

Modelagem de Dinâmica de Paisagem: Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação baseados em Autômato Celular

BRITALDO SILVEIRA SOARES FILHO^{1,2,3}
GUSTAVO COUTINHO CERQUEIRA²
WILLIAM LEITE ARAÚJO²
ELIANE VOLL²

¹Departamento de Cartografia, ²Centro de Sensoriamento Remoto, ³Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, 31270-900, MG, Brasil
{britaldo, cerca, araujo, voll}@csr.ufmg.br

Resumo

Modelos de simulação se tornaram recentemente um promissor campo de pesquisa, recebendo atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas. Uma especial classe de modelos de simulação é representada pelos modelos espaciais ou modelos de paisagem, que simulam mudanças dos atributos do meio-ambiente através do território geográfico. O uso de tais modelos visa auxiliar o entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento de sistemas ambientais, e assim determinar como eles evoluem diante de um conjunto de circunstâncias. Neste artigo, são delineados os principais passos de desenvolvimento de um modelo de simulação espacial. A ênfase é dada à aplicação de autômatos celulares para replicação dos padrões espaciais de mudanças. Como exemplo, é apresentado o modelo DINAMICA, enfocando a suas funções de transição. Como potencial de aplicação, são descritos três casos de estudo, a saber: 1) a avaliação da fragmentação da paisagem florestal em função da arquitetura de projetos de colonização, 2) desenho de corredores de conservação e 3) replicação de padrões de processos de difusão. O uso do DINAMICA em tais modelos visa demonstrar o seu potencial de adaptação para simular diversos fenômenos espaciais. Espera-se, para um futuro próximo, que modelos de simulação espacial deixem de ser apenas um objeto de pesquisa acadêmica, para se tornarem de fato um instrumento indispensável ao suporte de decisões ao ordenamento territorial.

Abstract

Simulation models have become a promising field of research, drawing the attention of a diversity of researchers. Spatially explicit simulation models represent a particular class of models that attempt to replicate the changes of ecological attributes across the landscape. These models are useful to help us understand the ways an environmental system evolves, and thereby determine the possible system trajectory under a set of circumstances. In this paper, we outline the main steps towards the development of a simulation model. Emphasis is given to the application of cellular automata to replicate the spatial patterns of change. As an example of cellular automata, we introduce the DINAMICA model, focusing on the design of its transition functions. To highlight DINAMICA's potential, we describe its application in three case studies: 1) assessment of forest fragmentation as a function of types of road network, 2) design of conservation corridors, and 3) replication of patterns generated from diffusion processes. These different applications aim to demonstrate the potential of DINAMICA to be easily adapted to simulate various dynamic spatial phenomena. As a result, we expect for the next future that simulation models will become, not only a research topic, but also an essential tool for environmental planning.

Palavras-chave: Dinâmica de Paisagem, Autômato Celular, DINAMICA.

1. Por que modelos de simulação?

Em um processo de simulação, é modelada a dinâmica de um sistema, reproduzindo-se, em ambiente computacional, a complexidade de seu mecanismo de desenvolvimento, que opera através de processos de troca de materiais, energia, informação e espécies/estados entre os componentes ou elementos do sistema.

Modelos de simulação se tornaram recentemente um promissor campo de pesquisa, recebendo especial atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas. A importância da simulação advém de sua capacidade de multiplicar a nossa imaginação individual, permitindo que grupos de pessoas compartilhem, através de uma experiência comum, modelos mentais de

uma certa realidade, independente de sua complexidade. A simulação é vista como um instrumento de aquisição de conhecimento, a partir da integração da informação sobre sistemas dinâmicos. Neste ponto, Lévy (1998) destaca que, dentre os gêneros aportados pela cibercultura, a simulação ocupa um lugar central, constituindo um importante dispositivo heurístico, que só se tornou viável graças ao recente desenvolvimento científico, tanto na área de informática, como também na modelagem de sistemas.

Uma especial classe de modelos de simulação é representada pelos modelos espaciais ou modelos de paisagem, que simulam mudanças dos atributos do meio-ambiente através do território geográfico. O uso de tais modelos visa auxiliar o entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento de sistemas ambientais, e assim determinar como eles evoluem diante de um conjunto de circunstâncias, que são as condições circunjacentes ou de contorno e representam cenários traduzidos por diferentes quadros sócio-econômicos, políticos e ambientais. À luz do resultado do modelo, podem-se testar hipóteses sobre possíveis trajetórias do sistema e suas implicações ambientais.

Hoje, já se encontra disponível uma miríade de modelos espacialmente explícitos, aplicáveis a uma diversidade de áreas, tais como difusão de epidemias, dinâmica populacional, mudanças de uso do solo, dinâmica florestal e propagação de fogo. Para uma revisão, veja Baker (1989), Sklar & Constanza (1991) e Soares-Filho *et al.* (2002).

Dentro dos seus diversos propósitos, modelos espaciais de simulação têm se tornado um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial, considerando que qualquer planejamento regional ou estratégia de conservação ambiental que não leve em conta o fator tempo está fadado ao insucesso. Além disso, modelos de simulação podem ser usados para promover idéias comuns, como no exemplo das mudanças globais e suas conseqüências ao planeta. Portanto, modelos espaciais de simulação, que realisticamente reproduzem padrões espaciais de mudanças, são hoje requisito para o entendimento e avaliação de complexas questões ambientais em escalas local, regional e global.

2. Concepção e Desenvolvimento de Modelos de Simulação de Mudanças da Paisagem

A comunidade científica vem cada vez mais buscando respostas e extrapolações dos resultados de suas pesquisas através do espaço geográfico. Um raciocínio lógico nessa linha de pesquisa baseia-se na assertiva de que os processos naturais ou antrópicos, quer sejam eles físicos, ecológicos, técnico-culturais, ou de outro tipo qualquer, são, em um certo grau, controlados pela organização espacial de seu conjunto ambiental. Tal organização espacial é chamada de paisagem. O objeto de pesquisa em paisagem é o estudo de sua trama espacial e seu papel em relação aos processos ambientais (Gulinck *et al.*, 1993). Nesses termos, uma paisagem se encontra em perpétua mutação, podendo a sua estrutura e composição mudar drasticamente através do tempo e implicar em importantes ramificações quanto ao arranjo e interação de seus ecossistemas (Forman & Godron, 1986). Em efeito, o estudo de Paisagem substanciou o desenvolvimento de uma nova classe de modelos de simulação, os modelos espacialmente explícitos ou de paisagem, que abrangem, em geral, quadros espaciais na ordem de dezenas de quilômetros ou mais, como extensões de municípios, e intervalos temporais na ordem de anos a dezenas de anos.

Uma maneira conveniente de se pensar sobre um modelo espacial consiste em imaginar uma paisagem composta por uma variedade de arranjos de elementos de paisagem - os quais representam ecossistemas ou classes de cobertura e uso do solo -, sobrepostos a uma grade ou matriz, sistema de representação 2D conhecido como *raster* ou matricial. Elementos de paisagem passam a ser representados por *pixels* ou células com o mesmo valor em uma única camada de informação (Fig. 1).

Uma questão pertinente a esta representação refere-se a escolha do tamanho da célula ou pixel (grão da paisagem) em função da escala de observação. Para tanto, busca-se uma solução de compromisso, definindo-se um tamanho que atenda uma certa exatidão cartográfica, capture a frequência espacial do fenômeno modelado e ainda permita um desejável desempenho computacional. Na representação matricial, a forma, configuração e tamanho dos elementos de paisagens não são modelados explicitamente, mas sim construídos para cada mancha da paisagem, que se faz representar por um conjunto de células contíguas de mesmo valor ou atributo.

Há algumas vantagens em representar uma paisagem, usando-se de uma construção matricial ou *raster*. A utilização de um SIG (Sistema de Informações Geográficas) matricial possibilita uma maior flexibilidade na representação e tratamento do contínuo espacial; a modelagem dos processos ambientais se torna mais direta através de um modelo de dados em camadas (Cf. Burrough, 1991); os SIGs matriciais são inteiramente compatíveis com imagem de satélite, grande fonte de dados para a modelagem de mudança de paisagem; existem várias pesquisas e programas desenvolvidos que trabalham com dados no formato *raster* para análise dos padrões da estrutura da paisagem (Cf. Baker & Cai, 1992; Mcgarigal & Marks, 1995); por último, a representação matricial para um processo de simulação é mais fácil de se lidar matematicamente, porquanto cada célula unitária do modelo possui o mesmo tamanho e forma, o que resulta numa maior capacidade analítica - por exemplo, usando-se de álgebra cartográfica (Cf. Tomlin, 1990) -, além de tender ser mais rápida para avaliações de múltiplas camadas cartográficas.

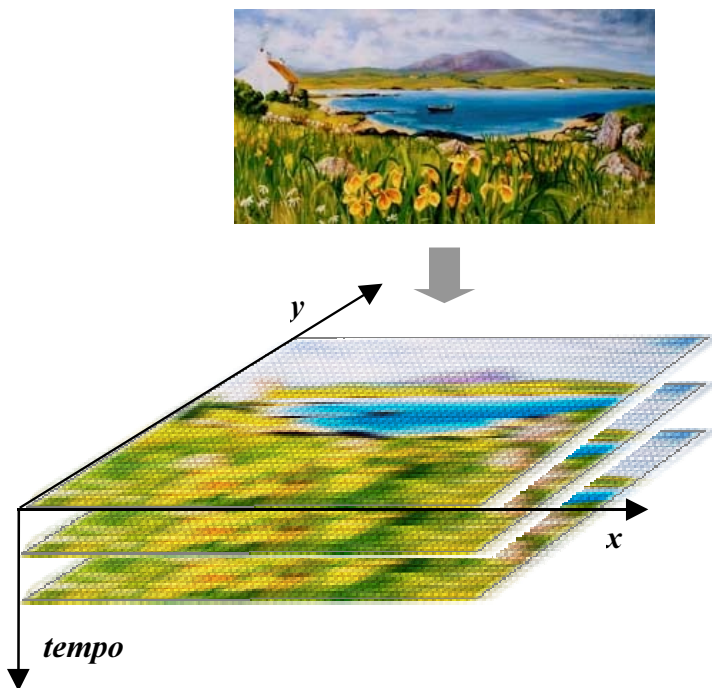


Fig. 1. Abstração da paisagem em um modelo espacial de mudanças, usando-se a estrutura *raster*.

O desenvolvimento de um modelo de simulação de mudanças da paisagem passa pela solução da equação 1, a qual representa a função que descreve as mudanças nos padrões espaciais de um tempo t para um novo padrão espacial no tempo $t+v$.

$$X_{t+v} = f(X_t, Y_t) \quad 1)$$

onde X_t é o padrão espacial no tempo t e Y_t é o vetor ou conjunto escalar de variáveis que afetam a transição, no caso, variáveis com coordenadas espaciais.

Desse modo, os componentes básicos de qualquer modelo de mudança da paisagem são: 1) configuração inicial, 2) função de mudança e 3) configuração de saída. A configuração inicial consiste em um mapa da paisagem, o qual pode ser derivado de uma série de dados, incluindo dados históricos de uso do solo obtidos via sensoriamento remoto.

A função de mudança pode usar ambas as matemáticas contínuas ou discretas, envolvendo desde uma simples equação linear diferencial, no caso do tempo ser considerado como uma variável contínua, ou ao contrário, uma equação de diferença, até exemplos mais complexos, como a utilização de seqüências de regras de decisão, conjunto complexo de equações não-lineares, com interações recursivas ou não (Baker, 1989). Quanto ao espaço de estados, muito embora ele possa ser contínuo, em geral, assume-se uma representação discreta. Assim, à medida que o número de estados aumenta, a capacidade computacional e o requisito de dados para esses modelos crescem consideravelmente.

A construção de uma função de mudança não é trivial, consistindo sempre na parte mais complexa do modelo. Na verdade, ela pode ser decomposta em duas funções, uma de quantificação das mudanças e uma outra dedicada à alocação espacial das mudanças, lembrando sempre que as mudanças em uma paisagem não se dão ao acaso, mas sim condicionadas a uma estrutura espacial.

Seguindo este raciocínio, um primeiro passo na construção de um modelo de simulação de mudanças passa pela definição de um modelo conceitual, no qual são definidos os elementos ou estados de uma paisagem e suas transições possíveis (Fig. 2). Uma maneira simples de representar esse modelo de estado e transições dá-se pelo uso da matriz de transição (Eq. 2), que, por si só, não consiste em um modelo espacial, mas na distribuição da quantidade de mudanças por toda a paisagem, ou seja, o primeiro componente da função de mudança.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{\cdot 1} & P_{j1} \\ P_{12} & P_{22} & P_{\cdot 2} & P_{j2} \\ P_{1\cdot} & P_{2\cdot} & P_{\cdot\cdot} & P_{j\cdot} \\ P_{1j} & P_{2j} & P_{\cdot j} & P_{jj} \end{bmatrix}^v * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad (2)$$

A matriz P_{ij} é conhecida como matriz de transição, na qual as colunas representam as probabilidades de um determinado estado i permanecer no mesmo estado ou mudar para o estado j durante o intervalo de tempo de $t \rightarrow t + v$, de modo que:

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

Sendo o estimador de P_{ij} dado pela eq. (4), onde n é o número de estados na paisagem.

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^n n_{ij}} \quad (4)$$

Um modelo de transição, como definido anteriormente, requer apenas que seja especificado um número finito de estados e que sejam conhecidas as probabilidades, ou melhor dizendo, as taxas de transição de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto. Um caso específico de modelo de transição, no qual as taxas de transição são estáticas através do tempo, é conhecido como modelo Markoviano. Tal tipo modelo não é realístico, sendo limitado o seu uso para simular a dinâmica de fenômenos ambientais, a não

ser por curto intervalo de tempo. Portanto, modelos atuais tendem a usar matrizes dinâmicas, nas quais as probabilidades de transição são recalculadas a cada nova iteração por submodelos acoplados (Cf. Soares-Filho *et al.*, 2003b).

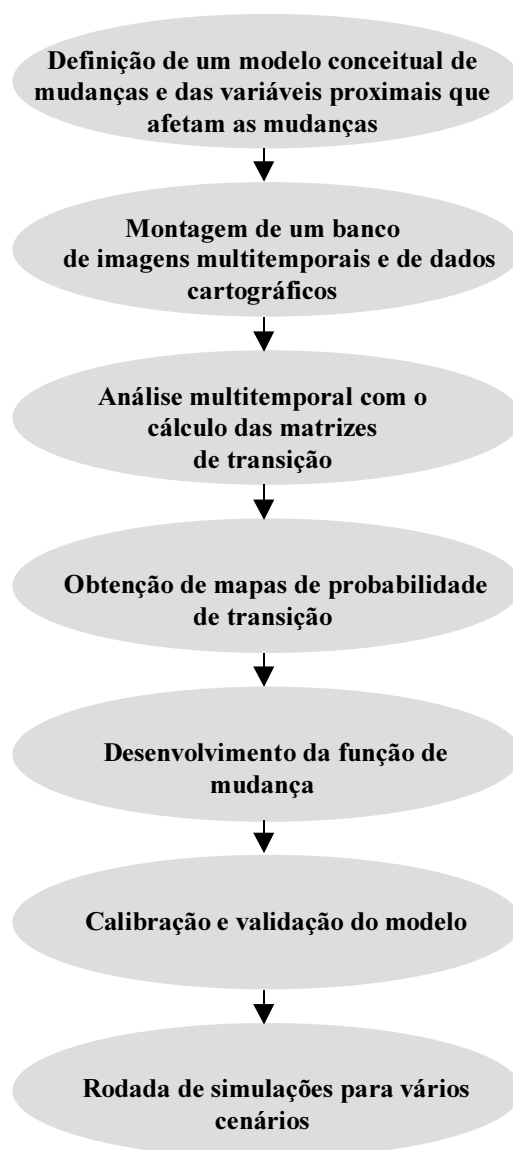


Fig. 2 – Fluxograma de desenvolvimento e aplicação de um modelo de simulação

De acordo com a equação 1, a solução de modelos espaciais dinâmicos requer a definição dos processos no tempo t que controlam o desenvolvimento do padrão espacial para o tempo $t+v$. Nesses termos, a construção de um modelo de simulação visa obter medidas de alguns aspectos do estado atual da paisagem que possam fornecer indicações do seu potencial para se tornar algo diferente, diante de diversos conjuntos de condições. Portanto, um primeiro passo na construção de um modelo de dinâmica de paisagem consiste no mapeamento dos padrões mutáveis de uso e cobertura do solo da região escolhida para estudo. Para tanto, são necessários métodos de levantamento que possibilitem identificar as mudanças na paisagem. Para este propósito, podem ser utilizados, como fonte de dados, levantamentos de campo, mapas previamente existentes, fotografias aéreas, dados publicados por censos e sensoriamento remoto orbital. Dentre esses métodos, o desenvolvimento e aplicação de técnicas de sensoriamento remoto orbital para o monitoramento de fenômenos e processos

ambientais têm recebido uma especial atenção. O sensoriamento remoto entra então como a principal fonte de dados para o desenvolvimento, calibração e refinamento de modelos de dinâmica de paisagem.

A aplicação do sensoriamento remoto envolve técnicas de interpretação e classificação de imagens multitemporais e a subsequente análise dos mapas resultantes, através de tabulação cruzada, visando a detecção e quantificação de mudanças. Um dos resultados desse processo consiste na matriz de transição para o período analisado. Como, algumas vezes, pretende-se rodar o modelo com uma maior resolução temporal, por exemplo em passos anuais, a matriz do período deve ser ainda anualizada através da seguinte propriedade de matrizes ergódicas (Eq. 5), as quais convergem para uma distribuição estacionária.

$$P^{1/t} = HV^{1/t}H^{-1} \quad 5)$$

onde P é a matriz de transição, H e V são seus autovetores e autovalores e $1/t$ é a fração desejada do intervalo de tempo, no exemplo de 5 anos, a fração anual corresponderia a $1/t=0.2$

Modelos de simulação requererem, como entrada, substanciais dados cartográficos, os quais serão armazenados em conjunto com os mapas multitemporais em um Sistema de Informações Geográficas. Nesse ambiente, técnicas de análise espaciais serão usadas para quantificar os efeitos espaciais das variáveis que afetam as mudanças.

Neste caso, deve-se diferenciar entre variáveis proximais e causais. As variáveis proximais explicam as influências regionais na configuração espacial dos padrões de mudanças, no exemplo de distâncias às estradas e às cidades, fisiografia e divisão político-administrativa. A análise do efeito dessas variáveis resulta no mapa de favorabilidade ou probabilidade de mudança. Já as variáveis causais explicam as forças subjacentes ou motivadoras das mudanças, sendo, muitas vezes, consideradas como variáveis de contorno ou exógenas ao modelo espacial, mas que podem ser eventualmente integradas ao modelo espacial através de um modelo gerador de cenários, o qual processa a interação de subsistemas encadeados – e.g. modelos climático, demográfico, econômico, político-econômico - e seus efeitos na dinâmica do sistema estudado (Soares-Filho *et al.*, 2003b). Neste aspecto, modelos de paisagem têm se tornado objeto de estudo multidisciplinar, envolvendo freqüentemente a participação de especialistas em diversas áreas, haja vista que eles devem considerar as interações entre o complexo de atividades humanas e os sistemas ecológicos.

A discretização de modelos de simulação de paisagem em subunidades de área passa pela seleção de variáveis proximais e pelo cálculo dos seus efeitos nas mudanças. A saída dessa análise consiste no mapa de favorabilidade ou probabilidade de mudança. Diversos métodos têm sido aplicados para tal propósito, sendo em geral caracterizados como técnicas dirigidas aos dados, notadamente regressão logística (Ludeke *et al.*, 1990; Turner *et al.*, 1996 a, b; Mertens & Lambin, 2000; Soares-Filho, *et al.*, 2001) e pesos de evidência (Almeida *et al.*, 2002 e 2003; Soares-Filho *et al.*, 2003b).

Pesos de evidência (weights of evidence) consiste em um método bayesiano, tradicionalmente usado por geólogos para indicar áreas favoráveis para algum fenômeno geológico, ex. mineralização ou sismicidade (Goodacre *et al.*, 1993; Bonham-Carter, 1994). O peso de evidência representa a influência de cada categoria (faixa de valores) de certa variável nas probabilidades espaciais de uma transição $i \Rightarrow j$, sendo calculado pelas equações 6 e 7.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad 6)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+ \quad 7)$$

onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ são as razões de chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento D e ocorrer D dado um padrão espacial B , no exemplo de um determinado tipo de solo ou faixa de distância à estrada. W^+ é portanto o peso de evidência de ocorrer o evento D , dado um padrão espacial B . A probabilidade a posteriori de uma transição $i \Rightarrow j$, dado um conjunto de dados espaciais e considerando que $O\{D\}=1$, pois esta já é passada ao modelo via matriz de transição, é expressa pela seguinte equação.

$$P(i \Rightarrow j(x, y) / V) = \frac{e^{\sum_k W^{ki \Rightarrow j(V), xy}}}{1 + \sum_{ij} e^{\sum_k W^{ki \Rightarrow j(V), xy}}} \quad 8)$$

onde V representa um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x, y e representadas por seus pesos $W^+_{k1xy}, W^+_{k2xy}, \dots, W^+_{knxy}$, sendo n o número de categorias de cada variável k .

Como vantagens do método de pesos de evidência, cita-se que ele não é restringido pelas clássicas suposições dos métodos estatísticos paramétricos, os quais os dados espaciais freqüentemente violam. Além disso, é um método simples de se calcular, pois usa somente o resultado da tabulação cruzada entre o mapa de mudanças - produto do cruzamento de mapas multitemporais - e os mapas das variáveis proximais para alimentar fórmulas implementadas em planilhas eletrônicas (Fig. 3). O efeito de cada variável pode ser calculado independentemente de uma solução conjunta, tendo como premissa apenas que as variáveis de entrada sejam espacialmente independentes, o que pode ser testado por diversos métodos, como coeficiente de V de *Crammer* (Bonham-Carter, 1994) ou o teste da *Incerteza da Informação Conjunta* “Joint Information Uncertainty” (Almeida *et al.*, 2002). Variáveis correlacionadas são ou excluídas do modelo ou combinadas em uma terceira. Como o método usa dados categóricos, os pesos são também independentes de unidades de medida. No entanto, isto impõe a necessidade de um método de categorização que mantenha a estrutura original de variação dos dados.

Pesos de evidência são então assinalados para as categorias das variáveis representadas por suas camadas de informação no SIG (Fig 3). Os mapas resultantes da integração dos pesos assinalam as áreas mais favoráveis para cada tipo de mudança, podendo portanto ser interpretados como mapas de probabilidades espaciais de transição.

Em síntese, embora existam diversos métodos para se obter o mapa de favorabilidade de mudanças, sendo aqui apresentado apenas o método *pesos de evidência*, deve-se ressaltar, que mais do que a matemática utilizada, um método deve-se pautar por ser robusto (independente de pressupostos), simples de ser implementado e transportado, e sobretudo por fornecer uma explicação plausível consoante ao conhecimento do fenômeno analisado.

Em seqüência, o segundo componente da função de mudança irá operar sobre os mapas de probabilidades, buscando alocar as quantidades desejadas de mudança, através do ordenamento e sorteio das células mais prováveis. Como as mudanças na paisagem são fortemente influenciadas pela vizinhança, tendendo formar padrões espaciais com distinto arranjo no tocante ao tamanho, forma e orientação das manchas, a função de alocação das mudanças deverá envolver algoritmos de interação da célula sorteada com as vizinhas. Isto será mostrado adiante pelo uso de técnicas de autômatos celulares.

Por fim, o processo de calibração deverá levar em conta o ajuste do modelo em relação a dois aspectos: 1) configuração espacial e 2) estrutura da paisagem. Para a configuração, é sugerido o método de comparação de imagens à múltiplas resoluções - *multiple resolution procedure* (Costanza, 1989), tendo em vista que modelos, com baixo ajuste numa resolução mais fina, podem convergir dentro de uma certa vizinhança. Já para comparação da estrutura da paisagem, são sugeridos os índices de dimensão fractal e medidas de conectividade da

paisagem, tais como o índice de coesão de manchas - *patch cohesion index* (Mcgarigal & Marks, 1995).

O modelo de simulação, obtendo um razoável ajuste – algo acima de 75%, considerando o carácter falível das previsões ambientais -, estará validado para o caso de estudo específico. Por conseguinte, ele poderá ser extrapolado para outras áreas e casos semelhantes ou mesmo ser usado para ilustrar ou testar diferentes hipóteses de cenário, alternando-se os parâmetros das variáveis de contorno.

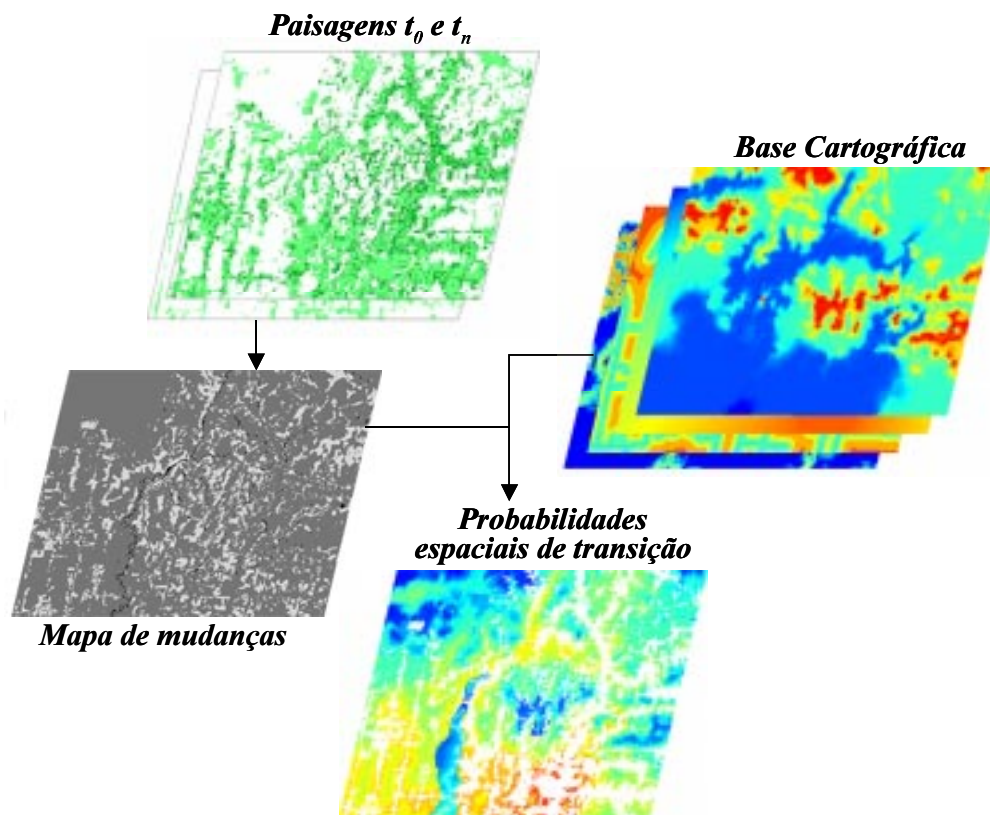


Fig. 3. A seleção das variáveis proximais e o cálculo de seus efeitos nas mudanças são realizados através do cruzamento de variáveis armazenadas no SIG com o mapa de mudanças, produto da tabulação cruzada de mapas multitemporais.

3. Autômatos Celulares

Embora modelos de simulação espaciais estejam se tornando por demais híbridos para serem classificados em uma única categoria, a não ser por seu propósito de aplicação, uma abordagem de modelagem, em geral, fundamenta-se em três paradigmas: baseado em indivíduos (e.g. Liu & Ashton, 1998), baseado em processos (e.g. Voinov *et al.*, 1999) ou a abordagem orientada ao espaço de autômatos celulares.

A terceira categoria de modelos, conhecida como autômatos celulares, corresponde a engenhos compostos por conjuntos de células que imprimem determinados movimentos, assemelhando-se a seres animados. Em geral, o mecanismo de autômatos celulares consiste num arranjo n-dimensionais de células, no qual o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com um arranjo específico de uma certa vizinhança, sendo todas as celas atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo. O algoritmo que faz as células interagir localmente é conhecido como regra local do autômato celular (Sirakoulis *et al.*, 2000).

Autômatos celulares são portanto considerados como sistema dinâmico, tendo sido desenvolvidos para aplicação em diversas áreas como arquitetura, engenharia, matemática, simulação e jogos. Talvez o exemplo mais simples e característico de autômato celular seja o “jogo da vida”. Tendo sido desenvolvido pelo Matemático John Conway em 1970, foi assim denominado devido à analogia com ascensão, queda e alternância de sociedades de organismos. John Conway escolheu, como regras locais de transição, arranjos espaciais que evitassem que colônias de células morressem ou expandissem rapidamente. Dessa forma, ele pertence à classe de jogos de simulação que se assemelham a processos da vida real, sendo um belo exemplo de sistemas auto-organizáveis.

Modelos de simulação espacial baseados em autômatos celulares estão se tornando populares, sendo mesmo incluídos em softwares comerciais de Sistemas de Informações Geográficas, e.g. IDRISI (Eastman, 2001), devido à sua facilidade de implementação, habilidade em mimetizar formas e capacidade de serem readaptados para reproduzir vários tipos de fenômenos espaciais, como espalhamento de fogo (Karafyllidis & Thanailakis, 1997; Hargrove *et al.*, 2000), difusão de epidemia (Sirakoulis *et al.*, 2000), dinâmica florestal (Lett *et al.*, 1999), crescimento urbano (White *et al.*, 2000b; Clarke & Gaydos, 1998, Almeida *et al.*, 2003), e mudanças de uso e cobertura do solo (Wu, 1998; White *et al.* 2000a.; Soares-Filho *et al.*, 2002, Soares-Filho *et al.*, 2003b).

Como exemplo de modelo de simulação espacial do tipo autômato celular é apresentado o software DINAMICA (Soares-Filho *et al.*, 2002, Soares-Filho *et al.*, 2003a). DINAMICA usa como entrada um conjunto de mapas, a saber: um mapa da paisagem inicial - por exemplo, um mapa de uso e cobertura do solo obtido a partir da classificação de imagens de satélite -, um mapa do tempo de permanência de cada célula no seu estado atual, e um conjunto de variáveis cartográficas, que se dividem em dois tipos, estáticas e dinâmicas, sendo as últimas recalculadas em cada iteração do programa. As variáveis cartográficas - e.g. solo, vegetação, distância às estradas, altitude, declividade, etc. - são combinadas, através da definição de seus pesos de evidência, para gerar os mapas de probabilidades de transição. Após cada iteração, DINAMICA produz um novo mapa da paisagem, os mapas de probabilidades de transição e mapas das variáveis dinâmicas. Seu modelo de transição pode ser ainda acoplado a um módulo construtor de estradas, que passa ao programa mapas dinâmicos da rede viária, e a um gerador de cenários, que produz matrizes de transição dinâmicas e as passa ao DINAMICA, usando-se de sua ligação com o software de modelagem VENSIM (Ventana, 2002) (Fig. 4).

Como regras locais, DINAMICA usa um engenho de alocação de mudanças, composto por dois processos de transição complementares, denominados, respectivamente, de *Expander* (função expansora) e *Patcher* (função formadora de manchas), além de um módulo de difusão. A função expansora se dedica unicamente à expansão ou contração de manchas prévias de uma determinada classe, já o segundo processo é responsável por formar novas manchas. Ambos os processos usam um mecanismo nucleador de manchas, que opera sobre o mapa de probabilidades de transição e tem como parâmetros de entrada a isometria, variância e tamanho médio das manchas. A quantidade definida de células a serem mudadas para uma determinada transição é repartida, de acordo com o especificado pelo usuário, entre as duas funções. Já o módulo de difusão leva um processo de transição $i \Rightarrow j$ a migrar para novas áreas, em função de uma saturação assintótica de células j dentro de uma vizinhança especificada.

A combinação dos dois processos de transição, mais o módulo de difusão, apresenta numerosas possibilidades no tocante à geração e desenvolvimento de padrões espaciais de mudança, como será demonstrado pelo seu potencial de aplicação (Cf. Soares-Filho *et al.*, 2003a).

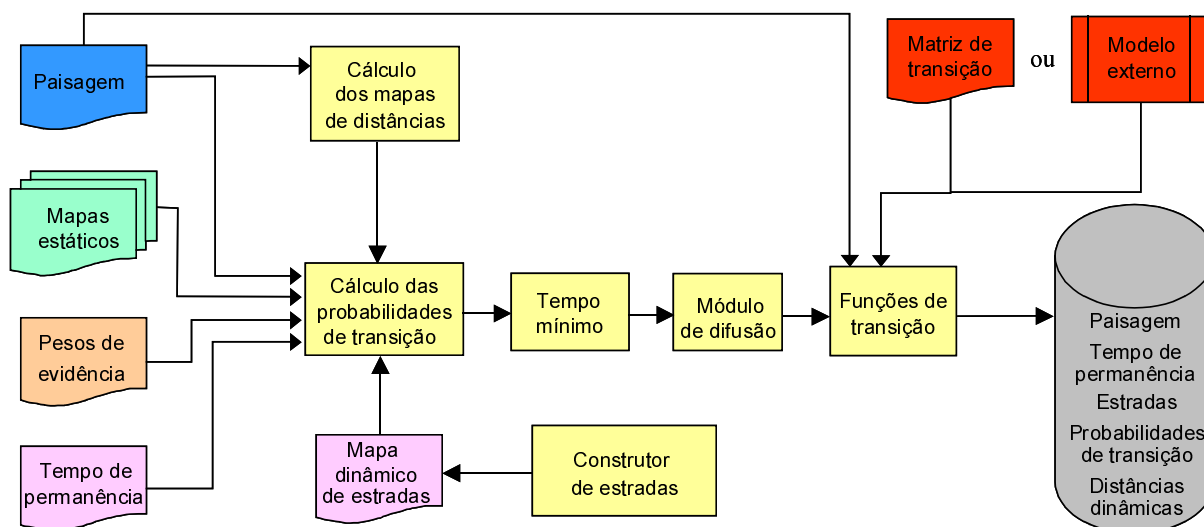


Fig. 4. Arquitetura do software DINAMICA.

4. Exemplos de Aplicação

DINAMICA tem sido desenvolvido como um instrumento de investigação de trajetórias de paisagem e de dinâmica de fenômenos espaciais. Por ser um modelo genérico de mudanças, DINAMICA tem sido aplicado para modelar vários fenômenos dinâmicos, como desflorestamento (Soares-Filho *et al.*, 2002) e dinâmica urbana (Almeida *et al.*, 2002 e 2003). Recentes avanços no seu desenvolvimento permitiram também a sua aplicação para modelagem de extensas regiões geográficas, como no exemplo de uma faixa de centenas de quilômetros de largura e de extensão, ao longo da BR-163, conhecida como corredor Cuiabá-Santarém (Soares-Filho *et al.*, 2003b).

Como exemplos de seu potencial de aplicação, são ilustrados três casos de estudos, abordando: 1) avaliação da fragmentação da paisagem florestal em função da arquitetura de projetos de colonização, 2) desenho de corredores de conservação e 3) replicação de padrões de processos de difusão.

O primeiro estudo consiste numa comparação da evolução da fragmentação da floresta remanescente em função do desenho da malha viária de projetos de colonização. A exemplo dos trabalhos de Batistella & Soares-Filho (1999) e Batistella (2001), são comparadas as regiões do projeto Machadinho d'Oeste e do Vale do Anari, em Rondônia. A primeira região apresenta uma arquitetura orgânica, com as estradas acompanhando os interflúvios, enquanto a segunda caracteriza a típica arquitetura de “espinha de peixe”, freqüentemente encontrada através da Amazônia. Como as regiões desses projetos diferem também no tocante a outros aspectos, como história de ocupação, organização regional, fisiografia, taxa de desmatamento, tipo predominante e densidade de colonização, a simulação foi aplicada com o intuito de excluir da análise essas outras variações, criando-se uma situação “ideal” - a exemplo dos modelos neutros (Gardner *et al.*, 1987) -, na qual o único parâmetro variante é o arranjo geométrico da malha viária. Assim, na simulação, foram escolhidas para as duas áreas a mesma extensão geográfica (350 km²), densidade viária equivalente e idêntica taxa de desmatamento de 0,03 ao ano. A alocação do desmatamento ocorreu em ambas áreas apenas em função da distância às estradas, buscou-se reproduzir um tamanho médio de 10 hectares para as novas clareiras anuais, e o modelo foi rodado para um intervalo de 10 anos.

Como DINAMICA é um modelo estocástico, a simulação foi rodada dez vezes e sobre as paisagens resultantes foi calculada a métrica do *índice de mancha mais larga* (Largest Patch Index). A média obtida para este índice para a classe de floresta foi de 71% para a região tipo

Machadinho d'Oeste, enquanto para a região de espinha de peixe, tipo Vale do Anari, foi de 35% (Fig. 5).

Segundo Batistella (2001), o *índice de mancha mais larga* é uma potencial medida para avaliação da fragmentação da paisagem, sendo a fragmentação inversamente proporcional a este índice. Em conclusão, o resultado da simulação demonstra uma clara vantagem da arquitetura tipo Machadinho d'Oeste para fins de melhor preservação da continuidade dos habitats florestais.

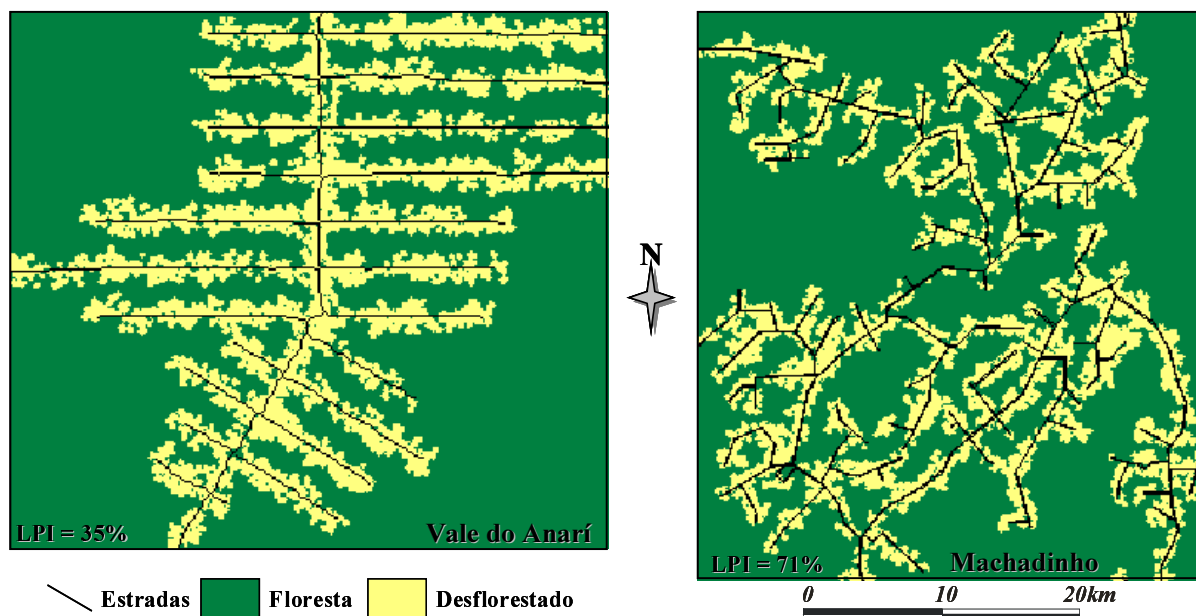


Fig. 5. Avaliação da fragmentação da paisagem em função da arquitetura de projetos de colonização.

O segundo exemplo usa um recorte da região do município de Guarantã do Norte, Mato Grosso, para demonstrar o potencial da simulação para fins de seleção de áreas para restauração da paisagem florestal. Como ponto de partida, a simulação emprega um mapa de paisagem, obtido a partir da classificação de imagem TM/Landsat-5 de 1994. A paisagem simplificada é representada por quatro classes: floresta, desmatado, regeneração e corpo d'água. Na simulação, são especificadas taxas anuais de transição para que a dinâmica de paisagem convirja para um baixíssimo desmatamento, enquanto ocorre uma intensa regeneração florestal. O modelo busca então responder, à luz da importância da recuperação do ecossistema regional, qual será a configuração provável da paisagem em um tempo $t+n$, se a tendência atual for mantida; quais áreas desmatadas vão chegar a formar florestas secundárias e, por conseguinte, quais serão as implicações ecológicas desse provável arranjo espacial.

O mapa de favorabilidade de regeneração florestal é construído a partir de estudos de campo e análise de dados de imagens multitemporais, a exemplo do trabalho de Soares-Filho *et al.* (2001). Desse modo, as variáveis altitude, declividade, distância à rede hidrográfica, distância às estradas e distância à floresta, são selecionadas como sendo os fatores de controle espacial do processo de regeneração. Seus pesos de evidência são obtidos através do cruzamento de mapas de mudanças com os mapas dessas variáveis, conforme metodologia descrita na seção 2, e em seguida integrados para gerar o mapa de probabilidade de transição para a mudança "desmatado-regeneração". O modelo é rodado para 20 passos anuais (Fig. 6).

Como resultado, obtém-se que a porção norte-este da região apresenta o maior potencial para restauração florestal, gerando um arranjo de florestas secundárias, em torno das florestas

remanescentes, que otimizam a conectividade dos habitats florestais. Em efeito, tal tipo de estudo poderia ser aplicado para seleção de áreas para a elaboração de corredores de conservação e restauração ambiental, como no exemplo de Landau (2001).

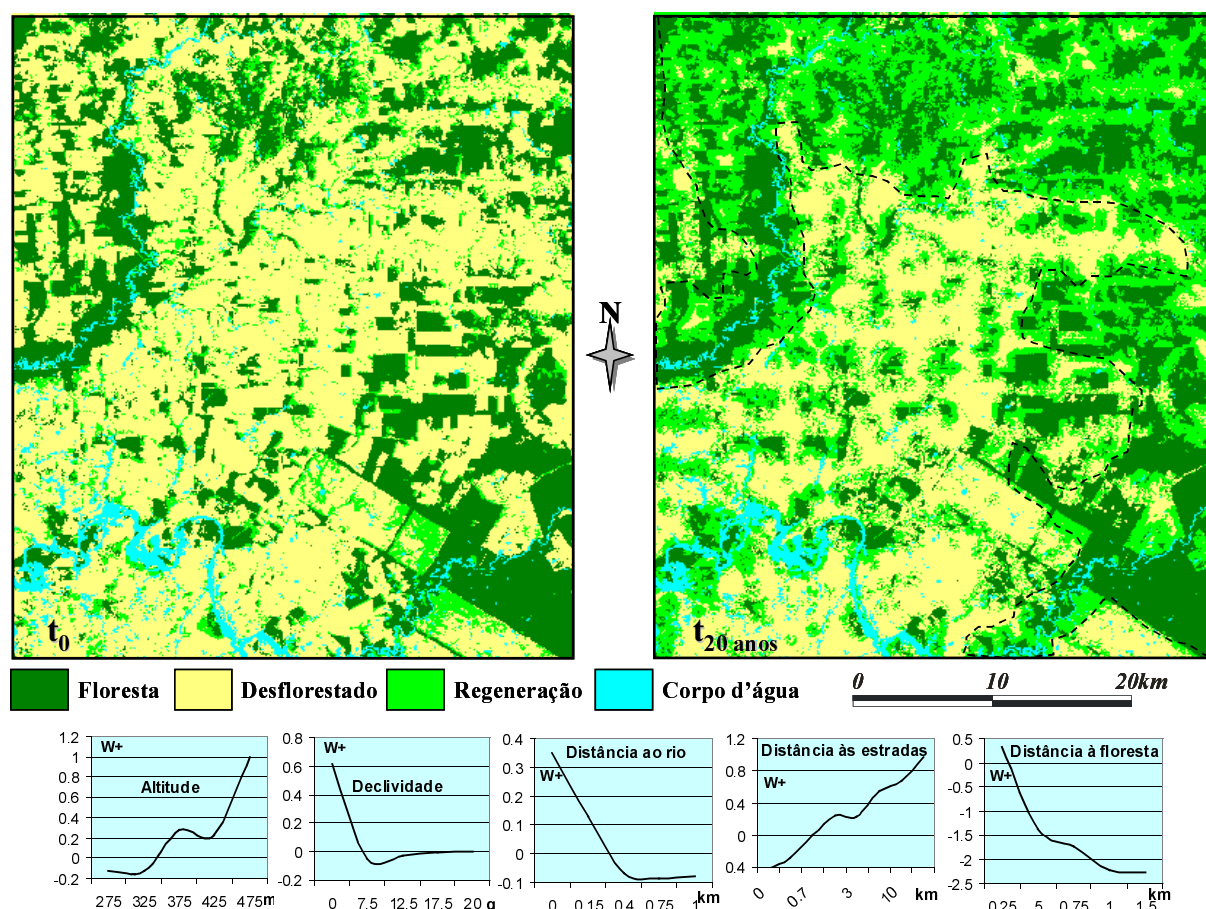


Fig. 6. Desenho de Corredor de Conservação.

O terceiro caso de estudo ilustra o potencial do software DINAMICA em produzir padrões de difusão, que poderiam ser causados por processos, por exemplo, de propagação de fogo, epidemias ou migração de espécies. A figura 7 mostra a geração de padrões de difusão a partir de uma paisagem sintética (a). O mapa (b) é produto de uma difusão por contágio (uso apenas do processo de expansão) em uma superfície isotrópica. O mapa (e) reproduz o mesmo processo, mas exibindo o efeito de saturação local, o qual inibe a continuação da transição $i \Rightarrow j$ quando a presença de j atinge um certo limiar. O mapa d) mostra processo análogo ao anterior, mas agora condicionado a um corredor de maior permeabilidade (c). Por fim, o mapa (f) mostra o resultado de dois processos de difusão competitivos, sendo que as células cinzas, com maior probabilidade, se superpõem às pretas.

Como ilustrado pelos exemplos apresentados, a combinação das regras locais de transição do modelo DINAMICA apresenta numerosas possibilidades em relação à gênese e desenvolvimento de padrões espaciais de mudanças, o que o torna um potencial instrumento para a modelagem de dinâmica de paisagem.

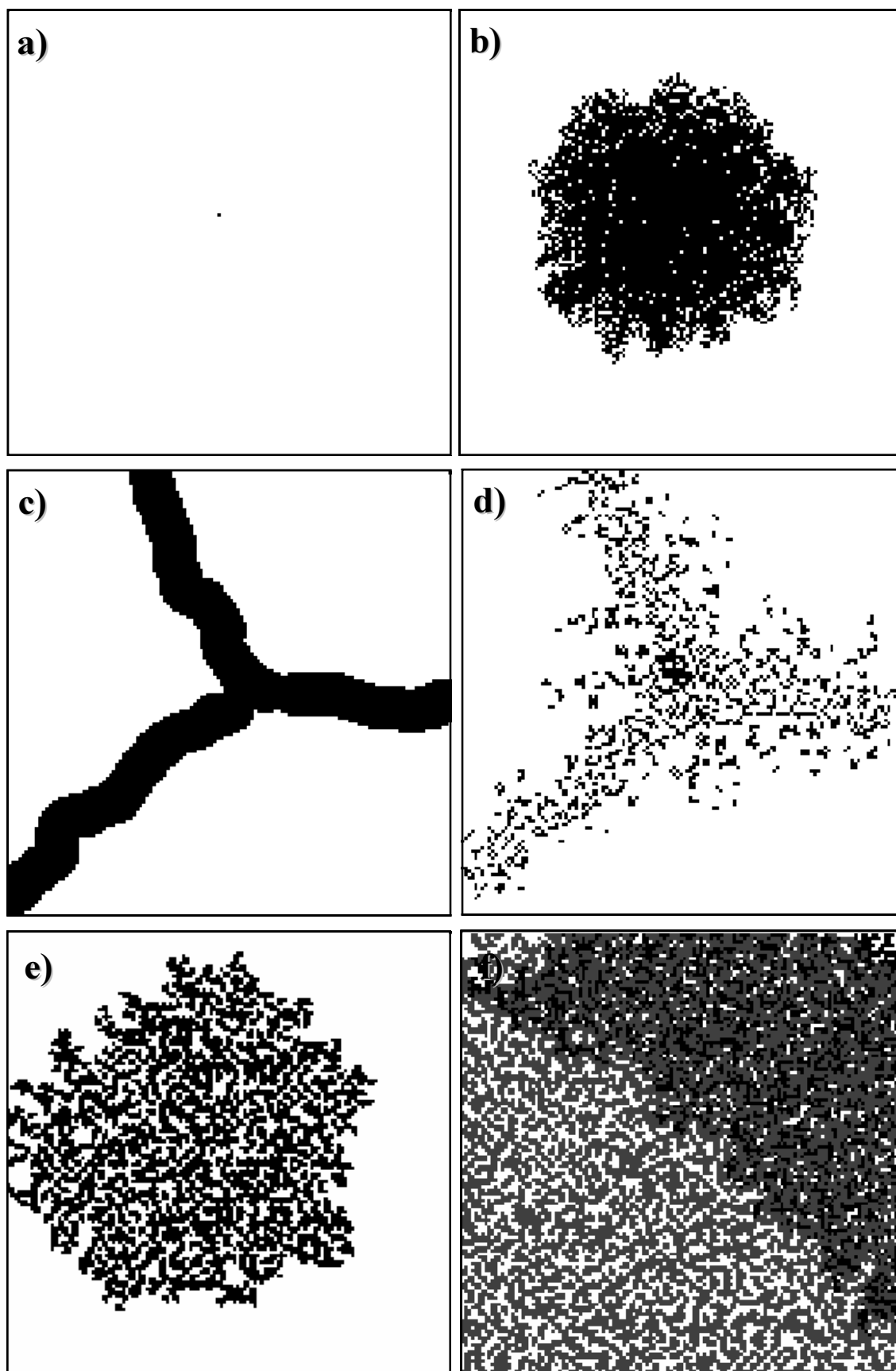


Fig. 7. Simulação de padrões de processos de difusão.

5. Considerações Finais

Modelos de simulação espacial já são uma realidade, embora exista ainda um longo caminho a percorrer antes que eles se tornem de fato mais realísticos e fáceis de operar. Uma grande limitação atual dessa classe de modelos refere-se a sua calibração, um processo extremamente laborioso, devido à quantidade de parâmetros a serem ajustados. Já o desempenho computacional vem crescendo exponencialmente, mais em função do aumento da velocidade dos processadores do que da otimização dos códigos. Este desempenho computacional já nos permite rodar modelos complexos, envolvendo arranjos matriciais acima de 100 megabytes, em computadores pessoais. Isto facilita em muito sua operação, pois evita a necessidade de supercomputadores, sistemas exóticos e difíceis de programar. A tendência será a incorporação, em breve, em SIGs comerciais de módulos de simulação espacial, materializando o conceito do SIG dinâmico. Nesse sentido, a plataforma do DINAMICA oferece uma oportunidade única, pois seu caráter genérico, voltado à replicação de padrões espaciais, o torna fácil de ser adaptado para a simulação de diversos fenômenos ambientais, bastando apenas usar criatividade para abstrair o modelo conceitual para o ambiente do DINAMICA. Nesse sentido, deve-se ressaltar que qualquer modelo de simulação requer não só dados substanciais, mas uma investigação profunda e *in loco* dos processos controladores da dinâmica da paisagem em questão, que case sempre envolva estudos multidisciplinares.

A arquitetura do DINAMICA possui também a versatilidade de operar em múltiplas escalas espaciais, tornando-o fácil de ser calibrado, pois seus modelos podem ser desenvolvidos usando-se de crescentes resoluções, haja vista que suas funções operam com valores em hectares, que são internamente transformados em números de células. Isto economiza um enorme tempo de computação, que cresce geometricamente à dimensão da matriz de paisagem.

Espera-se que, com a maior difusão do geoprocessamento, modelos de simulação deixem de ser apenas um objeto de pesquisa acadêmica, para se tornarem de fato um instrumento indispensável ao suporte de decisões ao ordenamento territorial. É esta a derradeira meta da nossa pesquisa em modelagem de processos ambientais; por isso DINAMICA é um software de domínio público (www.csr.ufmg.br/dinamica), havendo interesse por parte da nossa equipe em colaborar com potenciais usuários.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CABS/CI (Center for Applied Biodiversity Studies at Conservation International) e FAPEMIG (Fundação de Apoio à Pesquisa de Minas Gerais) - CRA2463/98 - pelo financiamento desta pesquisa. Primeiro autor é também bolsista da CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) - BEX0438/02-2.

7. Referências citadas

- Almeida, C.; Monteiro, A.M.; Camara, G.; Soares-Filho, B.S.; Cerqueira, G.; Pennachin, C.; Batty, C. 2002. GIS and remote sensing as tools for simulation of urban land use change. In: *Third International Symposium Remote Sensing of Urban Areas*. Istanbul, Tu: Istanbul Tech. Un. and Regensburg Un. pp. 387-394.
- Almeida, C.; Batty, C.; Monteiro, A.M.; Camara, G.; Soares-Filho, B.S.; Cerqueira, G.; Pennachin, C. 2003. Stochastic Cellular Automata Modelling of Urban Land Use Dynamics: Empirical Development and Estimation. *Computers, Environment and Urban Systems* (aceito para publicação).

- Baker, W.L. 1989. A review of models of landscape change. *Landscape Ecology*, 2(2): 111-33.
- Baker, W.L.; Cai, Y. 1992. The r.le programs for multiscale analysis of landscape structure using GRASS geographical information system. *Landscape Ecology*, 4(7): 291-302.
- Batistella, M.; Soares-Filho, B.S. 1999. Ensaio Comparativo da Fragmentação da Paisagem em função de modelos arquitetônicos de assentamento rural em Rondônia. In: *GIS-Brasil 1999*. Salvador, Br. FatorGis. Cd-Rom.
- Batistella, M. 2001. *Landscape change and land-use/Land-cover dynamics in Rondônia, Brazilian Amazon*. Tese de Doutorado. School of Public and Environmental Affairs, Indiana University. 318p.
- Bonham-Carter, G. 1994. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon, New York, 414 p .
- Burrough, P.A. 1991. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. 3.ed. Oxford, Clarendon Press,
- Clarke, K.C.; Gaydos, L.J. 1998. Long term urban growth prediction using a cellular automaton model and GIS: Applications in San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, (12):699–714.
- Costanza, R. 1989. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological Modelling*, 47, 199-215.
- Eastman, J. R. 2001. *IDRISI 32.2 – guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University, Worcester, USA.
- Forman, R.T.; Godron, M. 1986. *Landscape Ecology*. New York, John Wiley & Sons, 619p.
- Gardner, R.; Mime, H.; Bruce, T; Turner, M; O'Neill, R. 1987. Neutral models for the analysis of broad-scale landscape patterns. *Landscape Ecology*, (1):19-28.
- Goodacre, C.M.; Bonham-Carter, G.F.; Agterberg, F.P.; Wright, D.F. 1993. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. *Tectonophysics*, (217): 205-305.
- Gulinck, H.; Walpot, O; Janssens, P. 1993. Landscape structural analysis of central Belgium using Spot data. In: Haines-Young, R.; Green, D.R.; Cousins, S. *Landscape ecology and spatial information systems*. Bristol, Taylor and Francis, Cap.10, p.129-140.
- Hargrove, W.W.; Gardner, R.H.; Turner, M.G.; Romme, W.H.; Despain, D.G. 2000. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*, (135): 243–263.
- Karafyllidis, I.; Thanailakis, A. 1997. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling* (99): 87-89.
- Landau, E. C. 2001. *Corredores ecológicos como paradigma inovador para a conservação da diversidade biológica; estudo de caso na mata atlântica do sul da Bahia*. Tese de Doutorado. Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, UFMG.
- Lett, C.; Silber, C.; Barret, N. 1999. Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics. *Ecological Modelling*, (121): 277-293.
- Lévy, P. 1998. *Cyberculture*. Odile Jacob, France,
- Liu, J.; Ashton, P. 1998. FORMOSAIC: an individual-based spatially explicit model for simulating forest dynamics in landscape mosaics. *Ecological Modelling*, (106): 177-200.
- Ludeke A.; Maggio, R.C.; Reid, L.M. 1990. An analysis of anthropogenic deforestation using logistic regression and GIS. *Journal of Environmental Management*, (31): 247-59.
- McGarigal, K.; Marks, B.J. 1995. *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. 122p.

- Mertens, B.; Lambin, E.F. 2000. Land-cover change trajectories in Southern Cameroon. *ANNA*, (205): 467-494.
- Sirakoulis, G. C.; Karafyllidis, I.; Thanailakis, A. 2000. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling* (133): 209–223.
- Sklar, F.H.; Costanza, R. 1991. The development of dynamic spatial models for landscape ecology: a review and Prognosis. In: Turner, G.M.; Gardner, R.H. *Quantitative methods in landscape ecology: the analyses and interpretation of landscape heterogeneity*. New York, Springer Verlag, p.239-288.
- Soares-Filho, B.S.; Assunção, R.M.; Pantuzzo, A. 2001. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *BioScience*, (51): 1039-1046.
- Soares-Filho, B.S.; Pennachin, C.; Cerqueira, G. 2002. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, (154):217-235,
- Soares-Filho, B.S.; Corradi, L.; Cerqueira, G. C; Araújo, W. 2003a. Simulating the spatial patterns of change through the use of the dinamica model. In: *XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Belo Horizonte, Brasil: INPE. Cd-Rom.
- Soares-Filho, B.S.; Alencar, A.; Nepstad, D.; Cerqueira, G., Diaz M.; Rivero, S.; Solórzano, L.; Voll, E. 2003b. Simulating the Response of Deforestation and Forest Regrowth to Road Paving and Governance Scenarios Along a Major Amazon Highway: The Case of the Santarém-Cuiabá Corridor . *Global Change Biology*, submetido.
- Tomlin, C. D. 1990. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Turner, M.G.; Wear, D.N.; Flamm, R.O. 1996a. Land ownership and land-cover change in southern Appalachian highlands and the Olympic Peninsula. *Ecological Applications* (6): 1150-1172.
- Turner, M.G.; Wear, D.N.; Flamm, R.O. 1996b. Ecosystem management with multiple owners: Landscape dynamics in a southern Appalachian watershed. *Ecological Applications* (6): 1173-1188.
- Ventana. 2002. Vensim software – linking systems thinking to powerful dynamic models. < <http://www.vensim.com/software.html>> (Novembro 2002).
- Voinov, A.; Costanza, R.; Wainger, L.; Boumans, R.; Villa, F.; Maxwell, T.; Voinov H. 1999. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling & Software* (14): 473–491.
- White, R.; Engelen, G.; Uljee, I. 2000a. Modelling Land Use Change with Linked Cellular Automata and Socio-Economic Models: A Tool for Exploring the Impact of Climate Change on the Island of St. Lucia. In: Hill, M., Aspinall, R. *Spatial Information for Land Use Management*. Gordon and Breach, pp. 189-204.
- White, R.; Engelen, G.; Uljee, I.; Lavalle, C.; Ehrlich, D. 2000b. Developing an Urban Land Use Simulator for European Cities. In Fullerton, K. *5th EC GIS Workshop: GIS of Tomorrow*. European Commission Joint Research Centre, pp. 179-190.
- Wu, F. 1998. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rule. *International Journal of Geographical Information Science* (12): 63-82.