

## Modelagem dinâmica espacial de mudanças no uso da terra da cidade de Rio Claro, SP

Lucimari Aparecida Franco Garcia Rossetti <sup>1</sup>

Cláudia Maria de Almeida <sup>2</sup>

Sergio dos Anjos Ferreira Pinto <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Caixa Postal 178 – 13506-900 – Rio Claro - SP, Brasil  
{lucimari,sanjos}@rc.unesp.br

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

**Abstract.** The main goal of this research was to simulate land use change in the city of Rio Claro (SP), using remote sensing, geographic information systems, and a cellular automata model for the time span extending from 1995 to 2006. Initially, an orthophoto mosaic at a 1:10 000 scale was used for generating a cadastral map of the analyzed town. Information on land use was directly vectorized over this cadastral map based on the available local zoning regulations. The methodological procedures for modeling land use change were twofold: i) the first one referring to the pre-processing of data used to drive the dynamic modeling platform (Dinamica EGO), and ii) the second one consisting of the modeling experiment itself, comprising exploratory analysis, parameterization, calibration, simulation, and validation. This work presents preliminary results on the generated land use change simulations executed for the given time period. The achieved results demonstrate the suitability of the employed methodology for simulating processes of land use change both at the intra-urban level as well as in the surroundings of the town under analysis. It should be highlighted the crucial importance of the selection of land use change drivers for the full success of the model.

**Palavras-chave:** spatial dynamic modeling, land use change, Rio Claro city (SP), Dinamica EGO, modelagem dinâmica espacial, mudanças no uso da terra, Rio Claro, Dinamica EGO.

### 1. Introdução

O crescimento urbano, processo de conotação espacial com dimensão temporal, ocorre quando as cidades requerem novos espaços para ampliação, decorrentes do crescimento populacional, ou por deterioração de áreas já ocupadas possuindo funções residenciais e serviços, ou ainda pela reorganização funcional de setores centrais da cidade e incorporação de novas áreas além do atual perímetro.

Com a finalidade de ordenar racionalmente a ocupação desses espaços, é necessário que exista um planejamento para o uso e ocupação do solo, com informações sobre a tendência do crescimento urbano e o padrão da ocupação, bem como sobre as características ambientais e os diferentes fatores e/ou agentes envolvidos.

Para a gestão dessas áreas do ponto de vista da sustentabilidade socioambiental, é necessária a aquisição e disponibilização de dados em lapso de tempo compatível com a dinâmica das alterações que ocorrem no espaço urbanizado. Neste contexto, destacam-se as técnicas de sensoriamento remoto, que permitem não somente levantar dados de elementos do fato urbano, mas também caracterizar a espacialização das alterações ocorridas, possibilitando desta forma subsidiar o planejamento e a tomada de decisões em nível local.

Outro recurso também disponível, útil para a análise de áreas urbanas, refere-se ao geoprocessamento, tecnologia interdisciplinar destinada a representar e tratar dados espacialmente referenciados em ambiente computacional (Câmara e Monteiro, 2001), notoriamente em sistemas de informações geográficas (SIG).

A associação das tecnologias de sensoriamento remoto e geoprocessamento a modelos dinâmicos espaciais aplicados à análise urbana permitem avaliar de forma quantitativa a estruturação e a dinâmica do espaço urbano, proporcionando uma melhor visualização da realidade urbana e dos elementos responsáveis pelas suas transformações espaço-temporais.

Portanto, os modelos podem ser empregados na descrição, análise e previsão de eventos. Estes descrevem o comportamento da realidade, contidos nos dados observados, podendo ser utilizados na previsão de mudanças que ocorrem sob certas circunstâncias. Estabelecem também teorias e hipóteses sobre o futuro, suscetíveis de verificação, do mesmo modo que se verificam hipóteses que agora pertencem ao passado.

Neste âmbito, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar as mudanças no uso da terra da cidade de Rio Claro (SP), com o suporte das técnicas de sensoriamento remoto, SIG e modelos de autômatos celulares para o período de 1995 e 2006. Neste trabalho, são apresentados resultados parciais relativos aos procedimentos metodológicos executados para o período de tempo considerado.

A cidade de Rio Claro (SP), com porte médio e de considerável importância agro-industrial no interior paulista, foi selecionada para análise por possuir importante acervo de documentos cartográficos e levantamentos aerofotogramétricos de diferentes períodos, indicando a possibilidade de realização desta proposta de trabalho, em conformidade com seus objetivos.

O município de Rio Claro localiza-se na porção centro-leste do estado de São Paulo (Figura 1). Sua sede, estabelecida em sítio de relevo predominantemente plano, está situada a uma altitude média de 613 m e abriga uma população de 185.131 habitantes, segundo Censo 2005 da Fundação SEADE. A economia local está atualmente vinculada à agricultura da cana-de-açúcar e ao setor industrial de transformação, em que se sobressai a cerâmica de acabamento, fazendo de Rio Claro um importante pólo de produção nacional no setor.

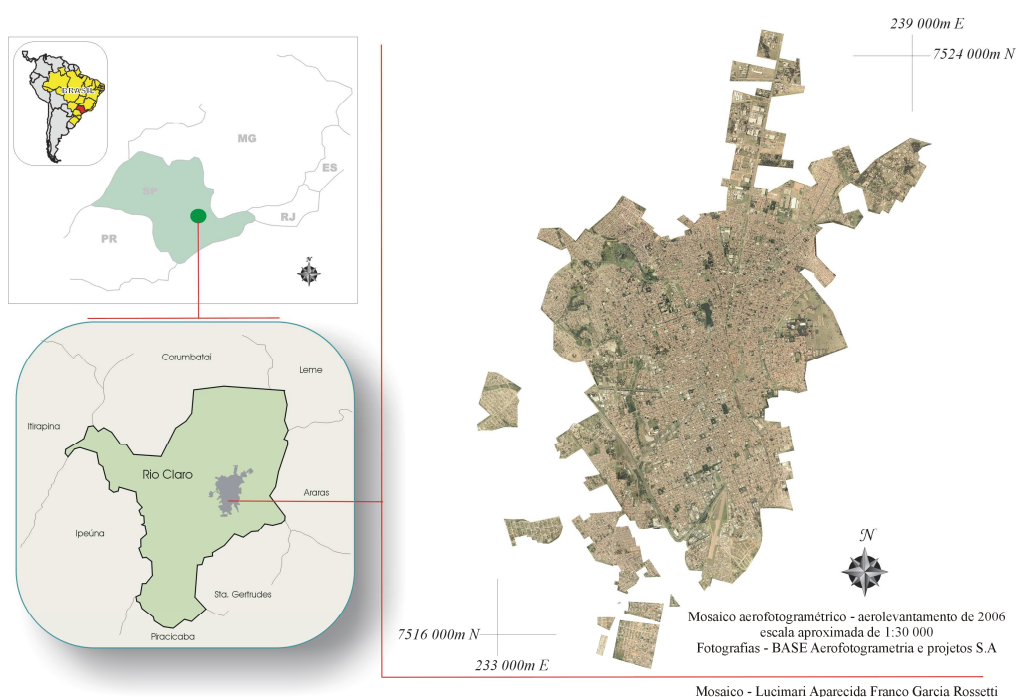


Figura 1. Localização da área de estudo

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1 Pré-Processamento dos Dados**

Inicialmente, foi realizada a edição da planta cadastral de Rio Claro de 1988, atualizada em 2000, com o aplicativo CAD *Autodesk Map 2007*. A partir das imagens aerofotogramétricas de 1995 (1:25.000) e 2006 (1:30.000), a malha urbana foi reconstituída com ajustes dos dados planimétricos relativos às quadras, sistema viário e hidrografia, correspondentes aos instantes de tempo selecionados.

Na seqüência, foram vetorizados os mapas de uso da terra inicial e final, com a utilização do programa *Autodesk Map*. Para esse mapeamento, foram definidas 13 classes de uso, que compreenderam a área urbana e seu entorno: residencial, industrial, institucional, áreas verdes, loteamento recreio, mista (comércio e serviços), comercial, mineração, campo, cana, mata, reflorestamento, corpo d'água. Também, foram vetorizadas as variáveis que explicam a dinâmica das ocorrências de mudanças do uso da terra, sendo estas correspondentes ao uso da terra inicial (1995), compreendendo 13 variáveis em termos de distâncias em relação a: corredores comerciais, condomínios, conjuntos habitacionais, rodovias, ferrovias, áreas institucionais, escolas, ensino superior, sistema viário pista dupla, sistema viário pista simples, pronto socorro, unidades básicas de saúde (UBS)/unidades de saúde familiar (USF), áreas verdes.

Os programas *Autodesk Map* e *SPRING* foram utilizados para a elaboração dos mapas de uso da terra e dos mapas de distâncias, além do *IDRISI* e *Ermapper* para a conversão dos formatos, em função da compatibilidade entre as plataformas.

### **2.2 Modelagem de Mudanças no Uso da Terra na Plataforma Dinamica EGO**

Após o pré-processamento dos dados, foi utilizada a plataforma Dinamica EGO para a realização da modelagem de mudanças no uso da terra para o período de 1995 e 2006.

O desenvolvimento da modelagem compreendeu as etapas de parametrização, calibração, simulação e validação. Segundo Almeida (2004), a parametrização consiste no conjunto de métodos ou rotinas para conferir pesos às variáveis de entrada e determinar as taxas de transição; a calibração, por sua vez, refere-se ao procedimento iterativo de ajuste de parâmetros através da contínua comparação entre a cena real e a simulada, visando à aproximação da cena simulada à real, e por fim, a validação refere-se ao emprego de métodos estatísticos para avaliar o grau de conformidade entre a cena real e a cena simulada, comumente normalizado de 0 a 1.

#### **2.2.1 Parametrização do modelo**

Na parametrização do modelo, foram realizados procedimentos para a geração das matrizes de transição, cálculo das faixas de discretização das variáveis contínuas e cálculo dos pesos de evidência.

A matriz de transição global, a qual considera uma única taxa de transição para o período de tempo analisado, foi obtida por tabulação cruzada entre os mapas de uso inicial (1995) e final (2006). Essa mesma matriz foi submetida a transformações algébricas segundo o método proposto por Bell e Hinojosa (1977), que considera o produto entre o auto-vetor da matriz global, o auto-valor da mesma elevado a  $1/n$  (em que  $n$  é o número de passos anuais) e a matriz inversa do auto-vetor. Como resultado, obteve-se a matriz de transição anual, a qual considera 11 passos de tempo, com a duração de um ano cada um.

Para o cálculo das faixas de discretização das variáveis contínuas, a plataforma Dinamica EGO utiliza o método de generalização de linhas proposto por Agterberg e

Bonham-Carter (1990). Por fim, os pesos das variáveis são estabelecidos pelo método de pesos de evidência, inteiramente baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, o qual pressupõe independência espacial entre variáveis. A seleção das variáveis é realizada de forma empírica e depende do conhecimento do modelador em relacioná-las com as respectivas transições ocorridas.

### 2.2.2 Calibração do Modelo

Nos procedimentos de calibração do modelo, verificou-se, a princípio, a associação ou dependência espacial entre pares de variáveis selecionadas para explicar uma mesma transição. Para isto, foram utilizados os índices de *Cramer (V)* e o de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty - JIU*). Conforme Bonham-Carter (1994), se os valores de *V* ou *JIU* situam-se acima de 0,50, isto indica mais associação espacial do que menos, e assim, uma das variáveis deve ser eliminada, ou então, ambas as variáveis devem ser combinadas em um único plano de informação, a fim de se evitar o enviesamento do modelo por redundância de informações.

Incluem-se igualmente na etapa de calibração do modelo a definição, por meio de ajustes iterativos, dos percentuais das funções de transição (*expander* e *patcher*) e os parâmetros internos para a caracterização morfológica das manchas de paisagens nas simulações.

A função *expander* responde pela expansão das manchas pré-existentes de uma dada classe de uso ou cobertura da terra, e a função *patcher* (formador de manchas) se destina a gerar novas manchas de uma dada classe em meio à paisagem. A definição dos percentuais das funções *expander* e *patcher* é feita de forma heurística pelo modelador, o qual insere o percentual de *expander* individualmente para cada transição em uma interface específica da plataforma Dinâmica EGO.

Na caracterização morfológica da paisagem nas simulações, os tamanhos das novas manchas geradas pelo *patcher* e franjas de expansão produzida pelo *expander* são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade lognormal, determinada em função do tamanho médio e variância de cada tipo de mancha e franja de expansão a ser gerada (Soares-Filho et al., 2002). Para a definição das novas manchas a serem geradas por *expander* e *patcher*, deve-se estabelecer o tamanho médio, a variância de tamanho e o índice de isometria para cada transição de classes. Este índice representa um valor numérico, o qual é multiplicado pelo valor de probabilidade das oito células da janela de vizinhança 3 x 3, utilizada pelos algoritmos *expander* e *patcher*, antes da aplicação da regra de transição. Quanto mais elevado é o valor do índice, mais compactas serão as manchas produzidas pelas funções de transição, e, de forma oposta, quanto mais próximo de zero, mais fragmentadas serão as manchas (Almeida et al., 2008). Neste experimento, foi adotado um índice de isometria no valor de 1,5, o que caracteriza um equilíbrio entre compactidade e fragmentação das mesmas.

### 2.2.3 Simulação do Modelo

Para a execução das simulações anuais de mudanças no uso da terra, foram utilizados o mapa de uso inicial (1995), o conjunto ou cubo de variáveis estáticas (que são aquelas não sofrem alteração durante a execução das simulações), a matriz de transição anual e os pesos de evidência. Foi informado ao modelo o número de 11 passos, correspondentes aos 11 anos decorridos entre o tempo inicial (1995) e final (2006) do período de simulação. Como saídas, são produzidos 11 mapas de paisagem ou de uso da terra, bem como mapas de probabilidades para cada uma das transições, indicando as células com maior propensão a mudanças.

Nas simulações, foram introduzidas as chamadas variáveis dinâmicas, representadas pelas distâncias às classes de uso da terra, as quais sofrem alterações a cada iteração, sendo continuamente atualizadas e influenciando assim o cálculo das probabilidades de transição no próximo passo de tempo. Portanto, a cada iteração, ocorrem mudanças no estado (uso da terra) das células, mudando a distância a esses usos estimados a partir de outras células. As mudanças das células que ocorrem nas sucessivas iterações impactam a configuração espacial do mapa final de uso da terra. O mapa simulado deve aproximar-se o máximo possível do mapa de uso final real. Caso a simulação gerada não seja satisfatória, procede-se iterativamente a ajustes dos parâmetros internos do modelo e a novas execuções de simulação, até que se obtenha um resultado a contento.

### 2.2.4 Validação do Modelo

As saídas de modelos dinâmicos espaciais devem submeter-se a uma avaliação de ajuste espacial dentro de um contexto de vizinhança, uma vez que os mapas de uso final real e simulado não podem ser comparados em nível de pixel, mas devem ser analisados em termos de correspondência de padrões espaciais dentro de uma vizinhança de pixels. O procedimento de validação na plataforma Dinamica EGO é baseado no método de similaridade *fuzzy* criado por Hagen (2003), o qual inclui o *Kfuzzy*, considerado equivalente ao método estatístico *Kappa*, e a similaridade *fuzzy*, que verifica a localização e a categoria dentro da vizinhança da célula considerada.

O método de Hagen (2003), empregado neste trabalho, baseia-se no conceito de “*fuzziness of location*” (dubiedade de localização), no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma, e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança. Sem levar em conta a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança “*fuzzy neighborhood*” pode representar a dubiedade de localização.

Para a execução da validação espacial, foram utilizados o mapa de uso inicial e final real, bem como o mapa de uso simulado. A similaridade é avaliada com base em uma adaptação do método de Hagen, desenvolvida pela equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG), que considera dois mapas-diferença resultantes da: i) subtração do mapa de uso final real e de uso inicial, e ii) subtração do mapa de uso final simulado e de uso inicial. Realizado o processo de validação e com base nos índices de similaridade gerados, pode-se definir se o modelo é adequado para a simulação de prognósticos.

## 3. Resultados e Discussão

Conforme exposto anteriormente na Seção 3.2.1, a tabulação cruzada entre os mapas inicial e final de uso da terra (Figuras 2a e 2b) resultaram na matriz de transição global. Essa matriz foi submetida a manipulações algébricas com base nos seus autovalores e auto-vetores, resultando na matriz de transição anual (Tabela 1), efetivamente usada na simulação do modelo.

Na seqüência, foram calculados os intervalos (*ranges*) de distância para cada uma das variáveis contínuas, a fim de discretizá-las. A execução desse modelo gerou um arquivo texto (*skeleton.dcf*), contendo os intervalos correspondentes às faixas de distâncias mais favoráveis para as respectivas transições. Em seguida, procedeu-se à etapa de cálculo dos pesos de evidência, em que se produziu como saída um arquivo texto (*weights.dcf*), contendo os pesos para todos os intervalos de cada uma das variáveis contínuas discretizadas e para cada transição de uso individualmente.

Por sua vez, para a calibração do modelo, foram realizados ajustes de parâmetros através da comparação entre a cena real e simulada, visando à aproximação da cena simulada à real.

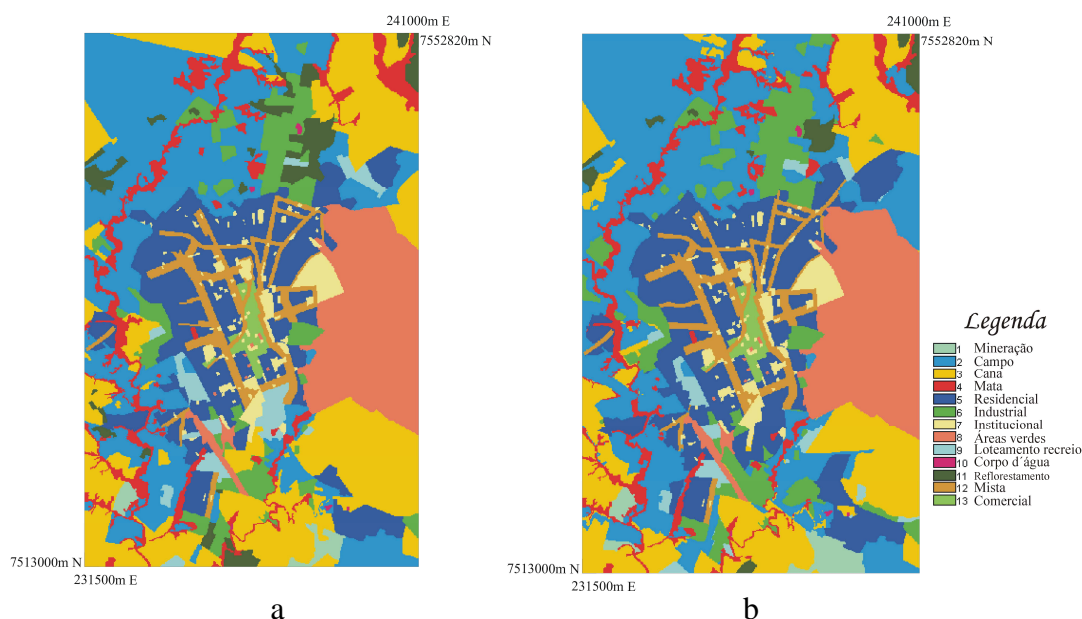


Figura 2. a) Mapa de uso da terra em Rio Claro (1995). b) Mapa de uso da terra em Rio Claro (2006).

Tabela 1. Taxas Anuais de Transição do Uso da Terra em Rio Claro (1995 a 2006).

Categorias de Transição do Uso da Terra em Rio Claro	Notação (Classe de Origem - Classe de Destino)	Transição (%)
Campo para Mineração	2 - 1	0,16
Campo para Cana	2 - 3	0,27
Campo para Uso Residencial	2 - 5	0,34
Campo para Uso Industrial	2 - 6	0,35
Cana para Mineração	3 - 1	0,08
Cana para Campo	3 - 2	2,30
Cana para Uso Residencial	3 - 5	0,23
Cana para Uso Industrial	3 - 6	0,25
Cana para Loteamento de Recreio	3 - 9	0,16
Mata para Campo	4 - 2	1,12
Uso Residencial para Uso Misto	5 - 12	0,18
Loteamento de Recreio para Uso Residencial	9 - 5	5,06
Reflorestamento para Campo	11 - 2	2,64
Reflorestamento para Cana	11 - 3	2,42
Reflorestamento para Mata	11 - 4	1,72
Reflorestamento para Uso Industrial	11 - 6	0,94
Reflorestamento para Loteamento de Recreio	11 - 9	0,46

Após o cálculo das faixas de distâncias e dos pesos de evidência, verificou-se a associação ou dependência espacial entre as variáveis pertencentes a uma mesma transição, sendo gerado um arquivo texto (*log.txt*), o qual contém para cada transição todas as combinações possíveis entre pares de variáveis e os respectivos valores de *V* e *JIU*. A Tabela 2 mostra exemplos de transições que apresentaram valores de *Joint Information Uncertainty (JIU)* acima de 0,50.

Tabela 2. Exemplos de transições que apresentaram os valores de *JIU* acima de 0,50.

Transições	Primeira Variável	Segunda Variável	<i>JIU</i>
Transição 2 - 1	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,703775
Transição 2 - 3	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,719775
Transição 2 - 6	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,585468
Transição 3 - 1	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,670004
Transição 3 - 5	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,671894
Transição 3 - 6	distance/distance_to_7	static_var/distinstitucionais	0,556972
Transição 3 - 9	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,668539
	distance/distance_to_7	static_var/distinstitucionais	0,583055
Transição 4 - 2	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,548968
Transição 5 - 12	distance/distance_to_7	static_var/distinstitucionais	0,61418
Transição 9 - 5	distance/distance_to_7	static_var/distinstitucionais	0,543133
Transição 11 - 2	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,784218
Transição 11 - 4	distance/distance_to_12	static_var/distcads	0,708178
Transição 11 - 6	distance/distance_to_7	static_var/distinstitucionais	0,636443

\* distance\_to\_7 = distâncias ao uso institucional

\* distance\_to\_12 = distâncias ao uso misto

\* distcads = distâncias a corredores comerciais e de serviços

\* distinstitucionais = distâncias ao uso institucional

Após a execução do modelo, foram produzidos mapas anuais de simulação do uso da terra em Rio Claro. As Figuras 3a e 3b apresentam, respectivamente, o mapa real de uso da terra e mapa simulado de uso da terra, ambos para 2006.

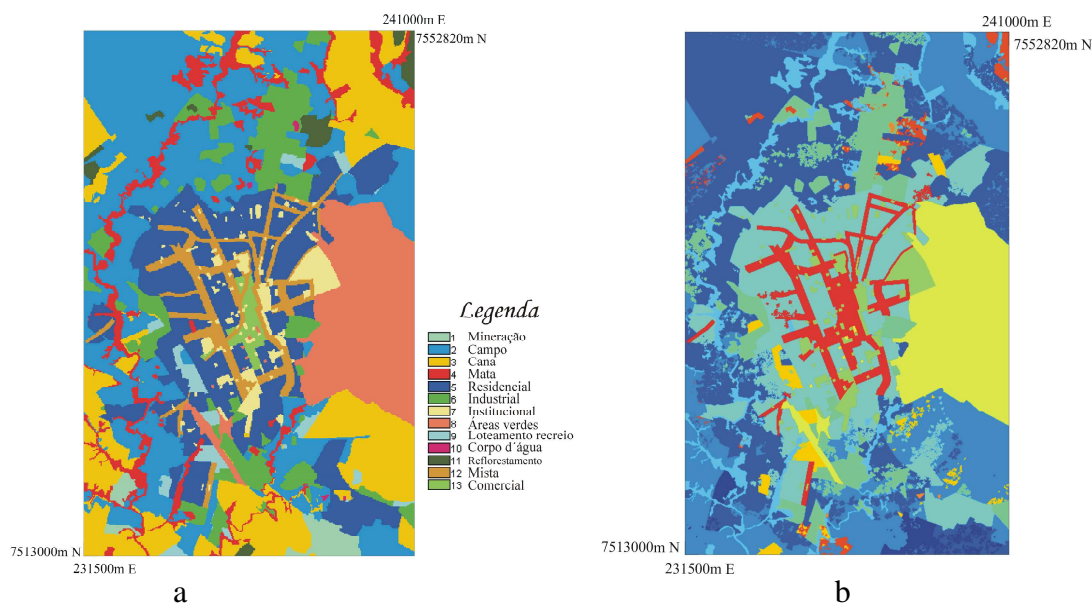


Figura 3. a) Mapa real de uso da terra em Rio Claro (2006). b) Mapa simulado de uso da terra em Rio Claro (2006).

#### 4. Conclusões

Em vista da análise preliminar dos resultados, verificou-se que os dados de simulação para o cenário de 2006 apresentaram boa aproximação quando comparados com os dados mapeados. Deve-se enfatizar a importância na seleção e definição das variáveis que determinam as ocorrências das mudanças no uso da terra e na expansão urbana.

Apesar de os modelos serem a representação simplificada das relações complexas do mundo real e apresentarem suas características e/ou relações sob forma generalizada,



eles permitem a extração de informações de interesse acerca do fenômeno ou sistema em análise, bem como o conhecimento de sua estrutura. Modelos conceituais e matemáticos têm sido utilizados para compreender o uso da terra e suas mudanças, possibilitando o conhecimento dos fatores que determinam os padrões a elas associados.

A aplicação das técnicas de modelagem para a avaliação da dinâmica do uso da terra em áreas urbanas possibilita a identificação dos principais vetores para a expansão da área urbanizada (Almeida, 2004). Os modelos permitem ao poder público local ordenar e redirecionar o crescimento urbano, viabilizando uma infra-estrutura adequada, bem como fornecer prognósticos da expansão urbana para estabelecer metas para investimentos em infra-estrutura e equipamentos sociais (Almeida, 2004).

Neste sentido, os resultados deste trabalho poderão fornecer subsídios à elaboração de Planos Diretores Municipais e à gestão de órgãos públicos, além de diretrizes para planos setoriais na escala intra-urbana visando, entre outras metas: i) elaborar projetos para a implantação e gestão de áreas verdes (áreas vegetadas), de acordo com as especificidades de cada cidade, conforme suas necessidades de quantidade, dimensão e distribuição; ii) controle de escoamento superficial das águas pluviais, minimizando processos de erosão, riscos de inundação e assoreamentos de corpos d'água; iii) conservar áreas vegetadas, com dimensão significativa, nas proximidades das periferias urbanas (franjas urbanas), com a finalidade de implantar futuras áreas de lazer, recreação e conservação/preservação; iv) auxiliar na indicação de vetores de expansão urbana, considerando os aspectos do meio físico, minimizando os impactos ambientais, e, por fim, v) fornecer subsídios a trabalhos de atualização de Plano Diretor Municipal, em seu segmento "área urbana".

## Referências Bibliográficas

Agterberg, F. P.; Bonham-Carter, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events. In: International Symposium APCOM, 22., 1990, Berlin.

**Proceedings...** Berlin: Technical University of Berlin, 1990. Artigos, p. 381-395. CD-ROM.

Almeida, C.M. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso do solo em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2004. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

Almeida, C. M.; Gleriani, J. M.; Castejon, E. F.; Soares-Filho, B. S. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics, **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 9, p. 943-963, 2008.

Bell, E. J.; Hinojosa, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**, v. 11, n. 6, p. 13-17, 1977.

Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.

Câmara, G.; Monteiro, A. M. V. Conceitos Básicos da Ciência da Geoinformação. In: Câmara, G.; Davies, C., et al. (Org.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

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.

Soares-Filho, B. S.; Cerqueira, G. C.; Pennachin, C. L. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217-235, 2002.