

# **MODELAGEM DINÂMICA DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA**

*Dynamic deforestation modeling in the Amazon*

ARIMATÉA DE CARVALHO XIMENES<sup>1</sup>  
CLÁUDIA MARIA DE ALMEIDA<sup>2</sup>  
SILVANA AMARAL<sup>1</sup>  
MARIA ISABEL SOBRAL ESCADA<sup>1</sup>  
ANA PAULA DUTRA DE AGUIAR<sup>1</sup>

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Divisão de Processamento de Imagens – DPI. e-mail: ari.ximenes@gmail.com; {silvana, isabel, anapaula}@dpi.inpe.br

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Divisão de Sensoriamento Remoto – DSR. e-mail: almeida@dsr.inpe.br

## **RESUMO**

Modelos dinâmicos baseados no paradigma de autômatos celulares surgem como uma alternativa viável para a análise do rápido crescimento das taxas de desmatamento na Amazônia. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo simular o desmatamento na região de São Félix do Xingu, sudeste do Pará, utilizando essa classe de modelos como ferramenta para a compreensão dos fatores condicionantes do desmatamento. Dados reais do desmatamento em 1997 e 2000 foram usados para identificar o processo de supressão da floresta na região. Um conjunto de variáveis relacionadas ao processo foi selecionado para, juntamente com parâmetros internos do modelo, fornecer uma simulação do desmatamento para o ano de 2000. A simulação gerada apresentou um índice de similaridade fuzzy elevado, indicando a eficácia do modelo. A variável que teve maior contribuição nas simulações obtidas foi “distâncias a áreas desmatadas em 1997”, o que confirma assertivas de estudos científicos anteriores para a região sobre a prevalência do padrão de avanço do desmatamento em torno das áreas pioneiros.

**Palavras-chave:** Desmatamento; Amazônia; Autômatos celulares; Modelagem dinâmica.

**ABSTRACT**

Dynamic models operating on a cellular automata (CA) basis have arisen as a feasible alternative for the analysis of the ever increasing deforestation rates in the Amazon. In this sense, this work aims at simulating deforestation in the area of São Félix do Xingu, southeastern part of Pará State, employing such class of models as a tool for understanding the main driving factors of deforestation. Real data of deforestation in 1997 and 2000 were used to assess the forest suppression extent in the study area. A set of explaining variables related to deforestation together with internal parameters of a CA model were used to generate a simulation for the year 2000. The provided simulation output presented a high fuzzy similarity index, what indicates the model effectiveness. The main driving variable takes the “distance to deforested areas in 1997”, into consideration which confirms statements of previous scientific studies for this region concerning the predominance of new deforestation patches in the surroundings of pioneer areas.

**Keywords:** Deforestation; Amazon Forest; Cellular automata; Dynamic modeling.

**1. INTRODUÇÃO**

Com a finalidade de preservar a biodiversidade e mitigar os efeitos adversos do desmatamento, diversas ferramentas de geotecnologias têm sido usadas para indicar áreas prioritárias para a conservação bem como direcionar ações do poder público. A simulação de sistemas constitui-se em um exemplo do uso de tais ferramentas, pois auxilia no entendimento dos mecanismos indutores e processos de desenvolvimento de sistemas ambientais. Ao determinar como os sistemas evoluem diante de um conjunto de circunstâncias, chamadas de condições de contorno, podem-se representar cenários traduzidos por diferentes quadros socioeconômicos, políticos e ambientais (SOARES-FILHO et al., 2001), e, assim, antecipar a ocorrência de certos fenômenos, como mudanças de cobertura e uso da terra, incluindo-se o desmatamento. Segundo Openshaw (2000), as simulações ou modelos computacionais geram informações qualitativas e quantitativas de fenômenos complexos da natureza. Desse modo, modelos de dinâmica espacial podem ser definidos como representações matemáticas de processos ou fenômenos do mundo real, nos quais o estado de uma dada localização na superfície terrestre muda em resposta a alterações nas suas forçantes ou variáveis explicativas (BURROUGH, 1998).

Os modelos de dinâmica espacial ancoraram-se usualmente no paradigma de autômatos celulares (ou “cellular automata” - CA). Wolfram (1983) define autômatos celulares como idealizações matemáticas dos sistemas físicos, no qual o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme, com uma variável discreta em cada localidade (atributo ou estado da célula), que

evolui em passos de tempo discretos. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente, baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de regras locais (WOLFRAM, 1983).

A região do município de São Félix do Xingu, juntamente com as regiões do norte do Mato Grosso e do sul do Amazonas, foram apontadas por Becker (2005) como as três grandes frentes de ocupação na Amazônia. Segundo Becker (2005), essas frentes constituem as novas fronteiras amazônicas, ou seja, fronteiras móveis, que diferem em sua gênese das fronteiras amazônicas dos anos 1970 essencialmente em três aspectos: a migração dominante é intra-regional, e principalmente rural-urbana; a expansão das frentes tem como forte componente o capital privado, apresentando uma dinâmica regional caracterizada por uma maior diversidade de atores locais, principalmente madeireiras, pecuaristas e produtores de grãos instalados na região, e, finalmente, possuem um grau de acessibilidade e conectividade maior, contando com uma rede de circulação mais densa do que a da década de 1970. Dados recentes de desmatamento mostram que São Félix do Xingu foi o município que apresentou os maiores valores de desmatamento entre os anos de 2000 a 2006. Do total de área desmatada observada para a Amazônia Legal nos anos de 2005 ( $665.854 \text{ km}^2$ ) e 2006 ( $679.899 \text{ km}^2$ ), São Félix do Xingu foi responsável por  $13.626 \text{ km}^2$  (2,0%) e  $14.496 \text{ km}^2$  (2,1%), respectivamente (INPE, 2006). Parte da explicação para a história de ocupação dessa região está vinculada ao extrativismo da borracha, exploração do mogno, mineração, garimpo, pecuária e colonização privada e pública, sendo hoje a pecuária a principal atividade econômica desenvolvida na região (ESCADA et al., 2007).

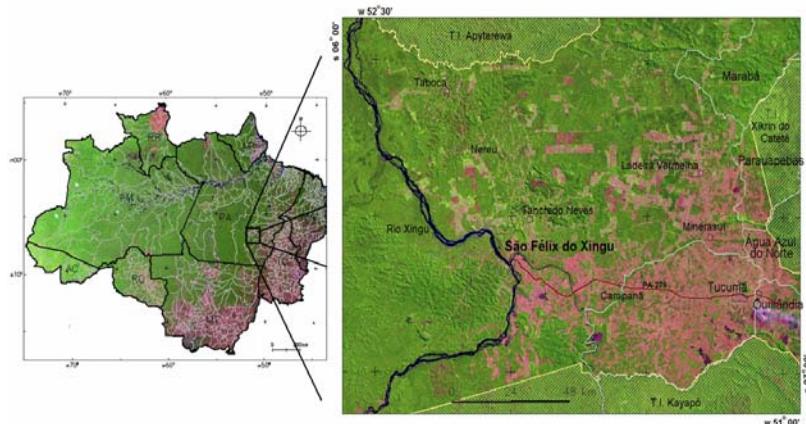
Este trabalho se propõe a contribuir para a metodologia de modelagem por autômatos celulares, visando ao estudo dos processos que condicionam as atividades de desmatamento. Tendo o município de São Félix do Xingu uma dinâmica de alteração de uso e cobertura da terra intensa e persistente desde o final da década de 1980, este trabalho usou uma plataforma de modelagem por autômatos celulares para simular processos de desmatamento entre 1997 e 2000, buscando compreender os fatores condicionantes do desmatamento nesse período.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) comprehende grande parte do município de São Félix do Xingu e adjacências, no sudeste do Estado do Pará, cortado longitudinalmente pelo rio Xingu, um dos maiores tributários do rio Amazonas. Os dados encontram-se no Sistema de Projeção Policônica, Datum SAD-69, entre as coordenadas de longitude  $52^{\circ}30'$  a  $51^{\circ}00'W$ , e de latitude  $05^{\circ}52'$  a  $07^{\circ}07'S$ . Além do município de São Félix do Xingu, a área estudada engloba as sedes dos municípios de Ourilândia do Norte e Tucumã, parte dos municípios de Marabá,

Parauapebas e Água Azul do Norte. Em São Félix do Xingu, a área de estudo compreende as seguintes localidades e distritos: Vila Taboca, Nereu, Tancredo Neves, Carapanã, Minerasul e Ladeira Vermelha. Parte das Terras Indígenas Apyterewa, Kayapó e Xinkrin do Cateté também compõem esse recorte geográfico.

Figura 1- Localização da área de estudo: São Félix do Xingu e municípios adjacentes.



A área de estudo corresponde à porção do município de São Félix do Xingu que pode ser considerada como uma região de povoamento consolidado. Na década de 1980, essa área correspondia às frentes pioneiras, com processos de uso e ocupação da terra intensos e concentrados ao longo do eixo da rodovia PA-279, que liga Tucumã a São Félix do Xingu (SHIMINK e WOOD, 1992; GEOMA, 2004). A região é caracterizada pela presença de grandes fazendas, concentração fundiária e, muitas vezes, formas ilícitas de apropriação da terra (ESCADA et al., 2005).

Embora a região atualmente tenha como principal atividade econômica a pecuária, a exploração de minério (principalmente cassiterita e ouro), desde os anos 1970, teve um papel importante na economia e estruturação da região. Inicialmente, o transporte do minério era realizado utilizando o rio Xingu, seus afluentes e transporte aéreo (SANTANA, 2007). A partir da primeira metade da década de 1990, a mineração entrou em declínio, deixando como legado uma rede de estradas que conectam as fazendas da região e que diminuíram consideravelmente a importância do transporte aéreo e fluvial (AMARAL et al., 2006; ESCADA et al., 2007).

### 3. MODELO DE SIMULAÇÃO DE DESMATAMENTO

O modelo de simulação espacial de dinâmica da paisagem - DINAMICA - foi utilizado para gerar as simulações de desmatamento da área de estudo. O

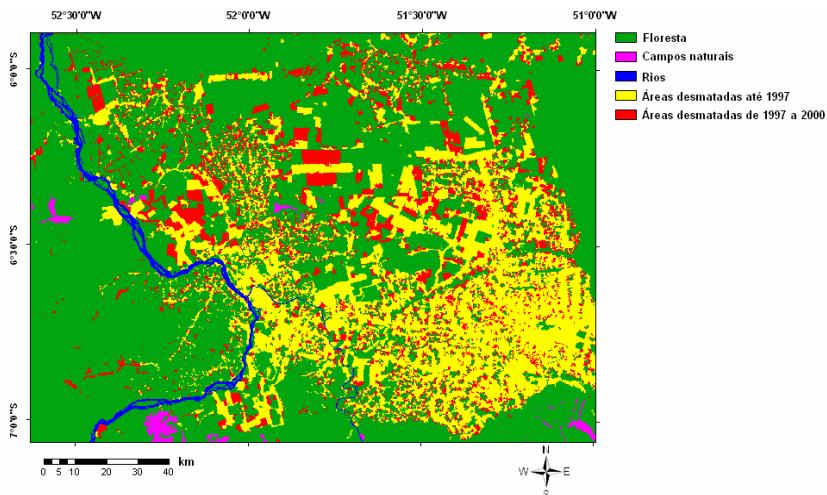
DINAMICA opera a partir da vizinhança de Moore (janela 3x3) e apresenta a vantagem de utilizar algoritmos estocásticos de alocação de cobertura da terra. Essa plataforma de modelagem é de domínio público e foi desenvolvida pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (SOARES-FILHO et al., 2002).

Para as simulações, os dados reais do desmatamento em 1997 e 2000 foram usados para quantificar a conversão da floresta para outros tipos de coberturas na região. 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 2000. Nas próximas seções, 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.

### 3.1 - Dados de Desmatamento

O mapa de desmatamento original, contendo as classes de floresta, campos abertos, rios, desmatamento até 1997 e o incremento do desmatamento no período de 1997 a 2000, foi adquirido a partir do projeto PRODES Digital (INPE, 2006) e é apresentado na Figura 2. O processamento dos dados de entrada foi realizado no Idrisi Kilimanjaro (EASTMAN, 2003).

Figura 2 - Mapa de desmatamento do PRODES de 1997 a 2000.



O mapa do PRODES foi reclassificado de modo a gerar o mapa de cobertura da terra referente aos anos de 1997 (Figura 3) e de 2000 (Figura 4). Como

o projeto PRODES não considera áreas de campos naturais para o levantamento do desmatamento, este trabalho também se limitou a simular somente o desmatamento nas áreas de floresta. Em vista de generalizações adotadas nos mapas do PRODES, apenas o rio Xingu e seu afluente rio Fresco são visíveis na classe Rios, uma vez que os cursos d'água de menor porte foram desconsiderados.

Figura 3 - Mapa de cobertura em 1997, resultante da reclassificação do mapa de desmatamento do PRODES.

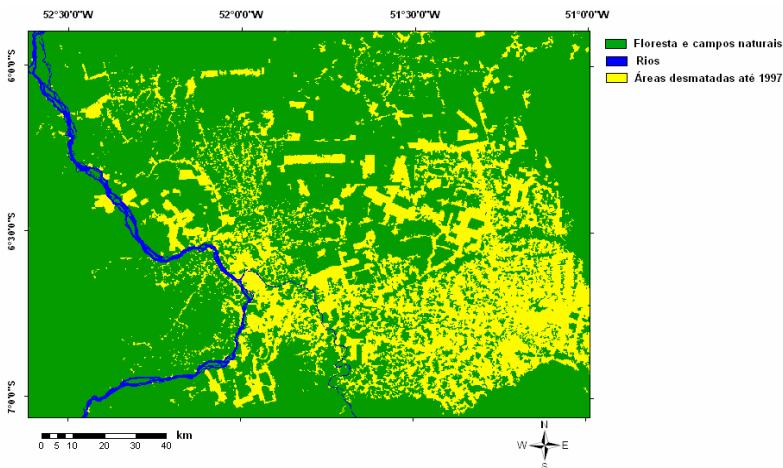
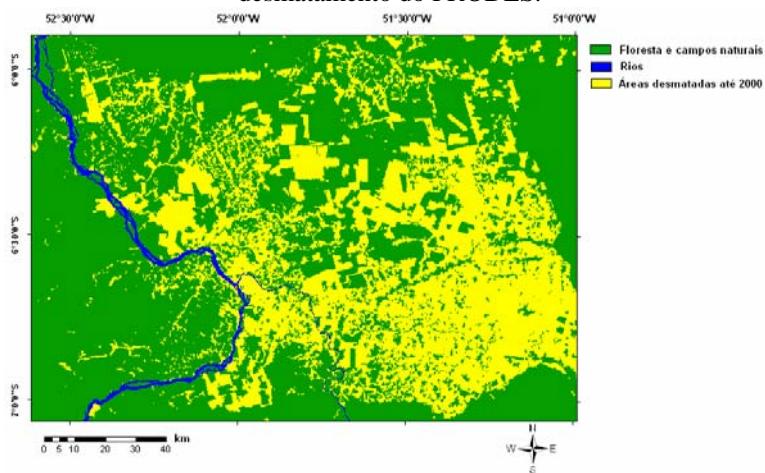


Figura 4 - Mapa de cobertura em 2000, resultante da reclassificação do mapa de desmatamento do PRODES.



### 3.2 - Variáveis Explicativas

A escolha adequada das variáveis explicativas é um fator determinante para o sucesso do uso de modelos. É precisamente através de suas relações com a variável dependente que se definem as células com maior ou menor probabilidade de transição de cobertura da terra. Neste trabalho, as variáveis testadas e utilizadas foram baseadas em estudos anteriores (ALVES, 2002; LAURENCE et al., 2002; AGUIAR et al., 2007; SOARES-FILHO et al., 2006; PEREIRA et al., 2007; BRANDÃO JÚNIOR et al., 2007), que mostram a influência de variáveis conhecidas no processo de desmatamento. Existem diversos fatores que podem influenciar o desmatamento, porém, as dificuldades em relação à obtenção de dados torna-se uma limitação no processo de modelagem. Contudo, foram testadas seis variáveis de distância em relação a: (i) estradas pavimentadas, (ii) estradas não pavimentadas, (iii) cidades, (iv) rios e (v) áreas desmatadas.

Através da análise visual do mapa de desmatamento de 1997, foi possível observar que as distâncias às estradas e cidades têm pouca influência sobre o processo do desmatamento. Em 1997, a ocupação já havia se consolidado, reduzindo a disponibilidade de terras para o desmatamento situadas próximas a estradas e núcleos urbanos. Apesar da reduzida importância do transporte fluvial na região, conforme anteriormente exposto, constatou-se o surgimento de focos de desmatamento nas imediações dos rios Xingu e Fresco, no período de estudo, os quais, embora ocorram em menor escala, justificaram a inclusão da variável “distâncias a rios” no modelo.

As variáveis estáticas foram construídas a partir dos arquivos reclassificados do PRODES (Figura 3) e correspondem ao mapa de distâncias a rios e a áreas desmatadas até 1997. Para a discretização dos mapas de distâncias, isto é, geração de faixas de distâncias ótimas (Figuras 5 e 6), foram utilizadas rotinas de calibração automática disponíveis no DINAMICA 2.4, baseadas no algoritmo de generalização de linhas, conforme proposto por Goodacre et al. (1993).

Figura 5 - Variável estática “distâncias a rios”, definida em metros, considerando o rio Xingu e o rio Fresco.

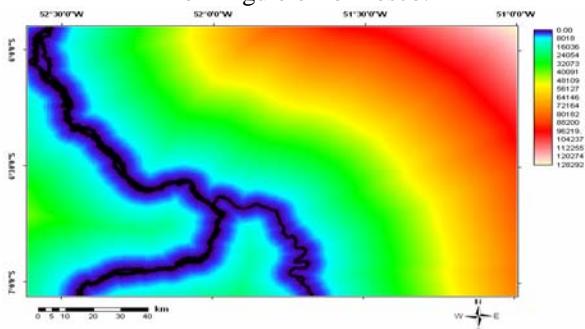
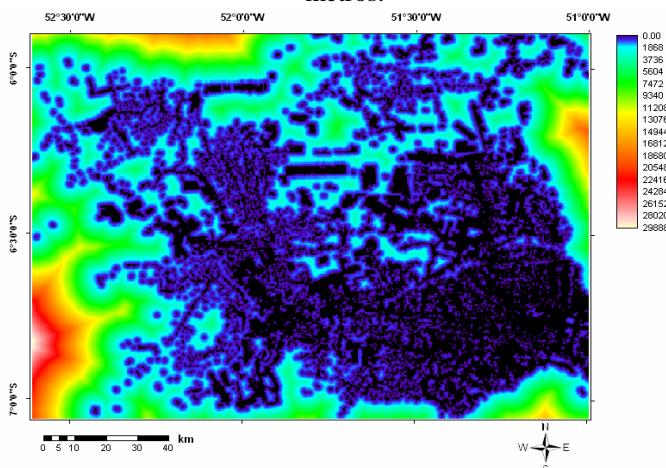


Figura 6 - Variável estática “distâncias às áreas desmatadas em 1997”, definidas em metros.



## 4. O PROCESSO DE MODELAGEM

### 4. 1 - Análise Exploratória dos Dados

O método estatístico “pesos de evidência” foi empregado nesse experimento de modelagem para a definição dos pesos das variáveis explicativas. Esse método é inteiramente baseado no “Teorema de Bayes” ou da probabilidade condicional, o qual pressupõe a independência de eventos. Neste sentido, deve-se inicialmente verificar a eventual existência de dependência entre os mapas de variáveis. Para tanto, 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. O “Joint Information Uncertainty”, ao trabalhar com valores relativos de áreas de sobreposição, tende a ser mais robusto que o Índice de Cramer, pois evita o risco de tendenciosidade representado por valores absolutos de áreas.

Bonham-Carter (1994) reporta que valores inferiores a 0,5 tanto para o Índice de Cramer ( $V$ ) como para a Incerteza de Informação Conjunta ( $U$ ) sugerem uma tênue dependência espacial entre as variáveis consideradas, o que não suscita o descarte de nenhuma delas do modelo. Assim, adota-se o limiar de 0,5 para se decidir sobre a inclusão ( $V$  ou  $U < 0,5$ ) ou exclusão ( $V$  ou  $U > 0,5$ ) de variáveis no modelo. No presente trabalho, o índice  $V$  obtido foi baixo, com valor de 0,21, confirmando que ambas variáveis previamente selecionadas poderiam ser

empregadas simultaneamente no modelo. O valor do índice  $U$  foi de 0,0485, o que mais uma vez confirmou a coerência de permanência das duas variáveis no modelo.

#### **4.2 – Cálculo da Probabilidade Global de Transição**

As probabilidades globais de transição referem-se à quantia total de mudanças para cada tipo de transição da cobertura da terra em um dado período de simulação, sem se ater a particularidades espaciais locais, que são aquelas pertencentes a cada célula da área de estudo em termos de características do sítio físico ou de infra-estrutura.

No experimento de modelagem deste trabalho, e em demais experimentos nos quais se dispõem dos mapas de cobertura da terra inicial e final, 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 produz como saída uma matriz de transição entre os mapas de cobertura inicial e final do período de simulação (1997-2000).

#### **4.3 – Cálculo das Probabilidades Locais de Transição**

De forma diversa das probabilidades globais, as probabilidades locais de transição são calculadas para cada célula  $e$ , sendo assim, consideram as especificidades naturais e antrópicas do sítio físico. Para o cálculo das probabilidades de transição de cobertura da terra em cada célula, representada por suas coordenadas  $x$  e  $y$ , foi utilizada uma equação que converte a fórmula de *logit* para uma fórmula de probabilidade comum. O *logit* corresponde ao logaritmo natural da chance ou odds, que consiste na razão entre a probabilidade de transição da cobertura ocorrer e a probabilidade complementar de não-ocorrência. Este conceito advém do método bayesiano de pesos de evidência, a partir do qual se pode obter a probabilidade de transição da cobertura pela manipulação algébrica da fórmula do *logit*, conforme segue (Bonham-Carter, 1994):

$$P_{x,y} \{T/V_1 \cap V_2 \cap \dots \cap V_n\} = \frac{O\{T\} \cdot e^{\sum_{i=1}^n W_{x,y}^+}}{1 + O\{T\} \cdot \sum_{j=1}^t e^{\sum_{i=1}^n W_{x,y}^+}}, \quad (1)$$

em que:

$P_{x,y}$  = probabilidade de transição da cobertura em cada célula de coordenadas  $x,y$ ;

$T$  = transição de cobertura da terra;

$V_i$  = refere-se a cada uma das variáveis explicativas para a transição de cobertura (no caso desse experimento, há apenas duas);

$O\{T\}$  = representa a chance ou *odds*, que consiste na razão entre a probabilidade de transição da cobertura ocorrer e a probabilidade complementar de não-ocorrência, expressa por  $P\{T\}/P\{\bar{T}\}$ ;

$t$  = corresponde a todas as transições possíveis de cobertura da terra (no caso da área de estudo,  $t = 1$ , pois a única transição considerada é de floresta para áreas desmatadas); e

$W^+_{x,y}$  = refere-se aos pesos positivos de evidência para cada nível (faixa de distância) das variáveis explicativas, o qual é dado por:

$$W^+ = \log_e \frac{P\{V_i/T\}}{P\{V_i/\bar{T}\}} \quad (2)$$

Os pesos positivos de evidência (*positive weights of evidence* ou  $W^+$ ), 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 (Figuras 5 e 6), 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.

Com base na estimativa dos  $W^+$ , o DINAMICA gera um mapa de probabilidade local (ou espacial) de transição da cobertura da terra, que apresenta valores diferenciados para cada célula. Para avaliar se o modelo está bem calibrado, isto é, se o conjunto de variáveis explicativas selecionadas é o mais adequado e se a definição das faixas de distância é ótima, esse mapa deve apresentar as áreas com valores elevados de probabilidade ao máximo possível coincidentes com as áreas que de fato sofreram desmatamento (transição de floresta para áreas desmatadas).

#### 4.4 - Definição dos Parâmetros Internos do DINAMICA

O DINAMICA apresenta dois algoritmos de transição, responsáveis pela alocação de mudanças de cobertura da terra: *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).

A partir de uma análise visual, não se verificou, durante o período de estudo, a existência de formações de manchas de desmatamento por processos de difusão, isto é, em meio à floresta, o que é possibilitado pela função *patcher*. Sendo assim, todas as transições da simulação foram produzidas pela função *expander*, a qual, conforme exposto acima, simula a ocorrência de manchas de desmatamento a partir da expansão de áreas previamente desmatadas.

As definições do tamanho médio e variância do tamanho das novas manchas de desmatamento se deram por meio de um procedimento heurístico, no qual o valor ideal de tamanho médio ( $\mu$ ) resultou em 300 ha, e de variância ( $\sigma^2$ ), em 500 ha. O modelo também comporta um outro parâmetro heurístico, denominado índice de isometria de manchas. Este índice representa um valor numérico, o qual é multiplicado pelo valor de probabilidade das oito células da janela de vizinhança 3 x 3, utilizada pelos algoritmos *expander* e *patcher*, antes da aplicação da regra de transição. Quanto mais elevado é o valor do índice, mais compactas serão as manchas produzidas pelas funções de transição, e, de forma oposta, quanto mais próximo de zero, mais fragmentadas serão as manchas. Neste experimento, foi adotado um índice de isometria no valor de 1,5, o que caracteriza um equilíbrio entre compacidade e fragmentação das mesmas. Este valor produz resultados em concordância com o padrão de desmatamento encontrado na área de estudo, que apresenta mesclas entre manchas de desmatamento geometricamente estáveis ou compactas, produzidas por fazendeiros que utilizam maquinário agrícola para a derrubada da floresta, bem como manchas fragmentadas geradas por pequenos produtores rurais desprovidos de meios sofisticados para a remoção da cobertura florestal.

## 5. VALIDAÇÃO - MÉTODO DE SIMILARIDADE FUZZY

Para avaliar o desempenho do modelo de simulação, medidas de similaridade *fuzzy* foram aplicadas em um contexto de vizinhança local. Diversos métodos de validação que operam sobre um contexto de vizinhança de pixels (ou células) foram propostos até o momento (COSTANZA, 1989; PONTIUS, 2002; HAGEN, 2003), visando 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 do PRODES de 2000), de forma a relaxar a rigidez da concordância pixel-a-pixel. 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. Sem levar em conta a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança “*fuzzy neighborhood*” pode representar a dubiedade de localização. Nesse método de validação, um vetor *crisp* (exato) é associado a cada célula no mapa. Esse vetor possui tantos elementos quantos forem as categorias (classes de cobertura da terra) dos mapas, assumindo 1 para a categoria = i, e 0 para categorias diferentes de i.

Assim, o vetor de vizinhança *fuzzy* (*Vnbhood*) para cada célula é dado por:

$$V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ \vdots \\ \mu_{nbhood\ C} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mu_{nbhood} = \left| \mu_{crisp(i,1)} * m_1, \mu_{crisp(i,2)} * m_2, \dots, \mu_{crisp(i,n)} * m_n \right|, \quad (4)$$

em que:

$\mu_{nbhood\ i}$  representa a pertinência para a categoria  $i$  dentro de uma vizinhança de  $N$  células (normalmente  $N=n^2$ );

$\mu_{crisp\ ij}$  é a pertinência da categoria  $i$  para a célula vizinha  $j$ , assumindo-se no vetor *crisp* 1 para  $i$ , e 0 para categorias diferentes de  $i$  ( $i \subset C$ );

$m_j$  é a pertinência baseada em distância da célula vizinha  $j$ , em que  $m$  refere-se a uma função de decaimento da distância, por exemplo, um decaimento exponencial ( $m = 2^{-d/2}$ ).

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 (HAGEN, 2003). Uma vez que se pretende determinar o ajuste ou concordância espacial do modelo em diferentes resoluções, além do decaimento exponencial, pode-se aplicar uma função constante igual a 1 dentro da janela de vizinhança, e igual a 0 fora da mesma.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a matriz de transição, resultante da operação de tabulação cruzada entre os mapas de cobertura inicial (1997) e final (2000), 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 áreas desmatadas, estimada em 13,8%. As classes “Áreas Desmatadas” e “Rios” não sofreram alterações de cobertura durante o período de estudo.

Tabela 1 – Matriz de transição de cobertura da terra no período de 1997 a 2000.

		2000		
Cobertura da Terra		Floresta	Áreas Desmatadas	Rios
1997	Floresta	0,862	<b>0,138</b>	0
	Áreas Desmatadas	0	1	0
	Rios	0	0	1

Conforme exposto na Seção 4.3, o cálculo das probabilidades locais de transição, isto é, as probabilidades de transição de cobertura da terra em cada célula são feitas com base nos valores do peso positivo de evidência ( $W^+$ ). As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores de  $W^+$  para cada faixa de distância das variáveis “distâncias às áreas desmatadas em 1997” e “distâncias a rios”, respectivamente, e a Figura 7 mostra graficamente como se comportam os valores de  $W^+$  para essas variáveis explicativas. Convém lembrar que o fatiamento das grades de distâncias foi executado por meio do algoritmo de generalização de linhas implementado no módulo de calibração do DINAMICA.

Tabela 2 – Valores de pesos positivos de evidência ( $W^+$ ) para as faixas de distância da variável “distâncias às áreas desmatadas em 1997”.

VALORES DOS PESOS POSITIVOS DE EVIDÊNCIA		
Código Seqüencial	Distâncias às Áreas Desmatadas (metros)	$W^+$
1	<b>0 - 170</b>	1,745
2	<b>170 - 240</b>	1,410
3	<b>240 - 268</b>	1,182
4	<b>268 - 339</b>	0,983
5	<b>339 - 360</b>	0,836
6	<b>360 - 480</b>	0,650
7	<b>480 - 509</b>	0,460
8	<b>509 - 537</b>	0,312
9	<b>537 - 720</b>	0,179
10	<b>720 - 805</b>	-0,017
11	<b>805 - 960</b>	-0,143
12	<b>960 - 975</b>	-0,011
13	<b>975 - 988</b>	-0,287
14	<b>988 - 1.017</b>	-0,221
15	<b>1.017 - 1.045</b>	-0,313
16	<b>1.045 - 1.108</b>	-0,247

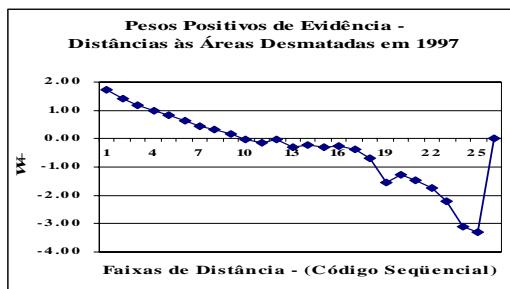
<b>17</b>	<b>1.108 – 1.137</b>	-0,383
<b>18</b>	<b>1.137 – 3.325</b>	-0,686
<b>19</b>	<b>3.325 – 3.335</b>	-1,549
<b>20</b>	<b>3.335 – 3.340</b>	-1,254
<b>21</b>	<b>3.340 – 3.390</b>	-1,452
<b>22</b>	<b>3.390 – 3.757</b>	-1,733
<b>23</b>	<b>3.757 – 4.539</b>	-2,216
<b>24</b>	<b>4.539 – 4.720</b>	-3,092
<b>25</b>	<b>4.720 – 29.889</b>	-3,285
<b>26</b>	<b>29.889 – 2.147.483.647</b>	0

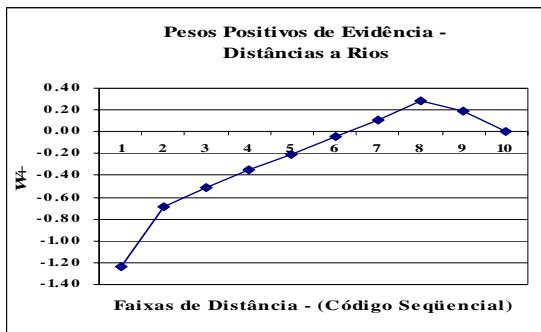
Tabela 3 – Valores de pesos positivos de evidência ( $W+$ ) para as faixas de distância da variável “distâncias a rios”.

#### VALORES DOS PESOS POSITIVOS DE EVIDÊNCIA

Código Seqüencial	Distâncias a Rios (metros)	$W+$
<b>1</b>	<b>0 – 240</b>	-1,238
<b>2</b>	<b>240 – 360</b>	-0,681
<b>3</b>	<b>360 – 1.320</b>	-0,515
<b>4</b>	<b>1.320 – 1.440</b>	-0,353
<b>5</b>	<b>1.440 – 25.800</b>	-0,212
<b>6</b>	<b>25.800 – 25.920</b>	-0,049
<b>7</b>	<b>25.920 – 29.400</b>	0,104
<b>8</b>	<b>29.400 – 29.760</b>	0,286
<b>9</b>	<b>29.760 – 32.880</b>	0,193
<b>10</b>	<b>32.880 – 2.147.483.647</b>	0

Figura 7 – Comportamento dos pesos positivos de evidência ( $W+$ ) das variáveis “distâncias às áreas desmatadas em 1997”, à esquerda, e “distâncias a rios”, à direita, por faixa de distância.



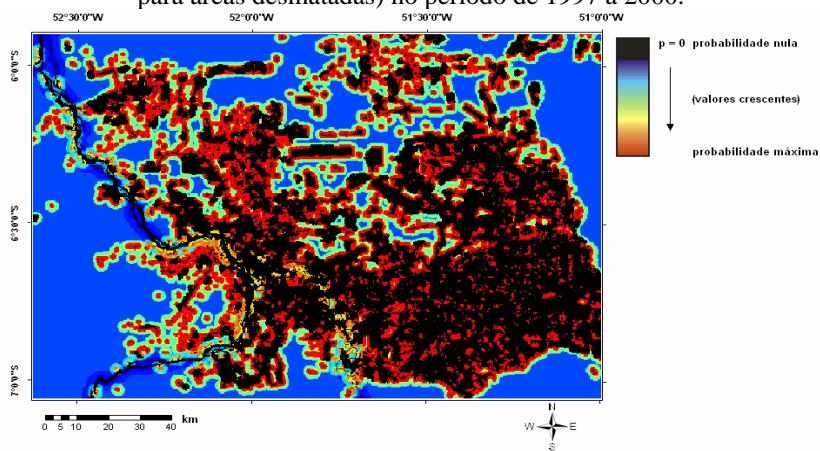


A curva dos valores de  $W^+$  da variável “distâncias a áreas desmatadas em 1997” revela a concentração de pesos com os maiores valores nas primeiras faixas de distância, o que explica a prevalência do padrão de avanço do desmatamento em torno das áreas previamente ocupadas (ALVES, 2002; AGUIAR et al., 2007). Dito de outra forma, o padrão de desmatamento, no período de estudo, apresenta majoritariamente grandes extensões e segue uma tendência de ocorrência no entorno de áreas pioneiras, em virtude, inclusive, do histórico de concentração fundiária nessa região.

Em relação à variável “distâncias a rios”, nota-se que as faixas de distância mais próximas aos cursos d’água principais apresentam os valores mais baixos de  $W^+$ . Isto é explicado pelo fato de que, ainda que ocorram desmatamentos nas proximidades dos rios, estes representam apenas uma pequena parcela frente ao total de área desmatada na região, o que provoca o decaimento nos valores dos pesos nessas faixas mais próximas. Conforme as faixas se distanciam dos cursos d’água, o peso torna-se gradativamente positivo, pois, na verdade, essas faixas correspondem justamente às áreas limítrofes a ocupações consolidadas, que são exatamente aquelas submetidas a processos de desmatamento. Em suma, essa variável atuou como um ajuste fino da variável “distâncias às áreas desmatadas em 1997”.

Conforme mencionado na Seção 4.3, o DINAMICA produz, a partir dos valores de  $W^+$ , um mapa de probabilidade local (ou espacial) de transição da cobertura da terra, contendo valores de probabilidade distintos em cada célula. A Figura 8 apresenta o mapa de probabilidade local de transição de cobertura da terra gerado neste experimento.

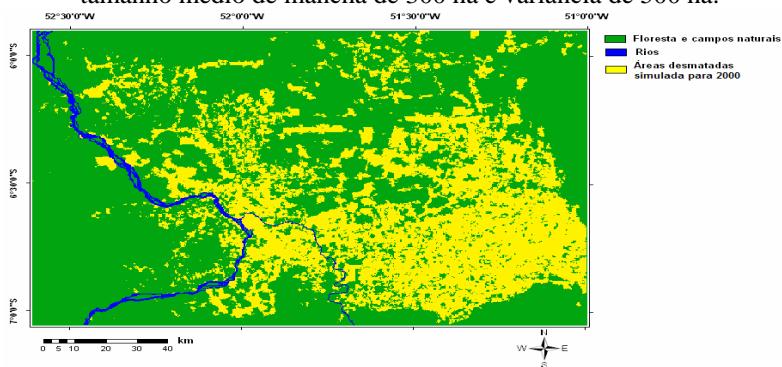
Figura 8 - Mapa de probabilidade local de transição de cobertura da terra (floresta para áreas desmatadas) no período de 1997 a 2000.



As áreas em preto apresentam probabilidade de transição nula. As áreas em tons de azul e verde apresentam probabilidade de transição muito-baixa e baixa, ao passo que as áreas em tons amarelo, alaranjado e avermelhado apresentam probabilidade de transição média, média-alta e alta, respectivamente. As áreas com valores mais elevados de probabilidade coincidem com as áreas onde de fato ocorreram desmatamentos, como se pode observar no mapa de desmatamento do PRODES (Figura 2).

A simulação produzida pelo modelo (Figura 9), considerando ambas as variáveis, apresentou índices elevados de similaridade *fuzzy* para diferentes resoluções (Tabela 4), os quais indicam a eficácia do modelo.

Figura 9 - Resultado da simulação do desmatamento para o ano de 2000, com tamanho médio de mancha de 300 ha e variância de 500 ha.



Comparando a simulação com o mapa de cobertura de 2000 (Figura 4), pode-se perceber que a forma retangular gerada pelo desmatamento real em algumas áreas não foi reproduzida na simulação. Isto se deve ao fato de que as atuais funções de transição do DINAMICA não comportam ainda restrições mais elaboradas relativas à geometria das manchas. Por outro lado, o padrão espacial de distribuição das áreas desmatadas na simulação, comparado com o encontrado na cena real (mapa de cobertura 2000), foi bem modelado, o que pode ser confirmado pelos valores de similaridade *fuzzy*. Cumpre salientar que a meta da modelagem não é reproduzir fielmente a realidade, mas tão somente detectar principais padrões e tendências de mudanças da cobertura da terra. Os padrões referem-se a aspectos morfológicos e de formação das manchas, isto é, se as mesmas apresentam formatos geometricamente estáveis ou irregulares, e se são produzidas por processos de expansão ou difusão, ao passo que as tendências referem-se a vetores do desmatamento, i.e., direções de propagação do desmatamento no espaço.

Tabela 4 - Resultado da validação para distintos tamanhos de janela.

Modelo	Tamanho da Janela (Pixels)	Parâmetros das Manchas (ha)	ISF*
<b>Simulação 1997-2000</b>	3 x 3		0,876
	5 x 5		0,890
	7 x 7	$\mu = 300$	0,899
	9 x 9	$\sigma^2 = 500$	0,903
	11 x 11		0,904
	13 x 13		0,905

\*ISF = Índice de Similaridade

Fuzzy

Como o ISF é um método de avaliação de concordância flexível, isto é, não se baseia em ajuste pixel-a-pixel, mas sim em ajuste por múltiplas resoluções, os valores do índice tendem a ser consideravelmente superiores, se comparados aos índices de concordância rígida. Essa concordância é tanto maior quanto maior for o tamanho da janela de amostragem, porém, a partir de certa resolução, acima de 11 ou 13 pixels normalmente, ocorre uma saturação no ISF (Figura 10), o que demonstra que para janelas com resolução muito degradada, o ISF torna-se ineficiente para avaliar o ajuste entre a cena real e a simulada. Convém lembrar que o uso de índices de concordância por múltiplas resoluções para avaliar a qualidade de simulações de modelos dinâmicos espaciais se justifica em vista do fato de que é impraticável prever o futuro com exatidão espacial fina, dada a aleatoriedade inerente a processos de conversão de cobertura da terra.

Figura 10 – Variação do índice de similaridade *fuzzy* (ISF), com tamanho médio de mancha de 300 ha e variância de 500 ha, em função de diferentes tamanhos de janela de amostragem.



## 7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um experimento de modelagem de dinâmica espacial baseado em autômatos celulares, destinado a simular o desmatamento na região de São Félix do Xingu, sudeste do Pará, no período de 1997 a 2000. As evidências (ou variáveis) utilizadas não representam exaustivamente o conjunto de forçantes do processo de desmatamento na área, mas correspondem, contudo, aos fatores indutores estratégicos desse processo.

A variável “distâncias às áreas desmatadas” foi fundamental para a simulação dos processos de desmatamento que se observam nas fronteiras limítrofes de áreas em que já ocorreu a supressão da floresta. Em vista do histórico de concentração fundiária nessa região, o padrão de desmatamento, no período de estudo, apresenta predominantemente grandes extensões e segue uma tendência de ocorrência no entorno de áreas pioneiras. A variável “distâncias a rios”, por outro lado, expressou a reduzida importância do transporte fluvial para o desmatamento e ocupação da região. Porém, considerando que ainda ocorrem focos de desmatamento nas imediações dos principais rios na área considerada, essa variável atuou no modelo como um ajuste fino da variável precedente “distâncias às áreas desmatadas”. O resultado obtido demonstra a capacidade do método e plataforma empregados em modelar o processo de conversão da cobertura florestal para áreas desmatadas na região de estudo, no período de 1997 a 2000, o que foi ratificado pelos elevados valores do índice de similaridade *fuzzy*.

A plataforma utilizada para a modelagem mostrou-se satisfatória para os propósitos deste trabalho, por comportar, entre outras coisas, a função de transição *expander*. Essa função reproduz com fidelidade o padrão de alastramento de manchas de desmatamento de forma contínua nas suas adjacências, padrão este

peculiar dos processos de remoção da floresta em áreas pioneiras, como é o caso de São Félix do Xingu. Outras vantagens da plataforma DINAMICA referem-se ao fato de que a mesma apresenta uma estrutura aberta e flexível para a utilização de diferentes métodos de parametrização e conjuntos de variáveis, os quais, associados de modo criterioso, atendem às especificidades de modelagem das mais diversas áreas de estudo, com padrões particulares de conversão de cobertura (e uso) da terra. Isto permite a replicabilidade de modelos desenvolvidos nesta plataforma para outras áreas da Amazônia, com contextos diferenciados de ocupação, em diferentes estágios de consolidação, e envolvendo distintos atores locais e suas dinâmicas características.

Em trabalhos futuros, os autores pretendem explorar um rol mais diversificado de variáveis intervenientes, como indicadores do status jurídico da propriedade/posse da terra, estradas locais e novos vetores das frentes de ocupação, além de operar com outros métodos estocásticos de parametrização das variáveis explicativas do modelo. É também intenção dos autores trabalhar com simulações em séries temporais longas, de modo a utilizar um conhecimento mais aprofundado sobre o histórico de ocupação da área e, assim, subsidiar a confecção de simulações futuras de desmatamento em São Félix do Xingu no curto e médio prazo. Esses prognósticos seriam baseados em cenários plausíveis de circunstâncias políticas, socioeconômicas e de infra-estrutura em nível local e regional.

Embora modelos computacionais de simulação tenham sido alvo de críticas, principalmente em vista do seu reducionismo e limitações para capturar integralmente a complexidade inerente da realidade (BRIASSOULIS, 2000), pode-se argumentar em prol de sua existência e continuidade, pois eles oferecem uma maneira incomparável de abstrair padrões e tendências de processos do mundo real. Na verdade, modelos de simulação devem ser concebidos, manipulados, aplicados e interpretados de forma sábia e crítica, de modo que pesquisadores, planejadores e tomadores de decisão da esfera pública e privada possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites (ALMEIDA et al., 2005). Esses modelos dinâmicos espaciais, dos quais as plataformas baseadas em CA constituem um dos melhores representantes, consistem em um meio promissor para tornar resultados de simulações de mudanças de cobertura da terra comunicáveis e transparentes a políticos, planejadores e tomadores de decisão, bem como aos atores locais e ao público leigo de forma geral.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra o conjunto de atividades da Rede GEOMA – Rede Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia (<http://www.geomaincc.br/>), firmada através de um acordo de cooperação técnico-científica entre as instituições do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT).

Os autores gostariam de manifestar o seu agradecimento aos revisores, cujas críticas contribuíram para a melhora da qualidade final do artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, A. P. D.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling*, v. 209, p. 169–188, 2007.
- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L.; BATTY, M. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land use change. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 04, p. 759-774, 2005.
- ALVES, D. S. Space-time dynamics of deforestation in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, v. 23, n. 14, p. 2903-2908, 2002.
- AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. Redes e conectividades na estruturação da frente de ocupação do Xingu-Iriri – Pará. *Geografia*, v. 31, n.3, p. 655-675, 2006.
- BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. *Revista de Estudos Avançados*, v.19, n.53, p.71-86, 2005.
- BONHAM-CARTER, G. F. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario: Pergamon, 1994, 305 p.
- BRIASSOULIS, H. *Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches*. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acesso em 28 out. 2006.
- BRANDÃO JÚNIOR, A. O.; SOUZA JÚNIOR, C. M.; RIBEIRO, J. G. F.; SALES, M. H. R. Desmatamento e estradas não-oficiais da Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2357-2364. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.47>>. Acesso em: 17 dez. 2007.
- BURROUGH, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: Longley, P. A.; Brooks, S. M.; McDonnell, R.; MacMillan, B. ed. *Geocomputation: a primer*. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. Cap. 9, p. 165-192.
- COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological Modelling*, v. 47, p. 199-215, 1989.
- EASTMAN, J.R. 2003. *IDRISI*: The Kilimanjaro edition. Worcester, MA: Clark University.

- ESCADA, M. I. S.; VIEIRA, I. C.; AMARAL, S.; ARAÚJO, R.; VEIGA, J. B.; AGUIAR, A. P. D.; OLIVEIRA, I. V. M.; PEREIRA, J. L. V.; FILHO, A. C.; FEARNSIDE, P. M.; VENTURIERI, A.; CARRIELLO, F.; THALES, M.; CARNEIRO, T. S. G.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Processos de ocupação nas novas fronteiras da Amazônia (o interflúvio do Xingu/Iriri). *Estudos Avançados*, v. 19, n.54, p. 9-23, 2005.
- ESCADA, M. I. S; AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V.; ALMEIDA, C. A.; CARRIELLO, F.; ALMEIDA, A. Padrões de mudança de uso e cobertura da terra na fronteira agropecuária de São Félix do Xingu, PA. *Anais... I Simpósio da Rede Geoma*, Petrópolis, 29-31 de outubro de 2007.
- GEOMA. *Dinâmica territorial da frente de ocupação de São Félix do Xingu-Iriri: Subsídios para o desenho de políticas emergenciais de contenção do desmatamento*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2004. 14p.
- 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), 2006. PRODES. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. Acesso em 13 jun. 2006.
- JOINT RESEARCH CENTRE – European Commission - Institute for Remote Sensing Applications (JRC); EUROPEAN SPACE AGENCY – Earthnet Programme Office (ESA-ESRIN). *Modelling Deforestation Processes – A review*. Luxembourg: ECSC-EC-EAAC, 1994. (Trees Series B, Research Report n.1).
- LAURANCE, W. F.; ALBERNAZ, A. K. M.; SCHROTH, G.; FEARNSIDE, P. M.; BERGEN, S.; VENTICINQUE, E. M.; COSTA, C. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*, v. 29, n.5-6, p. 737-748, 2002.
- OPENSHAW, S. GeoComputation. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. *Geocomputation*. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 1, p. 1-31.
- PEREIRA, L. M.; ESCADA, M. I. S.; RENNÓ, C. D. Análise da evolução do desmatamento em áreas de pequenas, médias e grandes propriedades na região centro-norte de Rondônia, entre 1985 e 2000. *Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 6905-6912. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.51/doc/1667.pdf>> Acesso em 5 jul. 2007.

- PONTIUS Jr., G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 68, n. 10, p. 1041-1049, 2002.
- RAGUENES, J. *Je vous écris du Brésil: Lettres*. Paris, Cedilpep-Ritimo, 2003, 207 p.
- SANTANA, L. F. *São Félix do Xingu e sua história: 1889 – 1997*. Prefeitura municipal de São Félix do Xingu. São Félix do Xingu. 2007. 196 p.
- SCHIMINK, M.; WOOD, C. H. *Contested Frontiers in Amazonia*. New York: Columbia University Press, 1992. 387 p.
- SOARES-FILHO, B. S.; ASSUNÇÃO, R. M.; PANTUZZO, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *BioScience*, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.
- 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.
- SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.M.; CERQUEIRA, G.C.; GARCIA, R.A.; RAMOS, C.A.; VOLLM, E.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v.440, n.7083, p.520-523. 2006.
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. *Review of Modern Physics*, v. 55, p. 601-643, 1983.

(Recebido em janeiro/08. Aceito em junho/2008).