

# MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL URBANA: MODELO DE AUTÔMATO CELULAR NA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS PARA O MUNICÍPIO DE AMERICANA-SP

*Modeling of Urban Spatial Dynamics: Cellular Automata Model in the Simulation of Scenarios for Americana-SP Municipality*

**Gracieli Trentin<sup>1</sup>**  
**Maria Isabel Castreghini de Freitas<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**  
**Instituto de Geociências - IG**

Rua João Pandiá Calógeras, 51, Caixa Postal: 6152, Campinas-SP, CEP: 13083-870  
gracitrentin@yahoo.com.br

**<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP**  
**Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE**

Av. 24 A, 1515, Bela Vista, Rio Claro-SP, CEP: 13506-900  
ifreitas@rc.unesp.br

## RESUMO

O acelerado crescimento de áreas urbanas demanda novas metodologias de análise que possam contribuir e antecipar ações de planejamento urbano. Neste contexto, foi objetivo deste trabalho utilizar um modelo de autômato celular na modelagem da dinâmica espacial urbana de Americana-SP ao longo de 43 anos (1962-2005) e, posteriormente, simular as tendências de ocupação urbana para o curto e médio prazo. O trabalho foi elaborado com auxílio de sistemas de informação geográfica e do software de simulação DINÂMICA EGO, compreendendo basicamente três fases. A primeira envolveu a preparação dos dados para o modelo, especificamente representações de uso da terra para cinco datas (1962, 1977, 1996, 2000 e 2005) que compreenderam os quatro períodos de simulação, além da seleção de variáveis espaciais que pudessem explicar as transições de uso identificadas em cada período. A segunda fase correspondeu à calibração e à validação do modelo, ou seja, foram definidos os parâmetros para a simulação dos cenários para cada um dos períodos definidos. A terceira fase constituiu-se da obtenção dos cenários de prognósticos. Americana apresentou intensa dinâmica espacial no período entre os anos de 1962 e 1996, correspondente aos dois primeiros períodos de simulação. A dinâmica urbana tendeu a desacelerar no período recente, no entanto o município apresenta-se quase totalmente urbanizado. Os cenários de curto e médio prazo indicam tendência de continuidade na dinâmica observada, porém em menor intensidade, conforme se verifica em outras áreas urbanas do país e do mundo.

**Palavras chaves:** Modelagem Urbana, Autômato Celular, Análise Espacial, Mudanças de Uso Urbano.

## ABSTRACT

The accelerated growth of urban areas demands news methodologies of analysis that can contribute and anticipate urban planning actions. In this context, the aim of this paper was to use the cellular automata model to modeling the urban spatial dynamic of Americana-SP during 43 years (1962-2005) and then to simulate the trends of urban occupation for the short and medium term. The elaboration of this work was supported by geographic information systems and DINÂMICA EGO simulation software, comprising basically three phases. The first involved the data preparation for the model, specifically land use representations for five dates (1962, 1977, 1996, 2000 and 2005) that comprehend the four simulation periods, besides the selection of spatial variables that could explain the land use transitions identified in each period. The second phase corresponded to the calibration and validation of the model, i.e., were defined the parameters for the simulation of the scenarios for each of defined periods. The third phase consisted of obtaining predictions of scenarios. Americana showed intense spatial dynamics in the period between the years of 1962 and 1996, corresponding to the first two simulation periods. The urban dynamics tended to slow down in recent years; however the municipality has been almost completely urbanized. The scenarios of short and medium term point toward the trend of continuity in dynamics observed, but less intense, as observed in other urban areas of the country and the world.

**Keywords:** Urban Modeling, Cellular Automata, Spatial Analysis, Urban Land Use Changes.

## 1. INTRODUÇÃO

O acelerado crescimento apresentado pelas áreas urbanas nas últimas décadas tem motivado estudos relacionados à sua gestão e ao seu ordenamento. Neste sentido, as técnicas e os produtos compreendidos pelas geotecnologias, grandes aliados no desafio de planejar e ordenar o território, passaram a apresentar um destacado desenvolvimento com o advento tecnológico, sobretudo a partir das décadas de 1960 e 1970. A maior disponibilidade de dados e informações sobre o espaço geográfico, como os resultantes do Sensoriamento Remoto, possibilitaram a abertura de muitos caminhos nas pesquisas vinculadas à análise da informação espacial.

No contexto da modelagem de dados, foi grande o número de tentativas e contribuições com o desenvolvimento de modelos, os quais se destacaram pelas características de apresentação dos resultados, ou seja, desde representações matemáticas até representações espaciais e dinâmicas dos períodos mais recentes (ver BATTY, 1976 e BRIASSOULIS, 2000). Segundo Câmara et al. (2003), como os fenômenos espaciais são dinâmicos, as representações estáticas não conseguem representá-los de forma adequada. Assim, o desafio encontra-se no desenvolvimento de técnicas e abstrações que consigam representar os fenômenos dinâmicos, como mudanças de uso da terra, enchentes urbanas, tráfego viário e de pedestres, por exemplo.

A busca pela compreensão das mudanças que se processam no espaço e no tempo conferiu maior importância à obtenção de possíveis previsões para tais modificações, concretizando-se assim em ferramentas de auxílio ao planejamento e ordenamento territorial. Neste intuito muitos modelos foram desenvolvidos, entre eles o modelo de autômatos celulares (*cellular automata - CA*).

Uma das maiores potencialidades de aplicação dos autômatos celulares está nas simulações de crescimento urbano em nível local e regional. Embora o processo de crescimento das cidades normalmente apresente dificuldades para ser simulado, já que se relaciona à dinâmica de uso da terra e aos fatores socioeconômicos, as simulações em áreas urbanas são de grande interesse para o planejamento, uma vez que permitem verificar de maneira crítica os impactos futuros das políticas propostas (BARREDO et al., 2003; HEROLD et al., 2003; LIU; ZHOU, 2005).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi simular o crescimento e as mudanças de uso na área urbana do município de Americana, São Paulo, Brasil, a partir da modelagem dinâmica espacial. Posteriormente, com base na situação atual de uso, foram simulados cenários de prognósticos para o curto e médio prazo. Para a viabilização desta proposta utilizou-se o modelo de autômato celular do software DINAMICA EGO (SOARES-FILHO et al.; 2002; RODRIGUES et al., 2007).

### 1.1 Modelagem Dinâmica Espacial

A utilização de modelos está intimamente vinculada à verificação de teorias, à quantificação e à abordagem sistêmica. Por esse motivo, o desenvolvimento de modelos pode ser considerado como a estruturação de idéias sequenciais, que se relacionam com o funcionamento do sistema, tornando-o compreensível, o que conseqüentemente expressará as relações entre seus elementos (CHRISTOFOLETTI, 1952). Chorley e Kennedy (1971, p.1), afirmam que “o mundo real pode ser encarado como um conjunto constituído de sistemas interligados em várias escalas e complexidades que estão aninhados e interligados entre si formando um sistema de hierarquia”.

Um modelo constitui-se de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Em sua construção pode-se enfatizar a um ou outro desses elementos. Nessa perspectiva, os modelos podem ser classificados em: empíricos quando focalizam os relacionamentos entre suas variáveis e partem da suposição de que as relações observadas no passado continuarão no futuro; e de sistemas, que correspondem a descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, com ênfase às interações entre todos os componentes de um sistema. Além disso, o modelo deve ter respostas para indicar as variáveis ambientais e culturais, os processos ecológicos e socioeconômicos que contribuem e caracterizam a ocorrência de determinado fenômeno, também precisa explicar sua evolução e espacializá-lo (LAMBIN, 1994). Dessa forma, o modelo será capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando as escalas temporal e espacial.

A modelagem, por sua vez, refere-se à etapa de construção de modelos, ao procedimento de pesquisa que conduz ao modelo, ou seja, à representação do sistema. Esse processo desenvolve-se por meio da definição de um conjunto de hipóteses ou predições, as quais poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Desse modo, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado somente após a comparação entre o resultado gerado e o observado, para novamente ser testado (SOARES-FILHO, 1998).

A modelagem dinâmica procura transcender as limitações atuais da tecnologia de geoprocessamento, fortemente baseada em uma visão estática, bidimensional do mundo. Para Burrough (1998, p. 166), “um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta às variações em suas forças direcionadoras”.

A partir da modelagem, as cidades podem ser entendidas como um sistema complexo considerando

suas características intrínsecas de emergência, auto-organização, auto-similaridade e comportamento não-linear relacionado a sua dinâmica de uso da terra. Dessa forma, a utilização de ferramentas designadas por sistemas que denotam as características acima mencionadas pode auxiliar na busca de maiores conhecimentos a administradores e planejadores urbanos. Além disso, podem ainda oferecer suporte ao desenvolvimento de modelos que viabilizem a geração de cenários de uso da terra para o meio urbano (BARREDO et al., 2003).

Os modelos urbanos surgiram com caráter quantitativo, sendo desvinculados de recursos que viabilizassem a representação espacial dos resultados. Os primeiros modelos que surgiram nas décadas de 1940 e 1950, inicialmente nos EUA, consideravam o crescimento urbano como um todo, ou seja, integravam os aspectos de uso da terra, planejamento e transportes, loteamentos, mercado de trabalho, entre outros. Avanços na forma de representação espacial ocorreram somente nos anos de 1980 (BATTY, 1976; ALMEIDA et al., 2005). Podem ser apontadas três fases temporais para os modelos, conforme Almeida (2003): os modelos não-dinâmicos, basicamente teóricos e matemáticos que buscaram esclarecer processos de mudanças urbanas e regionais; os modelos dinâmicos que possuem uma dimensão temporal explícita, suas entradas e saídas variam com o tempo, e seus estados dependem de estados anteriores; e os modelos dinâmicos espaciais que passaram a oferecer, no final dos anos de 1980, a visualização espacial, sobretudo com a utilização de modelos de autômatos celulares (AC).

Os AC são definidos por Wolfram (1983) como idealizações matemáticas de sistemas físicos, onde o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato consiste de uma grade regular uniforme ou um campo matricial, que é comumente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (célula). O estado de um autômato celular é especificado pelos valores das variáveis em cada célula. Evolui em passos de tempo discretos, sendo o valor da variável em uma célula afetado e atualizado simultaneamente pelos valores das variáveis nas células vizinhas ou suas adjacências imediatas, encontrados no passo de tempo anterior, e de acordo com um conjunto pré-definido de regras locais.

As aplicações destes modelos encontram-se nas mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica até nas mudanças de uso e cobertura da terra, na engenharia e no controle de tráfego, na disseminação de epidemias, na biologia comportamental, nas áreas de matemática, arquitetura, simulação e jogos (ALMEIDA, 2003; SOARES-FILHO et al., 2003). Muitos estudos estão relacionados a aplicações de AC em áreas urbanas, podem ser verificados em Batty et al. (1999), Barredo et al. (2003), Herold et al. (2003), Lau e Kam (2005). Além dos estudos de Almeida (2003) e Godoy (2004), que também utilizaram o software de simulação DINAMICA, porém em versão anterior, demandando

assim determinações externas para os procedimentos de modelagem.

Os modelos urbanos, de acordo com Almeida (2003), devem ser concebidos, manipulados, aplicados e interpretados de forma sábia e crítica, de modo que os modeladores, planejadores, tomadores de decisão da esfera pública e privada, assim como cidadãos de maneira geral possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites.

## 1.2 O modelo de Autômato Celular do DINAMICA EGO

O DINAMICA é um modelo de simulação espacial do tipo AC que utiliza, de acordo com Soares-Filho et al (2002), um conjunto de mapas como entrada, correspondendo a um mapa da paisagem inicial, por exemplo, um mapa de uso da terra, um mapa do tempo de permanência de cada célula no seu estado atual e um conjunto de variáveis cartográficas, subdivididas em estáticas e dinâmicas. As variáveis cartográficas - solo, vegetação, distância às estradas, altitudes - são combinadas a partir da definição de seus pesos de evidências para gerar os mapas de probabilidade de transição.

O DINAMICA (software freeware) foi desenvolvido por Soares-Filho et al. (1998, 2002) e a partir de reformulações recentes passou a denominar-se DINAMICA EGO (Environment for Geoprocessing Objects). Nessa versão, o fluxo estático de processamento deixou de existir e os parâmetros passaram a ser ajustados a partir de interfaces gráficas.

O software é utilizado como um instrumento de investigação da trajetória de paisagens e da dinâmica de fenômenos espaciais por ser um modelo genérico de mudanças. Exemplos de aplicação estão em Almeida (2003) e Godoy (2004), referindo-se a dinâmica urbana, em Soares-Filho et al (2002), quanto à questão do desflorestamento. Outras aplicações têm sido realizadas no contexto do desmatamento da Amazônia brasileira, constituindo-se no principal mote de aprimoramento e desenvolvimento do programa.

O DINAMICA EGO tem seu núcleo, responsável pela criação e execução dos modelos, escrito em C++, e sua interface gráfica escrita em Java. De acordo com Rodrigues et al. (2007), a construção de modelos ou scripts ocorre a partir da interface gráfica, a qual foi baseada na teoria dos grafos direcionados em que a informação parte de um ponto, percorre um caminho por meio das conexões estabelecidas (functores) e chega a outro ponto que pode não diferir do ponto inicial.

Os operadores do DINAMICA atuam sobre um conjunto de dados de entrada produzindo um novo conjunto de dados como saída (tabelas ou mapas). Além dos operadores convencionais, o programa inclui operadores de grupos - *containers* - chamados especiais, pois agrupam e determinam o comportamento para o conjunto de operadores neles contidos (RODRIGUES et al., 2007), além da necessidade da determinação interna de alguns parâmetros, por parte do modelador.

### 1.3 Área de estudo

O município de Americana está inserido na região centro-leste do estado de São Paulo, Brasil (Figura 1), integrando a área metropolitana de Campinas-SP. O seu relevo apresenta características suaves, preponderando colinas amplas e médias, predominantemente convexas, com topos extensos e aplainados, e vertentes com perfis retilíneos, que resultam em elevações de encostas suaves e vales abertos (IG, 1996; LIMA, 1997), sendo que as altitudes variam de 600 a 650 metros. A área está assentada sobre o domínio morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, na região geomorfológica da Depressão Periférica Paulista (Depressão do Médio Tietê) (RADAMBRASIL, 1983; ROSS; MOROZ, 1997).

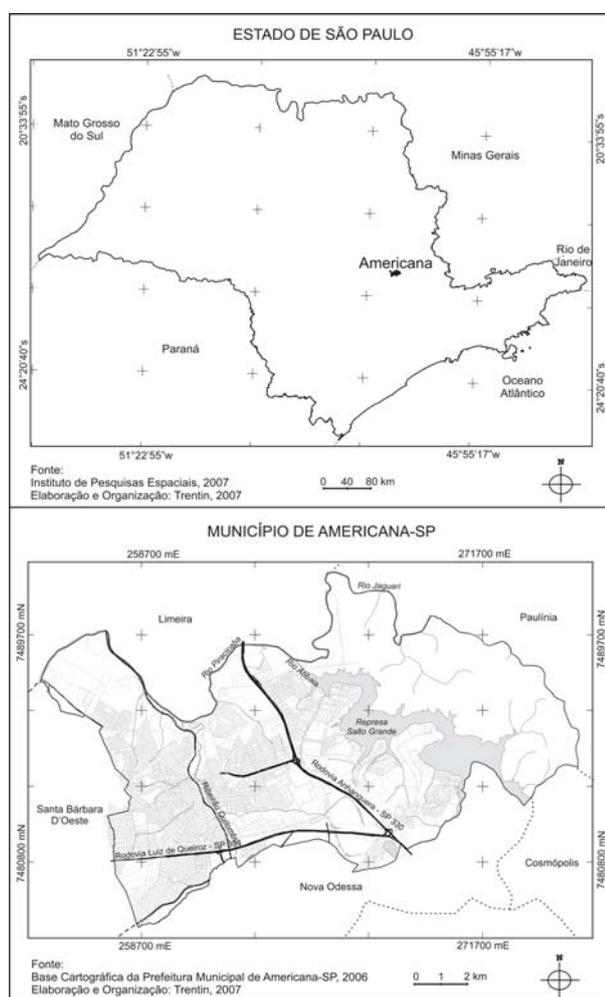


Fig. 1 – Localização do município de Americana no estado de São Paulo, Brasil.

A área de estudo, localizada em um dos eixos de desenvolvimento do interior paulista, a rodovia

Anhangüera, apresentou grande desenvolvimento industrial, sobretudo vinculado ao setor têxtil, cujo auge sucedeu-se entre as décadas de 1960 e 1980 e influenciou sua configuração urbana. O destaque do setor industrial local foi acompanhado pelo intenso crescimento de sua mancha urbana e também pelo acréscimo populacional, principalmente urbano, resultando no predomínio de características urbanas, em especial na porção oeste a partir da represa Salto Grande (Figura 1). A taxa de urbanização passou de aproximadamente 23% na década de 1940, para mais de 99% no período recente. Entretanto, seu crescimento mais acentuado ocorreu entre as décadas de 1960 e 1970, em virtude do maior desenvolvimento do setor industrial, com a desconcentração industrial a partir da metrópole paulistana (NEGRI, 1996; LENCIONI, 1998; TRENTIN, 2008).

Com a abertura dos mercados brasileiros por parte do governo federal, na década de 1990, houve o aumento da concorrência e a economia do país foi fragilizada (CARNEIRO, 2002). Tal crise atingiu a principal atividade industrial de Americana, a têxtil, que passou a enfrentar forte concorrência dos produtos asiáticos (principalmente chineses), culminando, assim, com a falência de muitas empresas locais além do maior desemprego. Porém, foi neste período, talvez por influência da crise, que o setor industrial americanense apresentou maior diversificação e nos primeiros anos da década de 2000, o fortalecimento da globalização e a introdução de modernas tecnologias no mercado mostra indícios de recuperação econômica para Americana.

Neste contexto, o desafio dos administradores locais refere-se à busca por alternativas viáveis de planejamento urbano para um espaço restrito, porquanto o município possui aproximadamente 144 km<sup>2</sup> de área territorial (SEADE, 2006). Em vista deste panorama, a tentativa de modelar a dinâmica espacial urbana e verificar suas possíveis tendências futuras poderá contribuir com as ações de planejamento urbano local.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem da dinâmica urbana de Americana foi elaborada em três fases principais (Figura 2) para cada um dos quatro períodos de simulação que compreenderam a pesquisa (1962-2005).

- 1<sup>a</sup> fase: Preparação dos dados de entrada;
- 2<sup>a</sup> fase: Calibração do modelo (definição dos parâmetros, testes de simulação e validação);
- 3<sup>a</sup> fase: Obtenção dos cenários de prognóstico.

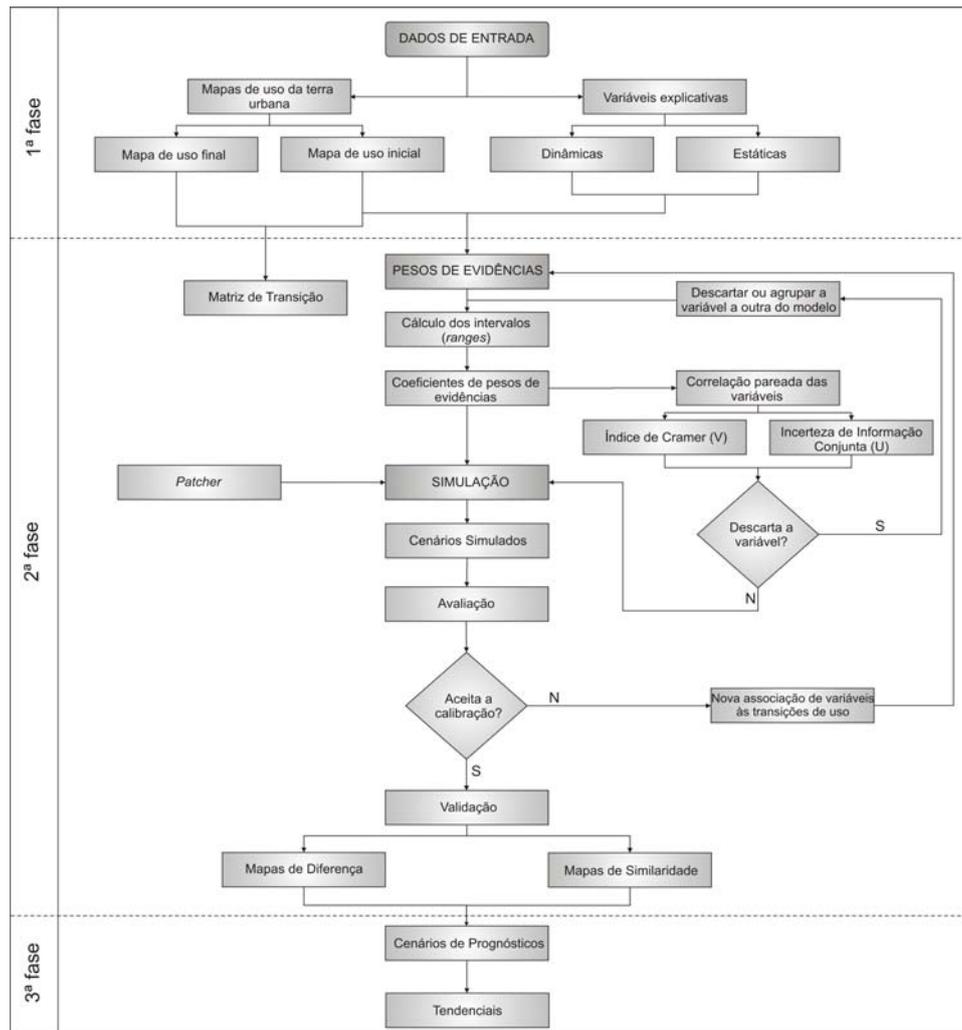


Fig. 2 – Síntese das etapas de modelagem dinâmica espacial no software de simulação DYNAMICA EGO  
Org.: Trentin, 2008.

## 2.1 Primeira fase: dados de entrada do modelo

Inicialmente, foram elaborados os dados de entrada para a etapa de modelagem a partir da utilização dos SIG Spring (CÂMARA et al., 1998) e ArcGis 9.0 (ESRI, 2006). Desta etapa resultaram os seguintes produtos cartográficos:

- Série temporal de mapas temáticos relativos a cinco cenários de uso da terra no meio urbano para os anos de: 1962, 1977, 1996 e 2000, correspondentes a fotografias aéreas; e 2005 a partir de imagens do software Google Earth. Estes cenários compuseram os quatro períodos de simulação da modelagem: 1962-1977; 1977-1996; 1996-2000 e; 2000-2005. Foram consideradas quatro classes de uso da terra: residencial; industrial; comercial e serviços e não-urbano (toda a área não urbanizada). A generalização das classes de uso da terra foi necessária, pois, a complexidade do modelo tende a aumentar quanto maior for o número de atividades distintas consideradas, e essas detêm, invariavelmente, uma regra própria que está associada ao desenvolvimento especificado a partir de vários parâmetros (BATTY et al., 1999).

- Representações de variáveis espaciais que pudessem explicar as mudanças de uso da terra ocorridas e que venham a ocorrer em cada período de simulação. As variáveis corresponderam à hidrografia, estradas de rodagem, hipsometria, declividade e as próprias distâncias em relação às classes de uso da terra identificadas.

Os produtos obtidos constituíram a modelagem dinâmica espacial de Americana a partir do modelo de AC do software de simulação DYNAMICA EGO.

## 2.2 Segunda fase: calibração e validação do modelo

Para esta pesquisa adotou-se o método de pesos de evidências baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, que se refere à disposição de um evento ocorrer - ou no caso, a mudança de um uso da terra - em face da ocorrência passada de outro evento, o qual pode ter sido uma evidência ou uma variável explicativa (BONHAM-CARTER, 1994; ALMEIDA, 2003). Por exemplo, a probabilidade de ocorrer uma transição de uso não-urbano para industrial, posto a pré-existência de um distrito industrial nas proximidades.

Assim, a probabilidade condicional permite obter a probabilidade de um evento **A** ocorrer sabendo-se que o evento **B** já ocorreu. Dessa forma, conforme Bonham-Carter (1994), é atendido o principal conceito da pesquisa bayesiana que está na idéia de probabilidades *a priori* e *a posteriori* de ocorrência de um determinado evento.

Os pesos de evidência representam a influência das faixas de distâncias de uma determinada variável nas probabilidades espaciais de uma transição de uso da terra. Os pesos são obtidos a partir das formulações 1 e 2.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad (1)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+ \quad (2)$$

Em que  $O\{D\}$  e  $O\{D/B\}$  são os odds ou chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento **D** e ocorrer **D** dado um padrão espacial **B**.  $W^+$  é o peso de evidência de ocorrer o evento **D**, dado um padrão espacial **B** (BONHAM-CARTER, 1994; SOARES-FILHO et al., 2003).

Em estatística é possível determinar a probabilidade de ocorrerem mudanças mediante algumas evidências do problema ou de variáveis explicativas. No entanto, essas variáveis devem ser independentes, conforme o teorema de Bayes, para que possam explicar uma transição do uso da terra. Nesse contexto, utilizou-se o Índice de Cramer (V), o qual toma por base as medidas absolutas de área das classes, e a Incerteza de Informação Conjunta (U), que se refere aos valores percentuais e constitui-se em uma medida de correlação entre os mapas (ALMEIDA, 2003).

Ambos os índices são utilizados para verificar a independência entre os pares de variáveis explicativas do modelo a partir da matriz de transição ou tabulação

cruzada entre pares de mapas de variáveis. Tais índices variam de zero (0) a um (1): quanto mais próximos a zero forem seus valores, o grau de dependência ou associação entre as variáveis deverá ser menor; já o contrário representará dependência. Segundo Bonham-Carter (1994), os valores inferiores a 0,5 para ambos os índices supracitados sugerem menos associação do que mais entre as variáveis.

A calibração compreendeu a seleção do melhor conjunto de variáveis e parâmetros, de forma a buscar o melhor ajuste entre as informações utilizadas e a realidade observada (ALMEIDA, 2003). Em vista disso, foram realizados inúmeros testes até se obter tal ajuste, assim como as maiores semelhanças possíveis entre o cenário real de uso da terra e o cenário simulado de cada um dos períodos de simulação. Toda essa etapa foi desenvolvida no software DINAMICA EGO, por meio de seus operadores.

A obtenção dos pesos de evidências estruturou-se em duas etapas: definição dos intervalos e dos coeficientes de pesos de evidências. Uma vez definidos os pesos, procedeu-se à execução do modelo de simulação para simples verificação, a qual indicou as possibilidades de modificações para o teste subsequente de calibração. É interessante destacar a aleatoriedade das simulações produzidas pelo software em cada execução do modelo de simulação, pois, mesmo mantendo-se inalterados os parâmetros de transição, os resultados tendem a se apresentar distintos.

Já a validação do modelo compreendeu o cálculo dos mapas de diferença e de similaridade (Figura 3). Os primeiros identificaram as distinções entre os mapas de uso final e inicial (ambos reais) e entre os mapas de uso final simulado e inicial real (SOARES-FILHO et al., 2004; RODRIGUES et al., 2007).

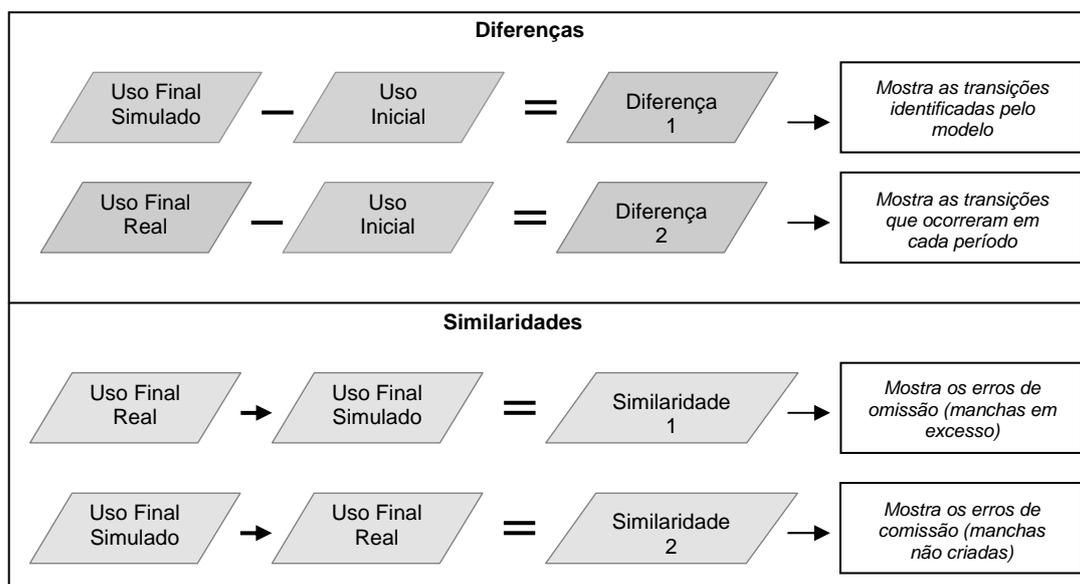


Fig. 3 – Sequência dos procedimentos de obtenção dos mapas de diferença e similaridade para cada período de simulação

Os mapas de similaridade, por sua vez, foram obtidos da relação entre os mapas de uso real e simulado, por meio de uma comparação entre ambos com base na localização das células em si mesmas e das células que estão na vizinhança próxima, dependendo das categorias de uso a que pertencem. Essa etapa foi realizada a partir da medida de similaridade fuzzy proposta por Hagen (2003) e adaptada por Rodrigues et al. (2007) para a implementação no DINAMICA EGO. O teste de similaridade fuzzy está baseado no conceito de *fuzziness of location*, no qual a representação de uma célula é influenciada por si mesma e em menor extensão pelas células vizinhas (HAGEN, 2003). O resultado deste teste varia de zero (0) a um (1); quanto mais próximo de um (1), mais similar estará a simulação da situação real. No espaço intermediário desse intervalo, as células da vizinhança mais próxima de cada transição, ou com valores próximos a 1, também serão consideradas similares, porém em menor grau, em decorrência da função de decaimento exponencial considerada pelo teste.

### 2.3 Terceira fase: obtenção dos cenários de prognóstico

A terceira fase da pesquisa compreendeu a simulação de prognósticos a partir do modelo calibrado e validado da etapa anterior, alterando-se somente o número de iterações do modelo. Nesta fase foram obtidos os cenários de tendência, que corresponderam à manutenção do mesmo padrão de crescimento urbano verificado na situação real.

Em decorrência da dinâmica espacial verificada, o intervalo de tempo definido para os cenários de prognóstico não foi muito extenso. Assim, a partir de cenário real, o ano de 2005, adotou-se o intervalo de cinco anos para o prognóstico de curto prazo, e para o médio prazo foram adotados dois

intervalos, sendo um de nove anos e outro de onze anos. Tal delimitação deve-se, segundo Almeida (2003), a inexistência de definições quanto ao curto e médio prazo para uso urbano. Dessa forma, é sensato definir-se um período de até cinco anos para o curto prazo e para o médio um intervalo não maior que dez anos.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Dinâmica espacial urbana (1962-2005): os quatro períodos de simulação

As representações de uso da terra identificadas para as datas de 1962, 1977, 1996, 2000 e 2005, caracterizaram, individualmente, as fases do processo de desenvolvimento socioeconômico do município de Americana em cada época. A dinâmica de uso da terra local determinou a evolução de uma organização espacial complexa, caracterizada por alterações nos padrões socioeconômicos que transformaram o território americanense em um espaço onde predominam atualmente usos da terra vinculados às diferentes estruturas e processos urbano-industriais (TRENTIN, 2008).

Enquanto o uso da terra para 1962 apresentava grande parte do território ainda não-urbanizado, em 2005 evidenciava-se o grande avanço da mancha urbana, sobretudo a oeste da represa Salto Grande, restando assim poucos espaços a serem ocupados pela estrutura urbana (Figura 4).

A partir dos mapas de uso inicial e final de cada um dos quatro períodos de simulação, foram calculadas, no DINAMICA EGO, as matrizes de transição correspondentes, que se referem basicamente, a uma tabulação cruzada entre os dois mapas, especificando-se o intervalo de tempo de cada um dos períodos.

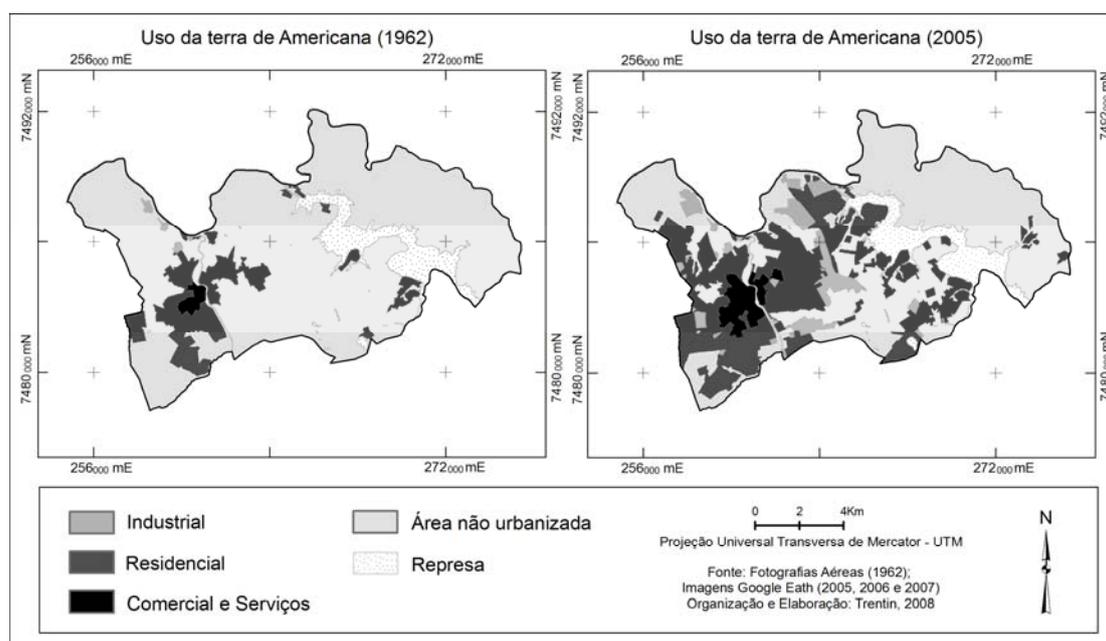


Fig. 4 – Representações do uso da terra no meio urbano de Americana (1962 e 2005)

Os produtos de saída gerados pelo modelo corresponderam a duas tabelas para cada período de simulação, denominadas: *single step matrix* e *multiple step matrix*. A primeira refere-se ao período como um todo e a segunda apresenta os passos de tempo especificados. Para a modelagem serão consideradas as

matrizes de passos múltiplos ou matrizes anuais, já que os períodos de simulação são indicados em passos de tempo correspondentes a cada ano. A partir das matrizes foram verificadas as transições de uso da terra e suas respectivas taxas anuais de transição em cada um dos períodos de simulação (Tabela 1).

TABELA 1 – TRANSIÇÕES ANUAIS DE USO DA TERRA DE AMERICANA NOS QUATRO PERÍODOS DE SIMULAÇÃO (1962-2005)

<i>Transições de uso da terra</i>	1962-1977	1977-1996	1996-2000	2000-2005
1. Residencial para industrial*	-	0,22%	0,15%	-
2. Residencial para comercial e serviços	0,38%	0,29%	0,19%	0,20%
3. Não-urbano para residencial	0,95%	0,84%	0,63%	0,42%
4. Não-urbano para industrial	0,21%	0,12%	0,26%	0,02%

\*Transição verificada somente para dois períodos de simulação.

Embora os intervalos de tempo que constituem os períodos de simulação variem de 4 até 19 anos, é possível verificar por meio das taxas de transição anuais, a maior dinâmica espacial nos dois primeiros períodos, reduzindo-se ao longo do tempo. A transição de áreas não urbanas para áreas residenciais apresentou-se maior em todos os períodos, em razão da maior generalização desta classe quanto aos usos urbanos de Americana.

A partir do reconhecimento das transições de uso da terra para cada período procedeu-se à seleção

das variáveis independentes, necessárias para explicar a ocorrência de tais transições. Este procedimento é arbitrário e vale-se em muito do conhecimento do modelador a fim de relacioná-las de acordo com suas possibilidades de influência nas transições ocorridas. As variáveis utilizadas na modelagem de Americana e suas associações com as transições de uso da terra para cada período de simulação estão na Tabela 2. Cabe salientar que as associações apresentadas nesta tabela referem-se aos melhores resultados da calibração do modelo, após a realização de vários testes.

TABELA 2 – SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA AS TRANSIÇÕES DE USO DA TERRA EM CADA PERÍODO DE SIMULAÇÃO PARA AMERICANA

<i>Variáveis</i>	1962-1977			1977-1996				1996-2000				2000-2005		
	<i>Transições</i>			<i>Transições</i>				<i>Transições</i>				<i>Transições</i>		
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	2	3	4
Distâncias à hidrografia			X	X	X	X	X	X		X	X		X	
Distâncias à ferrovia*		X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-
Distâncias às estradas de rodagem		X		X	X	X	X	X		X	X		X	X
Hipsometria	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Declividade		X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
Distâncias às áreas residenciais		X	X			X	X						X	
Distâncias às áreas industriais		X		X	X	X	X		X		X	X	X	X
Distâncias à área comercial e serviços	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	

\*Variável desconsiderada na modelagem dos períodos recentes, pois sua influência deixou de ser relevante.

O conjunto de variáveis da Tabela 2 é obtido a partir de um *script* montado no DINAMICA EGO, a fim de calcular os intervalos ou faixas (*ranges*) de distâncias para cada variável independente, de modo individual para cada transição de uso. Para este cálculo foram utilizados como produtos de entrada os mapas de uso da terra inicial e final e as variáveis selecionadas para cada período e associadas às respectivas transições. Além disso, foram definidos os parâmetros internos, somente para cada uma das variáveis não-categóricas (sem classes pré-definidas), os quais corresponderam a um máximo e mínimo delta (número de células), a um valor de incremento (metros), e o ângulo de tolerância (graus). Tais parâmetros podem ser alterados a cada novo teste, dependendo dos resultados obtidos. Assim, o modelador poderá, por exemplo, aumentar ou diminuir o ângulo de tolerância de uma variável, o que determinará um maior ou menor

número de intervalos a serem gerados para ela em uma determinada transição de uso.

O arquivo gerado, contendo os intervalos (*ranges.dcf*) para cada período, foi então utilizado na determinação dos pesos de evidências ou coeficientes a partir de um novo conjunto de operadores. Constituíram-se também em entradas desse novo modelo os mapas de uso inicial e final e as variáveis utilizadas no modelo anterior, obtendo-se assim os coeficientes de pesos de evidência (*weights.dcf*), os quais podem ser visualizados em gráficos e tabelas no próprio software.

Os pesos indicam se a variável associada a cada transição de uso é favorável ou não para explicar a ocorrência de tal transição no período. Pesos negativos desfavorecem a ocorrência da transição a que está associada a variável, pesos positivos tendem a favorecê-la, e os pesos iguais a zero não representam

influência.

A independência entre os pares de variáveis explicativas foi verificada a partir do cálculo dos Índices de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) no DINAMICA EGO, obtendo-se a correlação entre os pares de variáveis consideradas em cada período. Verificou-se que todas as variáveis apresentaram valores, em sua maioria, menores que 0,5 para ambos os índices, conforme determina Bonham-Carter (1994), ver Trentin (2008). Dessa forma, as variáveis indicaram independência, ou seja, mostraram menor associação e, por esse motivo, nenhuma variável foi excluída ou agrupada (Figura 2).

Posteriormente, passou-se aos testes de simulação, os quais tiveram como produtos de entrada o mapa de uso inicial (1962), o conjunto de variáveis, pré-definido e aceito para cada período, e os respectivos pesos de evidências gerados (*Weights.dcf*).

Neste modelo de simulação foi utilizado um operador de controle especial - *container Repeat* – o qual determina a repetibilidade e atualização das informações, ou seja, o número de iterações do modelo. Assim, os dados e operadores contidos no *repeat* permanecem em fluxo constante, como uma reação em cadeia, interagindo durante todos os passos de tempo ou iterações de cada período. Nesta etapa as variáveis explicativas passaram a ser denominadas dinâmicas quando contidas no *repeat* e por isso terem suas faixas de distância calculadas a cada passo de tempo, e como estáticas quando permaneceram externas a este

operador. Nesta pesquisa, constituíram variáveis dinâmicas aquelas calculadas diretamente dos mapas de uso da terra, ou seja, as distâncias em relação às classes de uso e, como variáveis estáticas, todas as demais - hipsometria, declividade, distâncias às estradas, distâncias à hidrografia etc.

Além disso, foram definidos os parâmetros que compõe o algoritmo *patcher*, componente do *repeat* e responsável pela criação das manchas de uso da terra. Esta função depende das probabilidades de ocorrência das mudanças, buscando as células que apresentam maior possibilidade de transição.

As características das novas manchas geradas ou áreas de expansão são definidas por parâmetros que se referem ao tamanho médio e à variância da mancha, ambos dados em hectares e a isometria que corresponde a um índice de agregação das manchas, cuja variação permanece entre zero (0) e dois (2). Caso seja zero, as manchas geradas serão totalmente desagregadas; igual a um, o grau de agregação será determinado pelas probabilidades e; se for dois, as manchas serão bastante agregadas. O valor definido para a isometria irá multiplicar as probabilidades da janela de vizinhança durante a execução do algoritmo de transição (*patcher*).

A determinação destes parâmetros foi realizada por tentativa e erro a partir de vários testes. Na Tabela 3 estão as parametrizações consideradas mais satisfatórias para os cenários finais simulados de cada um dos quatro períodos de simulação.

TABELA 3 – PARÂMETROS DE TRANSIÇÃO DO USO DA TERRA PARA AMERICANA NOS PERÍODOS DE SIMULAÇÃO

Parâmetros	1962-1977			1977-1996				1996-2000				2000-2005		
	Transições			Transições				Transições				Transições		
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	2	3	4
Tamanho médio (ha)	8,0	10,0	3,0	3,0	5,0	8,0	8,0	2,0	4,0	6,0	3,5	8,0	8,0	6,0
Variância (ha)	0,1	0,2	3,0	0,1	0,5	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	4,0	1,0	0,0
Isometria	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	1,0	2,0	2,0	1,5	2,0

Após vários testes de simulação alterando a seleção de variáveis, a definição dos pesos de evidências e os parâmetros solicitados pelo modelo foram obtidos os cenários simulados para 1977, 1996, 2000 e 2005, os quais correspondem aos mapas finais de cada período (Figura 5).

Então, procedeu-se à validação do modelo que correspondeu à aplicação da medida de similaridade fuzzy adaptada de Hagen (2003), a qual foi utilizada também ao longo dos testes de simulação realizados, visto que propicia uma idéia geral quanto aos acertos e erros da modelagem, sendo esses últimos por omissão

ou comissão.

A Tabela 4 traz as similaridades 1 e 2 encontradas para cada período de simulação. A diferença entre as duas vincula-se aos erros de omissão e comissão, pois, enquanto a primeira aponta as manchas em excesso e deixa de mostrar onde realmente deveriam ocorrer transições, a segunda similaridade indica o inverso. Para efeito de verificação da simulação efetuada, considera-se o menor valor encontrado para a semelhança entre os mapas, ou seja, a segunda similaridade.

TABELA 4 – SIMILARIDADES PARA OS CENÁRIOS SIMULADOS DE CADA PERÍODO

	1ª similaridade (%)	2ª similaridade (%)
Simulação 1977	40,84	37,32
Simulação 1996	43,07	38,84
Simulação 2000	36,60	32,16
Simulação 2005	34,03	30,26

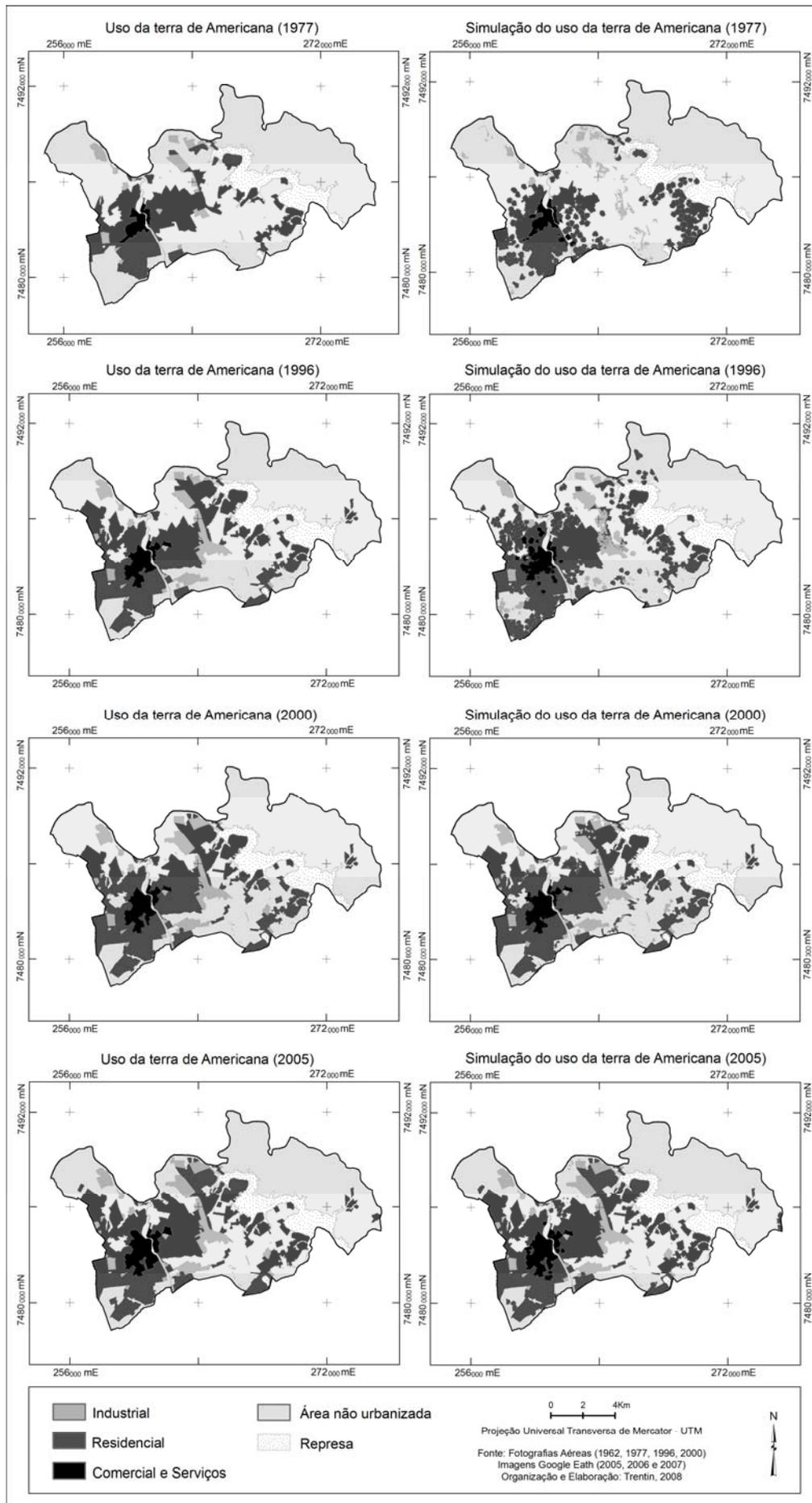


Fig. 5 – Cenários reais e simulados para os quatro períodos de simulação de Americana

As similaridades para os cenários de cada período de simulação apresentaram valores baixos se considerada a escala de variação dessa medida entre 0 e 1. No entanto, por se tratar de uma área urbana com morfologia dispersa como Americana, pode-se considerar estes valores como aceitáveis. As similaridades (Tabela 4) mantiveram comportamento semelhante em todos os períodos, sendo que a diferença entre a primeira e a segunda similaridade variou entre 3,52% no período 1962-1977 e 4,44% no período 1996-2000. Os dois outros períodos apresentaram valores de diferença intermediários. A menor diferença entre as similaridades tende a indicar maior equilíbrio entre os erros de comissão e omissão.

A partir dos cenários selecionados, considerados como melhores resultados para cada um dos quatro períodos (Figura 5), pode-se verificar que nos dois primeiros períodos, 1962-1977 e 1977-1996, houve maiores limitações em virtude do número de variáveis explicativas consideradas e também em face das grandes alterações que se processaram no espaço local, as quais estão vinculadas ao panorama socioeconômico predominante - de grande expansão urbano-industrial e crescimento populacional.

Embora tenham sido evidenciadas manchas em excesso criadas pela simulação em todos os períodos, elas indicam certa lógica quanto a sua localização espacial, ou seja, sua ocorrência se dá onde efetivamente ocorreram transições de uso da terra no determinado período. As manchas em excesso podem ter relação com a configuração urbana local, já que existem núcleos urbanos dispersos pelo território, dificultando a modelagem, o que demandaria variáveis específicas para explicação desse comportamento espacial. Contudo, segundo salientado por Almeida (2003), o objetivo da modelagem não se vincula à reprodução fiel da realidade, mas somente à verificação das principais tendências e padrões que se processam no espaço, como as mudanças de uso da terra.

Especificamente, a transição de uso residencial para comercial e serviços, identificada para os quatro períodos de simulação, indicou expansão da área central, vinculada às atividades de comércio e serviços, sobre as áreas residenciais, crescendo no seu entorno e em diferentes direções ao longo do tempo de acordo com as tendências de crescimento urbano local. A transição de áreas não urbanas para residenciais, de certa forma, condicionou-se às características do relevo que favoreceram a ocupação urbana, além da pré-existência de núcleos urbanos distantes da mancha central que influenciaram no direcionamento do crescimento urbano. Além da influência das principais vias de acesso, da instalação de indústrias de porte, sobretudo na década de 1970 em decorrência da desconcentração paulistana, do fluxo migratório que contribuiu para o crescimento populacional urbano em razão da atratividade exercida pelo setor industrial, principalmente o têxtil, e por sua vez, demandava infraestrutura urbana.

A mudança das áreas não urbanizadas para áreas industriais também foi identificada para os quatro períodos de simulação, tendo sido verificada

principalmente nas proximidades das rodovias Anhangüera e Luiz de Queiroz, além da proximidade com outras indústrias já instaladas. Já a transição de áreas residenciais para industriais, identificada somente nos períodos 1977-1996 e 1996-2000, caracterizou-se por alterações de pequenas proporções espaciais, concentradas no entorno da classe de uso comercial e serviços, ou nas áreas próximas ao município de Santa Bárbara D'Oeste, ou ainda nas proximidades de outros estabelecimentos industriais de maior porte.

Com base na simulação dos cenários finais de uso da terra para cada período, verificaram-se resultados mais satisfatórios para os períodos de simulação recentes, muito provavelmente vinculados ao menor intervalo de tempo que compreendiam, bem como de suas menores taxas de transição.

A disponibilidade de dados, especificamente representações espaciais ligadas a fotografias aéreas ou imagens, sobretudo para as épocas passadas, torna-se um problema para a modelagem de dados. Afinal, grandes intervalos de tempo entre os mapas de uso da terra tendem a dificultar o procedimento de simulação, pois segundo os teóricos da modelagem, o ideal seriam intervalos de cinco anos e não mais que 10 anos (FORRESTER, 1969). No entanto, a realidade não é compatível com a teoria, já que inexistem dados com essa frequência temporal para os períodos mais antigos.

Em face dos resultados obtidos, a calibração efetuada para o último período de simulação foi adotada com o objetivo de elaborar prognósticos de tendências para o uso urbano de Americana.

### 3.2 Proposição de prognósticos

Recentemente, os modelos espaciais têm se tornado importantes ferramentas de auxílio no planejamento territorial, pois não há como desvincular o fator temporal de qualquer estratégia de ordenamento. Dessa forma, os modelos de simulação que reproduzem o padrão das mudanças no espaço podem ser considerados requisitos para o entendimento e avaliação de questões complexas do meio ambiente nas diferentes escalas espaciais (SOARES-FILHO et al., 2004).

Em vista dessa contribuição da modelagem ao planejamento urbano, foram elaborados cenários de tendência que partem da calibração alcançada para o cenário de 2005, cujos parâmetros utilizados são mantidos inalterados (Tabela 3), modificando-se somente o número de iterações, o qual foi extrapolado de forma a representar o uso da terra para o curto prazo (2010) e médio prazo (2014 e 2016). De acordo com Almeida (2003, p. 180), é inadequado lidar com prognósticos de longo prazo, uma vez que mudanças de uso do solo de longo prazo são dificilmente previsíveis, ficando sujeitas a erros, em razão de alterações inesperadas na esfera macroeconômica, e conseqüentemente no comportamento do uso do solo. Além disso, conforme a autora, para o planejamento urbano estratégico, somente o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e processos de tomada de decisão.

Os prognósticos de uso da terra elaborados para o curto e médio prazo de Americana estão na Figura 6. A partir do cenário de curto prazo, observam-se pequenas modificações, principalmente relacionadas com a transição da classe não-urbana para residencial, as quais estariam localizadas nas proximidades da represa Salto Grande, sobretudo na porção sudoeste e leste.

Por sua vez, os dois cenários que representam o médio prazo também trazem pequenas alterações, as quais estão interligadas, em maior grau, com o aumento de áreas residenciais em detrimento das áreas ainda não-urbanizadas. Já a classe comercial e serviços mostra tendência de crescimento com a formação de manchas predominantemente nas direções sul e leste.

Nessa perspectiva de análise, pode-se apreender que Americana apresenta pequena tendência de crescimento urbano se considerada a permanência das características atuais, ou seja, a diminuição do ritmo de expansão urbano-industrial e populacional,

conforme verificado ao longo do trabalho. Aliado a isso, é preciso destacar a restrição territorial, visto que as áreas não-urbanizadas do município estão sendo reduzidas, reforçando-se a necessidade de um planejamento territorial adequado para o uso e ocupação urbanos.

A partir dos resultados alcançados, somados a outras tentativas já efetivadas nesta área do conhecimento, pode-se perceber o potencial que vem adquirindo a modelagem de dados espaciais, principalmente como subsídio para o planejamento e o ordenamento de áreas urbanas. O estágio atual das pesquisas em modelagem espacial está permitindo a implementação de modelos com base em AC, até mesmo em SIG comerciais, como, por exemplo, o IDRISI (EASTMAN, 2003). Além disso, Almeida (2003) destaca que a facilidade de associação de dados matriciais dos SIG com modelos de AC trouxe novas ferramentas de análise e possibilidades para a modelagem espacial.

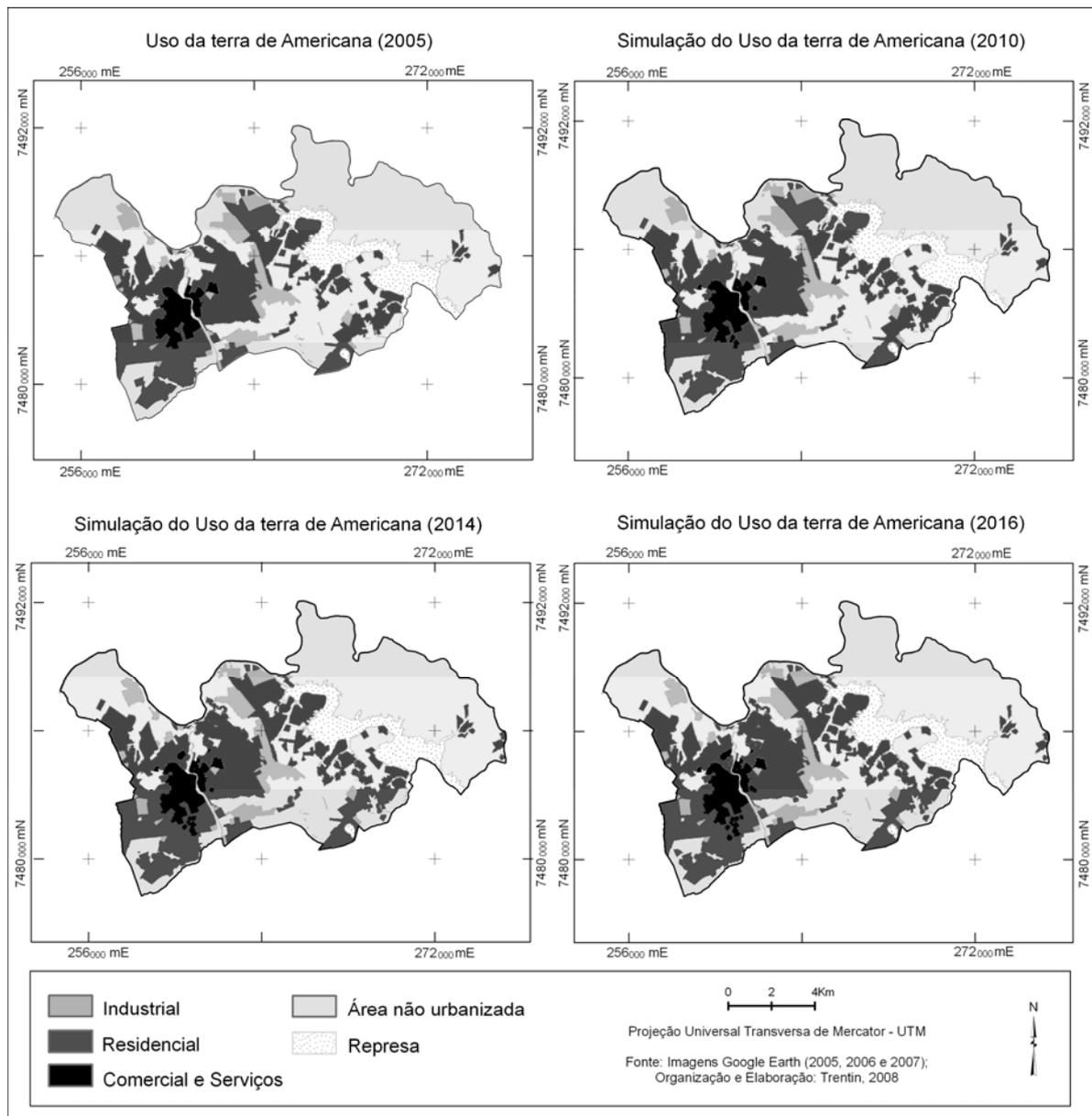


Fig. 6 – Simulações de tendências futuras para a dinâmica de uso da terra na área urbana de Americana

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições físicas de Americana não se constituíram em empecilhos para a ocupação do território, posto o predomínio de relevo plano e baixas declividades. As variáveis determinantes das mudanças de uso da terra foram as vias de acesso, a instalação de indústrias, os núcleos urbanos dispersos que indicavam pré-existência de infra-estrutura urbana, além da atratividade da margem oeste da represa Salto Grande, com a possibilidade de atividades relacionadas ao lazer e recreação.

As simulações elaboradas para os cenários pré-existent (1977, 1996, 2000 e 2005) mostraram maiores semelhanças nos períodos recentes, posto o menor intervalo de tempo entre os cenários inicial e final de uso da terra e também as menores alterações da própria dinâmica de uso, ao contrário dos dois primeiros períodos de simulação que se caracterizaram pela grande dinâmica espacial aliada a intervalos temporais maiores.

A transição de áreas não-urbanas para residenciais foi mais representativa em todos os períodos de simulação, em decorrência da maior generalização que lhe foi conferida, mas principalmente em virtude da grande expansão urbano-industrial e do aumento populacional que Americana vivenciou até a década de 1980, os quais definiram sua morfologia urbana.

A transição derivada de áreas não-urbanas para industriais também se destacou em consequência do processo de desconcentração da atividade industrial para o entorno da metrópole paulistana. E, por sua vez, as transições das classes *residencial para comercial e serviços* e *residencial para industrial* mostraram menores alterações, mas estiveram atreladas à situação de crescimento e desenvolvimento do município ao longo do tempo.

Os cenários de prognósticos para curto e médio prazos, considerando-se as características da dinâmica de uso da terra do período de simulação de 2000/2005, indicam a continuidade nos padrões de mudanças, ou seja, tende a ocorrer crescimento da mancha urbana sobretudo vinculada aos usos residencial - em maior intensidade - e industrial, bem como no prolongamento periférico da classe comercial e serviços em direção aos eixos viários principais.

Os prognósticos para o curto e médio prazo de Americana tornam visíveis as tendências que estão se processando no cenário das grandes e médias cidades do país, ou seja, uma redução nos índices de crescimento populacional e, em consequência, na expansão da área urbana.

Destaca-se ainda o desempenho do software de simulação utilizado, que continua sendo aprimorado, sobretudo para aplicações vinculadas ao desflorestamento. Porém, nas aplicações em áreas urbanas, que concentram maior detalhamento e dinâmica de paisagem se comparadas com as áreas de florestas, as manchas de uso criadas pela simulação não correspondem às formas e desenhos apresentados especificamente pelas áreas urbanas. No entanto, o

software mostrou potencial para aplicações em estudos urbanos.

Outro aspecto a ser destacado refere-se à demanda de tempo de processamento para a modelagem, a qual foi considerável nesta aplicação, embora tenham sido utilizadas poucas variáveis e a área de estudo possui reduzida extensão territorial. A execução dos modelos é dependente do intervalo de tempo compreendido em cada período de simulação e também do número de variáveis definidas para cada transição de uso da terra. Dessa forma, quanto maior o intervalo e o número de variáveis, maior será o tempo demandado pelo modelo.

O modelo de AC utilizado, também mostra suas deficiências e limitações, como por exemplo, o fato de considerar o tempo como discreto e a generalização necessária aos mapas. Contudo, a possibilidade de espacialização das simulações que esse modelo permite já representa um progresso na área de modelagem. Para trabalhos futuros sugere-se a observação das características da morfologia urbana, a qual pode conferir maior complexidade para a modelagem, demandando a seleção de variáveis específicas para explicar as transições da paisagem.

Por fim, a utilização da modelagem dinâmica nesta pesquisa vem reforçar a possibilidade de utilização dessa ferramenta de análise espacial por parte de planejadores e administradores, no sentido de procurar as melhores alternativas para o ordenamento e crescimento da mancha urbana, de modo a distribuir adequadamente a infra-estrutura básica da cidade. Assim sendo, a representação ou previsão das mudanças com acuracidade é inviável, porém aproximações considerando os elementos da realidade, por meio de um maior detalhamento dos produtos utilizados na modelagem, devem ser buscadas e podem levar à superação dos resultados alcançados.

#### AGRADECIMENTOS

À FAPESP (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo n.º 06/54766-0.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. M. de. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauri e Piracicaba (SP), Brasil.** 2003. 351f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

ALMEIDA, C. M. de; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G. Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 11., 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: ANPUR, 2005. Não paginado.

- BARREDO, J. I. et al. Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. **Landscape and Urban Planning**, v. 64, p. 145-160, 2003.
- BATTY, M. et al. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 23, p. 205-233, 1999.
- BATTY, M. **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1976. 381 p.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994.
- 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/content.s.htm>>. Acesso em 20 de março de 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, 1998. p. 165-192.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J.S. de. Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. **Geografia**, Rio Claro, v. 28, n. 1, p. 83 – 96, jan./abr., 2003.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling**. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-Jun, 1996.
- CARNEIRO, R. **Desenvolvimento em crise: a economia brasileira no último quarto do século XX**. São Paulo: Ed. UNESP; IE-Unicamp, 2002. 423 p.
- CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical Geography: a Systems Approach**. London: Prentice-Hall International, 1971.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Problèmes de Géographie Humaine**. Paris: Librairie Armand Colin, 1952. p. 25 – 34. Tradução de Jaci Silva Fonseca.
- EASTMAN, J. R. **Idrisi Kilimanjaro**. Massachusetts, USA: Clark University, 2003. 200p.
- ESRI. **ArcGIS**. Redland: C.A., 2006.
- FORRESTER, J. W. **Urban dynamics**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1969.
- GODOY, M. M. G. **Modelagem da dinâmica de ocupação do solo no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil**. 2004. 99f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- GOOGLE EARTH 4.0. [S.l.]: Google, 2007. Disponível em <<http://earth.google.com/>>.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.
- HEROLD, M. et al. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. **Remote Sensing Environmental**, v.86, p. 286–302, 2003.
- INSTITUTO GEOLÓGICO. IG. Diagnóstico do meio físico da média bacia do rio Piracicaba para fins de gestão ambiental. **Boletim 13**, 1996.
- LAMBIN, E. F. **Modeling Deforestation Processes - A Review**, Trees series B: Research Report . European Commission, Luxembourg, 1994.
- LAU, K. H.; KAM, B. H. A cellular automata model for urban land-use simulation. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, p. 247-263, 2005.
- LENCIONI, S. Mudanças na metrópole de São Paulo (Brasil) e transformações industriais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 12, p. 27-42, 1998.
- LIMA, R. H. C. **Configuração geológico-geotécnica da região de Americana-SP, utilizando sondagens à percussão de simples reconhecimento**. 1997. 115f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.
- LIU, H.; ZHOU, Q. Developing urban growth predictions from spatial indicators based on multi-temporal images. **Computers, Environment and Urban Systems**, n. 29, p. 580-594, 2005.
- NEGRI, B. **Concentração e desconcentração industrial em São Paulo (1880-1990)**. Campinas: Ed. da UNICAMP, 1996. 242 p.
- RADAMBRASIL, PROJETO. **Levantamento de Recursos Naturais**. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, Programa de Integração Regional. Folha SF. 23/24 Rio de Janeiro e Vitória. Rio de Janeiro, RJ, 1983. v. 32.
- RODRIGUES, H. O. et al. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. p. 3089-3096.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Mapas e Relatório. São Paulo: FFLCH/USP; IPT/FAPESP, 1997.
- SÃO PAULO (Estado). Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. SEADE. **Informações Municipais: Perfil Municipal**. Disponível em <<http://www.seade.gov.br/produtos/perfil>> Acesso em: 23 de março de 2006.

SOARES-FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SOARES-FILHO, B. S. et al. 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. et al. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: ALBERNAZ, A. L.; SILVA, J. M. C. da; VALERIANO, D. (Ed.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. S/l: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. p., 1-16.

SOARES-FILHO, B. et al. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, n. 10, 2004.

SOARES-FILHO, B. S. et al. **Dinâmica project**. Disponível em <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>> Acesso em 03 de setembro de 2006.

TRENTIN, G. **A expansão urbano-industrial do município de Americana-SP: geotecnologias aplicadas à análise temporal e simulação de cenários**. 237f. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008. Disponível em <[http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=110454](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=110454)>.

WOLFRAM, S. Estatistical mechanics of cellular automata. **Reviews of Modern Physics**, v. 55, n. 3, p. 601-644, 1983.