

## **Modelagem dinâmica espacial das mudanças de cobertura da terra na região sul do Estado de Roraima, norte da Amazônia**

Maristela Ramalho Xaud<sup>1</sup>  
Cláudia Maria de Almeida<sup>2</sup>  
Haron Abraham Magalhães Xaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Roraima  
BR- 174, km 8, Distrito Industrial, 69.301-970 – 69301-970 – Boa Vista - RR, Brasil  
{maristela.xaud, haron.xaud}@embrapa.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
almeida@dsr.inpe.br

**Abstract.** In order to assess the annual rate of shallow cut deforestation in the Brazilian Amazonia, INPE (Brazilian National Institute for Space Research) uses PRODES (“Project for the Satellite Monitoring of the Brazilian Amazon Forest”) system. PRODES database can be accessed from INPE website, which enables further studies on deforestation patterns in different subsets of such a heterogeneous region. The present study focuses on simulating the spatial dynamics of deforestation state of Roraima, in the far north of the Brazilian Amazon, using PRODES database and a cellular automata model within a time span of five years (2000-2005). The cellular automaton (CA) platform DINAMICA EGO was used in this study. It is driven by landscape maps from the initial and final time of the simulation period and by spatial variables (dynamic and/or static). The landscape maps contained the following land cover classes: forest, non-forest, deforestation, drainage, and background. The spatial variables selected for the analysis were distance to roads, distance to urban sites, and distance to deforested areas. The results indicated that the transition ‘forest to deforestation’ was more strongly associated with the variables ‘distance to deforestation’ and ‘distance to roads’ and presented though a weak relation with ‘distance to urban sites’. The results shed light on the drivers of land cover change processes in this region, mainly the conversion from forest to deforested areas, indicating the minor role of urban sites as compared to the decisive importance of roads and previously deforested areas.

**Palavras-chave:** desmatamento, PRODES, autômato celular, deforestation, cellular automata model

## 1. Introdução

Na Amazônia brasileira, a intensificação do processo de desmatamento teve início a partir da década de 1970, quando o Governo Brasileiro consolidou projeto para integração da Amazônia ao restante do país, priorizando a ocupação da região (Becker, 1997; Becker, 2001; Machado, 1998).

Um elemento central para materializar essa integração foi o planejamento e abertura de rodovias, que deram nova dimensão no que tange ao acesso a novas áreas florestais, o que anteriormente só era possível através dos rios. As margens das rodovias são consideradas como artérias do desmatamento e áreas prioritárias para estudos mais detalhados sobre o padrão deste fenômeno de conversão florestal. Segundo Alves (2002a,b), dois terços do desmatamento encontra-se dentro de uma faixa de 50 km ao longo das estradas pavimentadas. Avanços na área de sensoriamento remoto e processamento de imagens de satélite nas últimas décadas têm sido utilizados pelo Brasil, tendo em vista o conhecimento mais aprofundado sobre os comportamentos temporais e regionais dos desmatamentos da Amazônia. Desde 1988, o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) desenvolve projeto pioneiro no monitoramento contínuo do desmatamento na Amazônia Brasileira através do Projeto PRODES (Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite), cujo objetivo é estimar a taxa anual e a extensão do desmatamento bruto da Amazônia. Na metodologia utilizada pelo INPE, é considerado desmatamento “a conversão de áreas de floresta primária por atividades antropogênicas para o desenvolvimento de atividades agropecuárias”, o que significa corte raso da cobertura florestal. As imagens utilizadas são principalmente do satélite LANDSAT (INPE, 2008).

Em Roraima, o desmatamento apresenta particularidades interessantes em função de suas dimensões geográficas, ecológicas e sociais: sua área de florestas naturais é maior que todo o Estado do Acre; há numerosos projetos de assentamentos rurais (31); associado ao processo de desmatamento existe o forte impacto das queimadas na região, que em determinadas áreas mais susceptíveis se transforma em incêndios florestais; e as características climáticas diferenciadas em relação ao restante da Amazônia propiciam uma sazonalidade reversa, que pode causar impacto no desmatamento principalmente na região sul do Estado.

De acordo com a avaliação dos dados PRODES divulgados para o Estado de Roraima, constata-se uma taxa média de 270 km<sup>2</sup>/ano, perfazendo até o ano de 2005, um total estimado de aproximadamente 7500 km<sup>2</sup> de área desmatada, o que representa aproximadamente 1% de todo o desmatamento ocorrido na Amazônia Legal brasileira no mesmo período. No período observado de 2000 a 2005, os municípios do sul do Estado (Caroebe, Rorainópolis, São Luiz e São João da Baliza) foram os que mais desmataram (Xaud e Xaud, 2005).

O objetivo do presente trabalho é avaliar a dinâmica espacial do desmatamento no sul do Estado de Roraima, no período de 2000 a 2005, através da modelagem baseada em autômatos celulares.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na região sul do Estado de Roraima, no extremo norte da Amazônia Legal Brasileira, e engloba os principais eixos de desmatamento dos quatro municípios da região (Rorainópolis, São Luiz, São João da Baliza e Caroebe) (Figura 1).

O processo de ocupação na região teve início nos anos 80 e foi concentrado ao longo do trecho sul da BR-174 (que liga Venezuela a Manaus, passando por Boa Vista) e da BR-210 (Rodovia Perimetral Norte, planejada para ligar o Oceano Atlântico ao Pacífico). A atração

provocada para ocupação dessa região foi motivada pela relativa facilidade de escoamento da produção para o mercado de Manaus, a princípio tendo a extração madeireira como atividade principal, sendo seguida posteriormente de atividades agropecuárias (atualmente banana e pecuária bovina). Predominam projetos de assentamento com propriedades de 60 a 100 ha.

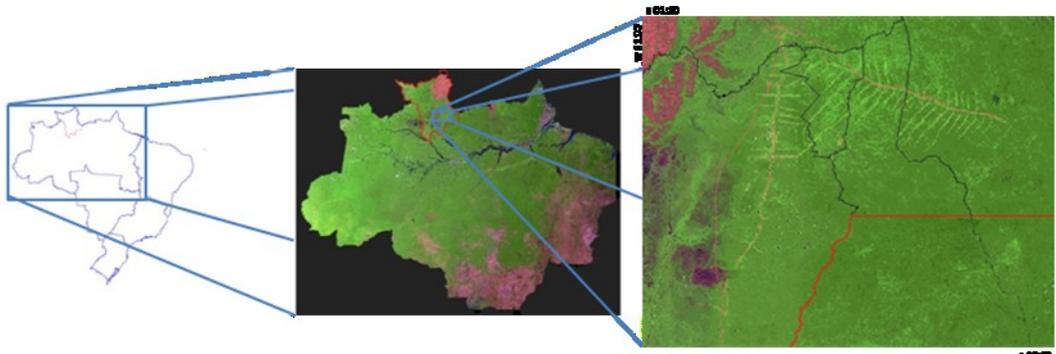


Figura 1: Localização da área de estudo

## 2.2 Material

Os dados de desmatamento utilizados foram derivados do mosaico estadual de Roraima do banco de dados do PRODES (INPE, 2008), período de 2000 a 2005. Os mosaicos estaduais têm resolução espacial reamostrada para 120 metros. Outros dados utilizados (estradas e sedes municipais) foram derivados da base oficial do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Os softwares utilizados para o desenvolvimento do trabalho foram: SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas), versão 4.3.3; IDRISI versão 32.2; ER MAPPER versão 7.1; e DINÂMICA EGO versão 1.2.

## 2.3 Método

Foi utilizado o modelo de simulação espacial de dinâmica da paisagem - DINAMICA - para gerar as simulações de desmatamento da área de estudo. O DINAMICA é uma plataforma de modelagem de domínio público e foi desenvolvida pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (Soares-Filho *et al.*, 2002).

Para as simulações, os dados reais do desmatamento (PRODES) em 2000 e 2005 foram usados para quantificar a conversão da floresta para desmatamento. Um conjunto de variáveis relacionadas a esse processo foi selecionado para, juntamente com parâmetros internos do DINAMICA, fornecer uma simulação do desmatamento para o ano de 2005. A metodologia aplicada em cada fase do processo de modelagem (aquisição dos dados, seleção de variáveis, análise exploratória, cálculo de probabilidades, parametrização e validação) será tratada de forma detalhada.

### Aquisição dos dados

Os dados de desmatamento acumulado para os anos de 2000 e para o período de 2000 a 2005 foram agrupados do banco de dados do PRODES, através da junção dos incrementos anuais da legenda utilizada pelo projeto. As classes utilizadas para o trabalho foram: floresta, não-floresta, desmatamento acumulado 2000, desmatamento 2000-2005, hidrografia e fundo.

A definição do polígono a ser estudado dentro da região de interesse foi realizada da seguinte maneira: primeiramente foram selecionados os municípios da região sul do Estado (Caroebe, Rorainópolis, São Luiz e São João da Baliza) e depois foi recortado um retângulo

envolvente, de forma a adequar uma área que englobasse o fenômeno de estudo (desmatamento). Esse procedimento foi necessário tendo em vista a extensão da área total dos municípios e a concentração do desmatamento ao longo das rodovias (aproximadamente  $\frac{1}{4}$  da área total).

### Seleção das variáveis

A seleção das variáveis explicativas foi baseada em estudos anteriores em outras regiões da Amazônia (Aguilar, 2006; Alves, 2002b, Laurence *et al.*, 2002) e na disponibilidade de dados para a região de estudo, tendo em vista o caráter exploratório e a análise local de fatores determinantes. Assim, as variáveis utilizadas se basearam nas distâncias em relação a estradas, sedes municipais e áreas desmatadas. Visando discretizar os mapas de distância, criando faixas de distância consideradas adequadas ao processo em análise, foram utilizadas rotinas de calibração automática disponíveis no DINAMICA, baseadas no algoritmo de generalização de linhas, conforme proposto por Goodacre *et al.* (1993).

### Análise exploratória

Para a definição dos pesos das variáveis explicativas, foi empregado o método estatístico “pesos de evidência”, que pressupõe a independência de eventos. Assim, no processo de modelagem, verificou-se inicialmente uma eventual existência de dependência entre os mapas de variáveis. Foram utilizados o Índice de *Cramer* (V) e o *Joint Information Uncertainty* (U) ou “Índice de Incerteza de Informação Conjunta” (Bonham-Carter, 1994), os quais operam com valores reais e percentuais, respectivamente, de áreas de sobreposição entre diferentes categorias (no caso, faixas de distância) de dois mapas de variáveis explicativas, visando avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre ambos.

### Cálculo das probabilidades

A probabilidade global de transição de floresta para áreas desmatadas na área de estudo foi calculada por meio de uma operação de tabulação cruzada, que produziu como saída uma matriz de transição entre os mapas de cobertura inicial e final do período de simulação (2000-2005).

Para o cálculo da probabilidade local (ou espacial) de transição da cobertura da terra, o DINAMICA gerou um mapa de probabilidade que apresentou valores diferenciados para cada célula, com base na estimativa dos pesos positivos de evidência (W+). Os W+ são obtidos a partir de um cálculo que utiliza resultados de uma operação de tabulação cruzada entre o mapa de transição de cobertura e as variáveis estáticas, a qual desconsidera as áreas cuja cobertura da terra no tempo inicial não seja floresta. Os W+ indicam a atração entre uma determinada transição de cobertura, no caso o desmatamento, e uma dada variável estática. O valor de W+ representa a influência de cada nível ou faixa de distância de cada variável nas probabilidades locais ou espaciais de transição (Bonham-Carter, 1994). Quanto mais elevado o valor de W+, maior será a chance de ocorrer a transição em função da presença prévia de determinado nível da variável ou evidência. De forma contrária, quando o valor de W+ é negativo, isto indica que menor é a probabilidade da transição de cobertura ocorrer em função da presença prévia do respectivo nível da evidência.

Para avaliar se o modelo foi bem calibrado, isto é, se o conjunto de variáveis explicativas selecionadas foi o mais adequado e se a definição das faixas de distância foi ótima, foi checado se esse mapa apresentou o máximo de coincidência possível entre as áreas com valores elevados de probabilidade e as áreas que de fato sofreram desmatamento (transição de floresta para áreas desmatadas).

### Parametrização

Com intuito de alocar as mudanças no processo de modelagem, o DINAMICA apresenta dois algoritmos de transição: *expander* e *patcher*. A função *expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de certa classe de cobertura da terra. A função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas, através de um mecanismo de constituição de sementes (Soares-Filho et al., 2002).

No presente estudo foram utilizados três conjuntos de valores de *expander* e *patcher* visando entender o fenômeno em questão, em relação à localização das mudanças. Para as áreas médias e variâncias dos tamanhos das novas manchas de desmatamento, tanto por *expander* como por *patcher*, foram utilizados os valores de 50 ha e 30 ha, respectivamente, com variâncias de 80 ha e 50 ha. Para o índice de isometria das manchas, foi utilizado o valor de 1,5, que caracteriza um equilíbrio entre compactidade e fragmentação das manchas (Tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros dos modelos testados no trabalho

Parâmetros		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
<i>expander</i>		0,8	0,5	0,2
<i>patcher</i>		0,2	0,5	0,8
Área média	<i>expander</i>	50		
	<i>patcher</i>	30		
Variância	<i>expander</i>	80		
	<i>patcher</i>	50		
Isometria <i>expander/patcher</i>		1,5		

### Validação

Para avaliar o desempenho do modelo de simulação, medidas de similaridade *fuzzy* foram aplicadas em um contexto de vizinhança local, de forma a identificar a similaridade de padrões espaciais entre o mapa simulado e o respectivo mapa de referência, isto é, o mapa real de cobertura no tempo final da simulação (mapa PRODES de 2005).

O método de Hagen (2003), empregado neste trabalho, baseia-se no conceito de “*fuzziness of location*” (dubiedade de localização), no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma, e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança. A escolha da função de decaimento mais apropriada e do tamanho da janela de amostragem depende da incerteza dos dados e do limiar de tolerância do erro espacial.

### 3. Resultados e Discussão

Na determinação das correlações entre variáveis, os índices de *Cramer* e *JIU* (*Joint Information Uncertainty*), mostraram que todas as variáveis são importantes para explicar o fenômeno, mas que “distância a desmatamento” e “distância a estradas” apresentaram maior correlação.

A Tabela 2 apresenta a matriz de transição, resultante da operação de tabulação cruzada entre os mapas de cobertura inicial (2000) e final (2005), a qual fornece os percentuais de conversão de cobertura da terra, o que corresponde, no caso particular deste trabalho, à probabilidade global de transição de floresta para desmatamento, estimada em 3,17%. As

classes “Desmatamento”, “Hidrografia” e “Não-floresta” não sofreram alterações de cobertura durante o período de estudo.

Tabela 2: Matriz de transição de cobertura da terra no período de 2000 a 2005.

Cobertura da terra		2005			
		Floresta	Desmatamento	Hidrografia	Não-floresta
2000	Floresta	0,9683	0,0317	0	0
	Desmatamento	0	1	0	0
	Hidrografia	0	0	1	0
	Não-floresta	0	0	0	1

A Figura 2 mostra graficamente como se comportam os valores de W+ para as variáveis explicativas “distância a desmatamento” e “distância a estradas”.

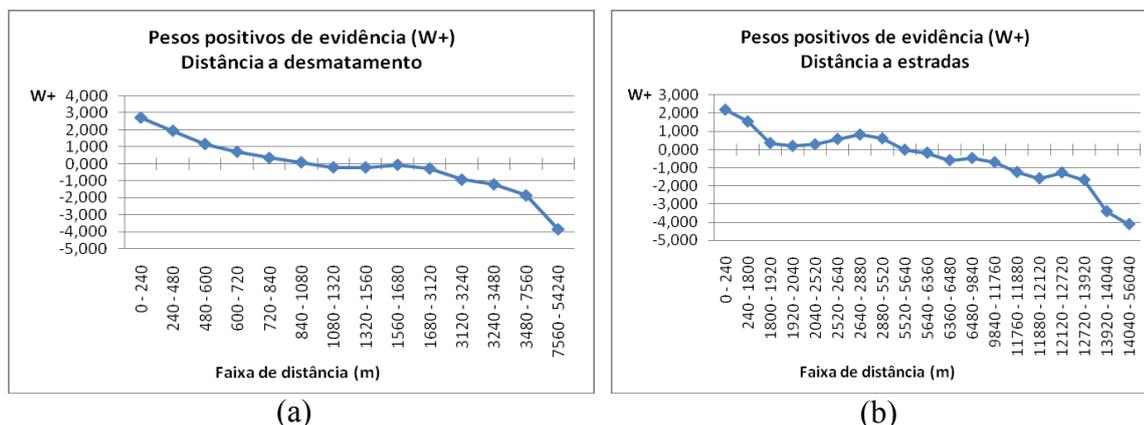


Figura 2: Comportamento dos pesos positivos de evidência (W+) das variáveis “distância a desmatamento” (a) e “distância a estradas” (b), por faixa de distância.

A curva dos valores de W+ da variável “distância a desmatamento” indica a concentração de pesos com os maiores valores nas primeiras faixas de distância, o que aponta para o padrão de avanço do desmatamento em torno de áreas previamente desmatadas, no período estudado.

Para a variável “distância a estradas”, observa-se comportamento semelhante, apresentando valores positivos para as faixas de distância até aproximadamente 5 km das estradas.

Em relação aos resultados dos modelos (variando *expander* e *patcher*) utilizados nesse estudo, foram avaliados os valores máximos de similaridade para cada uma das janelas de amostragem, de acordo com o método de Hagen (Tabela 3). O modelo 2 que equilibra valores de *expander* e *patcher* (0,5) foi o que apresentou melhores resultados na validação, principalmente quando se considera as janelas maiores (7x7, 9x9 e 11x11).

Tabela 3: Valores máximos de similaridade fuzzy para os modelos testados

Modelo	3x3	5x5	7x7	9x9	11x11
1	0,3509	0,4922	0,6115	0,7080	0,7819
2	0,3519	0,4983	0,6215	0,7191	0,7929
3	0,3578	0,5013	0,6191	0,7140	0,7882

#### 4. Conclusões

O presente trabalho desenvolveu um experimento de modelagem dinâmica espacial, baseado em autômatos celulares, com finalidade de avaliar o desmatamento no sul do estado de Roraima, no período de 2000 a 2005. Apesar das variáveis utilizadas não representarem todo o conjunto de condicionantes do processo de desmatamento na área, elas representam fatores indutores estratégicos para uma primeira avaliação exploratória na região.

Das três variáveis avaliadas - distância a desmatamento, distância a estradas e distância a sedes, as duas primeiras se apresentaram superiores na explicação do fenômeno desmatamento na região estudada.

O modelo que destinou metade das transições ocorridas na área de estudo a um padrão de expansão de manchas previamente existentes de desmatamento, sendo a outra metade a partir de manchas novas, foi o que obteve melhores resultados de validação.

Em trabalho futuro, os autores pretendem avaliar outras variáveis, inclusive decompondo a variável distância a estradas: estradas principais e estradas secundárias.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa e ao INPE pelo apoio disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

#### Referências Bibliográficas

- Aguiar, A.P.D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia**. 2006. 182p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.
- Alves, D.S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 23, no. 14, 2903-2908, 2002a.
- Alves, D. Analysis of geographical patterns of deforestation in Brazilian Amazônia the 1991-1996 period. In: C. Woods and R. Porro, Eds. **Pattern and Process of Land use and Forest Change in Amazon**. University of Florida, Gainesville. 2002b p. 95-106.
- Becker, B. K. **Revisão das políticas de ocupação da Amazônia**: é possível identificar modelos para projetar cenários? In: *Parcerias Estratégicas*, n. 12, 2001.
- Becker, B.K. **Amazônia**. Ed. Ática. São Paulo. 5ª edição. 112 p. 1997.
- Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994, 305 p.
- Goodacre, A. K.; Bonham-Carter, G. F.; Agterberg, F. P.; Wright, D. F. A statistical analysis of the spatial association of seismicity with drainage and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, v. 217, p. 285-305, 1993.

Hagen, A. Multi-method assessment of map similarity. In: 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, 2003, Palma, Spain. **Anais...** Palma: Universitat de les Illes Balears, 2003. p. 171–182.

Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE). **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por satélites – Sistemas PRODES**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.  
Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes>

Laurance, W.; Albernaz, A. K.; Schroth, G.; Fearnside, P. M.; Bergen, S.; Venticinque, E.; Dacosta, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. **Journal of Biogeography**, v. 29, p. 737-748, 2002.

Machado, L. A. A fronteira agrícola na Amazônia brasileira. In: Becker, B. K; Christofoletti, A.; Davidoch, F. R. Geiger, P. P. **Geografia e Meio Ambiente no Brasil**. São Paulo: Companhia das Letras, 1998. p. 181-217.

Soares-Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; Pennachin, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 217-235, 2002.

Xaud, M.R; Xaud, H.A.M. **Desmatamento no Estado de Roraima**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2005. 18 p. (Embrapa Roraima, Documentos, 8).