
Geossistema 6	1.163	3.199	-3.270	0.038						
ROC	0.676		0.778		0.690		0.795		0.916	

As avaliações quantitativas dos procedimentos de avaliação de similaridade nebulosa (Hagen, 2003) de multi-resolução de qualidade do ajuste de Costanza (1989), que podem ser vistas na Tabela 3, mostraram resultados satisfatórios nos dois modelos com dificuldades de espacialização de mudanças de uso e cobertura da terra. Porém, os resultados dos modelos mantiveram um padrão semelhante ao encontrado no uso e cobertura da terra do ano de 2002 que foi a base para a análise de regressão logística e a geração dos mapas de probabilidades. Os maiores problemas em ambos se referem às áreas de ocupação nova por agricultura familiar e com a classe de silvicultura que apresenta um padrão diretamente baseado no comportamento do empreendedor, de difícil captação pelas variáveis utilizadas nos modelos e, provavelmente, relacionados com os resultados da análise de regressão logística. O método de similaridade nebulosa avalia apenas as partes onde ocorreram mudanças e neste a abordagem própria apresentou um desempenho melhor, enquanto o modelo CLUE-S apresentou um melhor desempenho pelo método de avaliação multi-resolução de qualidade do ajuste que avalia o desempenho dos modelos de modo geral.

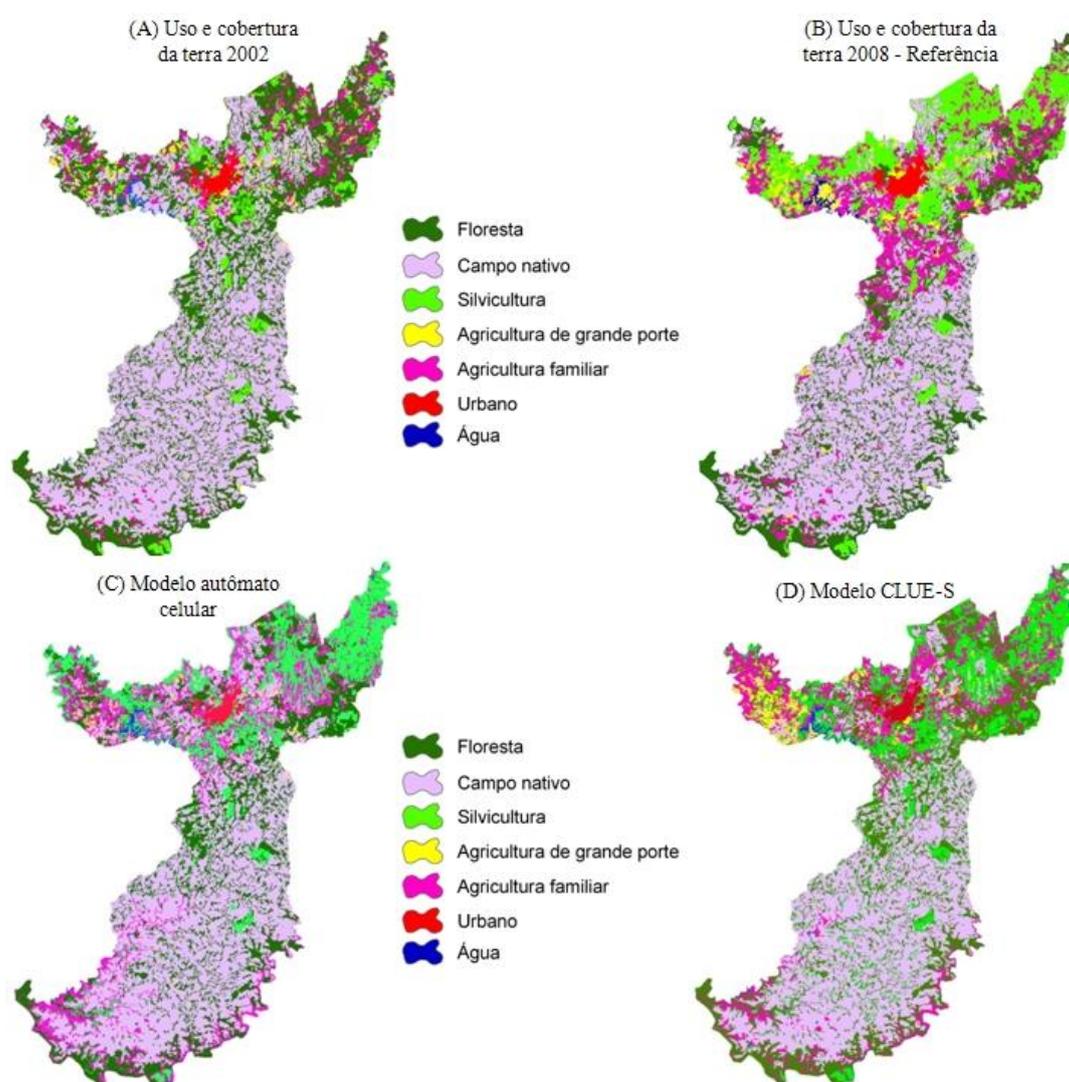


Figura 2. Comparação visual entre: a) classificação de uso e cobertura da terra de 2002, b) classificação de uso e cobertura da terra de 2008 (referência), c) cenário 2008 do modelo de autômato celular e d) cenário 2008 do modelo CLUE-S.

Tabela 3. Resultados da avaliação de similaridade nebulosa (Hagen, 2003) e avaliação multi-resolução de qualidade do ajuste (Costanza, 1989).

Janela	Similaridade nebulosa		Avaliação multi-resolução de qualidade do ajuste	
	Própria	CLUE-S	Própria	CLUE-S
1x1	0.270993	0.230166	0.616779	0.625244
3x3	0.352054	0.32297	0.651533	0.662788
5x5	0.396843	0.375887	0.671796	0.684413
7x7	0.419709	0.401849	0.685252	0.698707
9x9	0.431868	0.414302	0.695074	0.709272
11x11	0.438423	0.420377	0.702636	0.717152

4. Conclusões

De maneira geral, o modelo gerado por abordagem própria apresentou resultados semelhantes ao do CLUE-S, o que denota a potencialidade do uso desta metodologia. Esta abordagem pode ser utilizada em modelos multi-escala, tanto no nível regional como no de paisagem, permitindo uma grande flexibilidade com a possibilidade de incorporação de diferentes características ao modelo de autômato celular com regras de transição determinísticas. Novas funcionalidades e estratégias podem ser implementadas como a definição de funções de geração de manchas (através de procedimentos morfológicos como filtros de dilatação), a geração de mapas dinâmicos de distância a determinados usos a cada passo de tempo da simulação dos cenários e a possibilidade de implementação de regras baseadas em comportamento estocástico.

Referências Bibliográficas

- Costanza, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, 1989, p.199-215.
- Freitas, M. W. D.; Santos, J. R. Classificação multitemporal orientada a objetos aplicada às mudanças de uso e cobertura da terra. **IX Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal**. 2010a.
- Freitas, M. W. D.; Santos, J. R. Linking remote sensing and social data for the investigation on driving factors of land use and cover change (LUCC) in Brazilian south region. **Latin American Remote Sensing Week**. 2010b.
- Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, p.235-249, 2003.
- Hosmer, D. W.; Lemeshow, S. **Applied logistic regression**. New York, John Wiley & Sons, 2000, 391p.
- Ozah, A. P.; Adesina, F. A.; Dami, A. A deterministic cellular automata model for simulating rural lan use dynamics: a case study of Lake Chad Basin. “**Core spatial databases - updating, maintenance and services – from theory to practice**”. Haifa, ISPRS Archive v.XXXVIII, part 4-8-2-W9, 2010, p.75-82. Disponível em: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4_8_2-W9/papers/final_105_ISPRS_Ozah_Dami_Adesina_CA.pdf. Acesso: 28 de julho de 2010.
- Soares-Filho B. S.; Cerqueira, G; Penachin, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154 n. 3, 2002, p. 217-235.
- Soares-Filho B. S.; Rodrigues, H.; Costa, W. L. **Modelling environmental dynamics with Dinamica EGO**. Belo Horizonte, CSR-UFMG, 2009, 114p.

Turner II, B. L.; Lambin, E. F.; Reenberg, A. The emergence of land change science for global environment change and sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.104, n.52, 2007, p.20666-20671.

Verburg, P. H. Soepboer, W.; Veldkamp, A.; Limpiada, R.; Espaldon, V.; Mastura, S. S. A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental Management**, v. 30, n. 3, 2002, p. 391–405.