



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N<sup>o</sup> 65/3: 417-429  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **ESTUDO DA MUDANÇA DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA DO RIO FORMIGA – MG**

*Application of a Model for the Land Use and Land Cover Change Study  
in Formiga River Basin - MG*

**Alerson Falieri Suarez<sup>1</sup> & Britaldo Silveira Soares Filho<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**  
**Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - CTG**  
Caixa Postal 7800 – CEP: 50711-970 – Recife – PE, Brasil  
alerson.falieri@gmail.com

**<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG**  
**Departamento de Cartografia, Centro de Sensoriamento Remoto**  
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, 31270-900  
britaldo@csr.ufmg.br

*Recebido em 02 de dezembro, 2011/ Aceito em 15 de março, 2012*  
*Received on december 02, 2011/ Accepted on march 15, 2012*

### **RESUMO**

Os processos antrópicos e naturais, associados ao fenômeno da dinâmica de mudança no uso e cobertura do solo, alteram a paisagem local e têm reflexos globais. Na maior parte das vezes, afeta negativamente os ecossistemas e a biodiversidade, causando possíveis impactos climáticos e influenciando alterações no balanço hídrico e energético da Terra. A detecção das mudanças no uso e cobertura do solo elucidam o complexo conjunto de forças socioeconômicas e biofísicas que a impulsiona. A Bacia do Rio Formiga, colaboradora da manutenção hídrica da Represa de Furnas, localizada na Região Oeste de Minas Gerais, constata estes processos antrópicos e é afetada com o fenômeno da dinâmica de mudança no uso e cobertura do solo. Este estudo objetiva, através de técnicas da modelagem ambiental, a aplicação e calibração de um modelo de uso do solo na Bacia do Rio Formiga para avaliações do espaço geográfico e da paisagem em relação ao cenário real observado em 2002 e o cenário simulado para a mesma data. São constatadas algumas métricas de validação do modelo, assim como uma comparação visual dos resultados obtidos.

**Palavras chaves:** Modelo de Simulação Espacial, Modelagem de Sistemas Ambientais, Modelo de Uso e Cobertura do Solo.

### **ABSTRACT**

The anthropic and natural process in association with the land use and land cover change system dynamic, change the local landscape and has global consequences. In most cases, it causes negative impacts on ecosystems and on the biodiversity, leading possible climate impacts and influencing changes in water and energy balance of Earth. Detection of land use and land cover change elucidates the complex set of socioeconomic and biophysical forces that drive Minas Gerais, notes these anthropogenic processes and it is affected by the land use and land cover change system dynamic.

This paper aims techniques through the application of environmental modeling and calibration of a model of land use in Formiga River Basin for assessments of geographic space and landscape in relation to the real scenario observed in 2002 and the simulated scenario for the same date. Some metrics for validating the model are found as well as a visual comparison of the results.

**Keywords:** Spatial Simulation Model, Environmental Modeling, Land Use and Change Models.

## 1. INTRODUÇÃO

A detecção e acuidade das mudanças de uso e cobertura do solo podem proporcionar um melhor entendimento das interações entre os fenômenos naturais e humanos (BAKR *et al.*, 2010), assim como, auxiliar ou compor os estudos e modelos climáticos. A aplicação dos modelos de mudança de uso e cobertura da terra tem sido usada como ferramenta no planejamento e tomada de decisões. Consegue elucidar o complexo conjunto de forças socioeconômicas e biofísicas que influenciam o padrão espacial das taxas de mudanças e os impactos das mesmas, podendo ainda estimar impactos futuros frente a diferentes tipos de cenários (VERBURG *et al.*, 2004).

Alguns fenômenos espaciais, como a dinâmica urbana, o escoamento de água da chuva, os modelos climáticos e as mudanças de uso e cobertura do solo, não são fenômenos espaciais estáticos, mas sim dinâmicos. Por esta especificidade, o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente os fenômenos espaço-temporais, é um grande desafio para a Ciência da Geoinformação (CÂMARA e MONTEIRO, 2003).

A Cartografia é a ciência responsável pela representação do espaço físico temporal e possibilita o desenvolvimento de técnicas e abstrações capazes de representá-los. Geralmente, esta representação é realizada através da elaboração de documentos cartográficos formados por Bases de Dados Espaciais. Requer a seleção prévia e definição dos objetos que irão compor tal representação, assim como a simplificação dos dados espaciais e generalizações cartográficas componentes da mesma. (CORREIA e SÁ, 2010).

Parte deste desafio é superada quando se abstrai os fenômenos espaciais em sistemas ambientais e a modelagem é utilizada como instrumento metodológico (CHRISTOFOLETTI, 1999). Para Haigh “um sistema é uma totalidade que é criada pela integração de um conjunto estruturado de partes componentes, cujas interrelações estruturais e funcionais criam uma

inteireza que não se encontra implicada por aquelas partes componentes quando desagregadas” (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Para Soares-Filho (1998) quando alcançado um grau de generalização satisfatório e ocorra a seleção dos aspectos relevantes, os quais se desejam observar, torna-se importante para análises, correlações e comportamentos de variáveis ambientais, possibilitando diferentes leituras, adequadas às especificidades ambientais. Por sua sistematização, os modelos cartográficos e os modelos de simulação espacial têm seu valor científico, pois podem ser reproduzidos.

Hipoteticamente a dinâmica de uso e ocupação do solo vem historicamente transformando a paisagem na Bacia do Rio Formiga - MG. A supressão da vegetação nativa do Cerrado é transformada em outros tipos de uso como a agricultura, a pecuária e o avanço da urbanização. Este trabalho objetiva a aplicação de um modelo de simulação espacial e a comparação de uma realidade observada para o ano de 2002 e uma simulação da paisagem para o mesmo ano (2002), utilizando a classificação de imagens fornecidas e autorizadas pelos autores do estudo “Análise da redução do índice de qualidade de água (IQA) utilizando ambientes de Geoprocessamento” (TIMBÓ *et al.*, 2005).

## 2. MODELOS DE SIMULAÇÃO AMBIENTAL E MODELAGEM DO USO E COBERTURA DO SOLO

Os modelos de simulação espacial ou modelos de simulação ambiental auxiliam o entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento dos sistemas ambientais (RODRIGUES *et al.*, 2007). Os modelos de simulação espacial têm sido usados para avaliações de complexas questões ambientais e tem atraído a atenção de pesquisadores de diferentes áreas do saber como: modelos de simulação para estimar os impactos e trajetórias futuras de desmatamento relativos às emissões de gases do efeito (SOARES-

FILHO *et al.*, 2006), regeneração florestal no mediterrâneo (GERI *et al.*, 2011), expansão agrícola do Quênia (MAEDA *et al.*, 2010), modelagem da dinâmica de ocupação do solo em um bairro de Belo Horizonte – MG – Brasil (GODOY, 2004), Redução de Emissões de Carbono do Desmatamento em áreas protegidas (SOARES-FILHO *et al.*, 2008; 2010), dentre outros.

Os modelos dinâmicos têm a função de realizar simulações matemáticas de processos, identificados no mundo real, onde se observa a mudança de variáveis, em consequência a variações de suas forças direcionadas (BURROUGH, 1998).

Modelos dinâmicos de simulação ambiental de mudança de uso e cobertura do solo (*Land Use and Land Cover Change – LUCC*) são usados com a finalidade de detectar, prever e simular as mudanças futuras nas categorias de uso e cobertura (SOARES-FILHO *et al.*, 2006) ou tentar visualizar as mudanças de uso da terra em períodos anteriores, carentes de representação de mapas específicos (GERI *et al.*, 2011).

Algumas características são importantes no processo de modelagem de mudança de uso e cobertura da terra: a) nível de análise, b) múltiplas escalas, c) forças motrizes, d) interação espacial e os efeitos de vizinhança, e) dinâmica temporal e f) nível de integração (VERBURG *et al.*, 2004).

Os efeitos da mudança do uso e cobertura do solo são observáveis, por exemplo, quando uma área de floresta primária se transforma em uma fazenda. A biodiversidade é reduzida drasticamente. Uma perda imediata e completa das espécies florestais dentro da área desmatada acontece (GERI *et al.*, 2011). Um dos agentes de mudança de uso e cobertura do solo é o desmatamento ou desflorestamento. Este processo desequilibra o ciclo do carbono, aumentando as taxas de CO<sub>2</sub> na atmosfera (LACERDA e NOBRE, 2010) e tem forte influência nas alterações do balanço energético e hídrico da Terra (GALVÍNCIO e MOURA, 2010). O desmatamento, assim como outras práticas, reflete em perda da biodiversidade ameaçando ecossistemas e segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) causam possíveis impactos climáticos (METZ *et al.*, 2007).

### **3. CARACTERIZAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

A área de estudo selecionada foi a Bacia do Rio Formiga – MG (Fig. 1), com 1.121 Km<sup>2</sup> de extensão, que é, por sua vez, componente da Bacia do Rio Grande. A Bacia do Rio Formiga é localizada no Sudeste do país, na Microrregião de Formiga e Mesorregião do Oeste de Minas, na Zona Campo das Vertentes, segundo a divisão geográfica do Estado. Está contida em sua maior parte no município de Formiga – MG. Outros municípios fazem parte da área do estudo e também da bacia, os municípios de Arcos, Córrego Fundo, Itapeçerica, Pains e Pedra do Indaiá (Fig. 1).

A escolha da área foi motivada por sua importância regional e também por ser um dos importantes colaboradores da manutenção hídrica da Represa de Furnas, em que uma porção da mesma faz parte desta bacia. A Represa é a maior extensão de água do Estado de Minas Gerais e um dos maiores lagos artificiais do mundo. Cobre uma superfície de 1.457,48 Km<sup>2</sup>.

A vegetação observada é a típica do Bioma Cerrado. O Relevo é predominantemente ondulado com presença de montanhas. Os minerais encontrados na região são principalmente calcário, areia, argila e granito. O clima é do tipo Cwa na classificação de Köppen, macro térmico, temperado chuvoso, subtropical com inverno seco. Com duas estações bem definidas, apresenta uma temperatura média anual entre 21 a 23 graus. O índice pluviométrico anual é de 1.400 mm.

De acordo com o Censo demográfico 2010 (IBGE, 2010) o município de Formiga, o qual a maior parte da bacia está inserida, tem uma população de 65.128 habitantes, sendo 91,5% considerada urbana. Segundo Timbó e Dutra (2005), parecido com muitas outras áreas do estado de MG, a região é bastante antropizada e é ocupada principalmente pela pecuária, indicando o uso intensivo da terra e muitas vezes sem a devida conservação ambiental e a sustentabilidade. A Fig. 2, apresenta uma visão da Bacia do Rio Formiga nos anos de a) 1995 e b) 2002 através de uma composição RGB-354 do sensor TM do Satélite Landsat – 7.

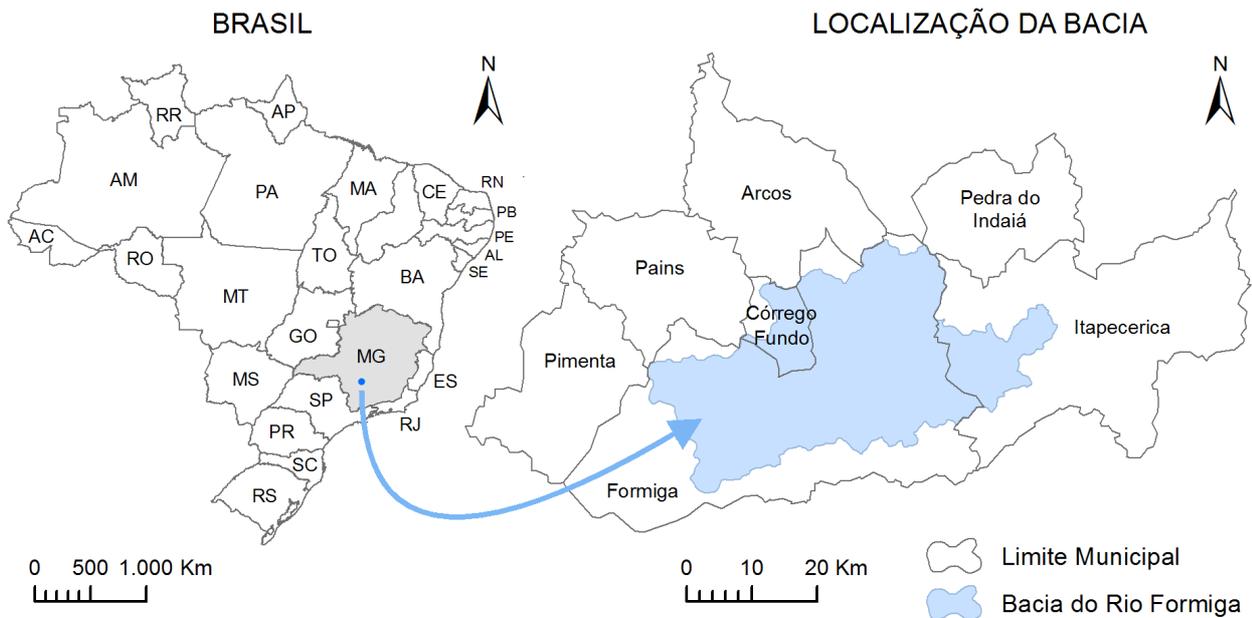


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos deste estudo foram utilizadas como base de dados, diferentes fontes disponíveis: alguns dos mapas temáticos produzidos no estudo “Análise da redução do índice de qualidade de água (IQA) utilizando ambientes de Geoprocessamento” (TIMBÓ, *et al.*, 2005) e bases do Projeto GeoMINAS (Geoprocessamento de Minas Gerais, 2005). O Projeto GeoMINAS existe desde 1995 e corrobora para a produção sistemática de informações digitais e geográficas georreferenciadas sobre o Estado de MG, disponibilizando informações primárias (políticas, econômicas, físicas, ambientais, e socioculturais) sobre vários aspectos do território geográfico. Atualmente o projeto parece estar desativado e seu sítio na internet não é mais acessível. A seguir apresenta-se uma sucinta descrição dos dados e materiais utilizados:

a) Mapas *raster* temáticos classificados a partir de imagens LANDSAT – 5 e 7, provenientes do estudo “Análise da redução do índice de qualidade de água (IQA) utilizando ambientes de Geoprocessamento” (TIMBÓ, *et al.*, 2005) para o ano de 1995. O mapa *raster* de áreas de preservação permanente também foi obtido do mesmo estudo.

b) Imagens de satélite LANDSAT – 5 e 7, bandas 3, 4 e 5, cenas de 1995 e 2002, dos dias 1/6 e 07/6 respectivamente, órbita 219, ponto 74,

compatíveis com as imagens classificadas, fornecidas pelo estudo acima mencionado.

c) Mapa pedológico, curvas de nível e pontos cotados, hidrografia, sedes municipais, localidades, distritos e estradas, georreferenciados da bacia do Rio Formiga, fornecido pelo GeoMINAS.

d) *Softwares*: DINAMICA v.2.4, *software* de modelagem, licença *freeware* para uso não comercial desenvolvido e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto – CSR da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. SPRING, plataforma de geoprocessamento, sob licença *Open Source*, desenvolvido pelo INPE, ArcMap v.9.0 e o ER Mapper 7.0, ambos *softwares* comerciais proprietários.

Não foi necessária homogeneização de referenciais, como conversões de projeção cartográfica ou sistema de coordenadas. As bases utilizam como referencial cartográfico o mesmo sistema de coordenadas projetadas UTM, Fuso 23 Sul, unidades métricas de trabalho e o mesmo referencial geodésico o datum *South America Datum 1969* (SAD69).

Inicialmente, os mapas temáticos classificados para o ano de 1995 e 2002 foram reclassificados, igualando o valor atribuído às classes para serem congruentes, facilitando as análises correlatas. As classes resultantes da reclassificação foram: Água, que compreende os lagos e parte da Represa de Furnas. Vegetação, que compreende a vegetação consolidada. Reflorestamento de áreas recém-

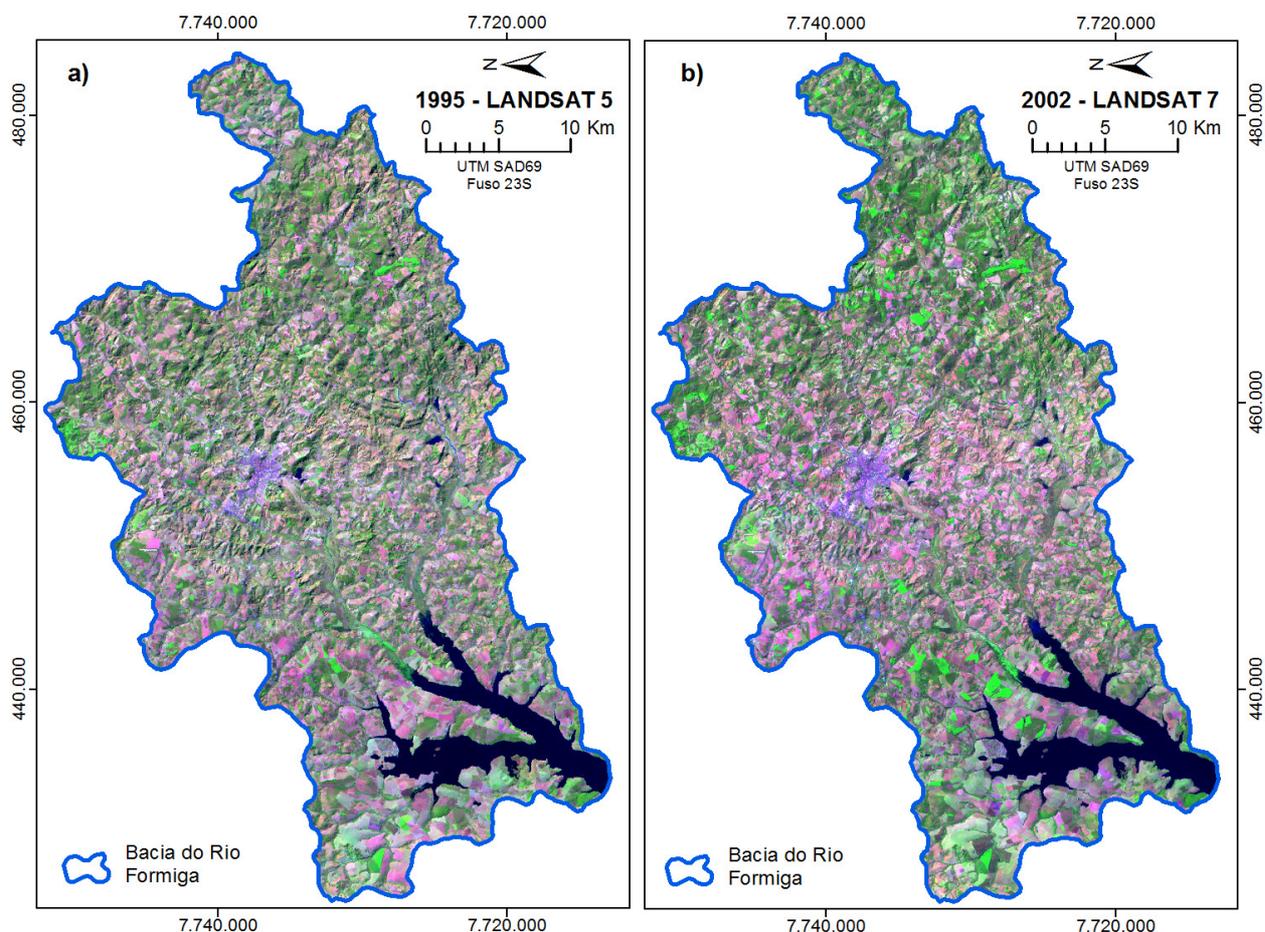


Fig. 2 - Recorte do limite da bacia do Rio Formiga sobre imagens do TM Landsat - 5 e 7.

cultivadas e vegetação não consolidada. Solo Exposto / Agricultura, as áreas de solo exposto e as áreas de finalidades agrícolas. Mancha Urbana que compreende a mancha urbana da cidade de Formiga. O resultado da reclassificação pode ser observado na Fig. 3, mapa a) 1995 e b) 2002.

Os dados de curvas de nível e pontos contados foram usados como base para gerar as informações *raster* de declividade e mapa hipsométrico. Por exigência da plataforma de modelagem, todos os elementos vetoriais foram “rasterizados”. Todos os dados *raster* foram processados para garantir o mesmo número de linhas e colunas, também uma exigência da plataforma. Às informações *raster*, foi atribuída uma resolução espacial de trinta metros quando “rasterizadas” e as preexistentes, neste formato, foram reamostradas também para esta resolução.

Através dos mapas classificados 1995 e 2002 foi gerado um mapa de permanência, que é um mapa das células inalteradas para o período. Por último foram gerados mapas de distâncias às

variáveis: estradas, hidrografia, sedes municipais e localidades, a fim de averiguar o comportamento da proximidade espacial das mesmas e seus efeitos na mudança do uso e cobertura do solo.

#### 4.1. O Software DINAMICA v. 2.4 e o modelo de mudança de uso do solo

O *software* DINAMICA foi concebido para simular a dinâmica da paisagem e incorpora processos de decisão baseados em modelos de uso do solo. É parametrizado a partir da abordagem maciça de dados derivados do Sensoriamento Remoto, inclui processos estocásticos de múltiplos passos de tempo com probabilidades espaciais, com características dinâmicas e ainda computa o efeito de vizinhança das células. O programa modela as mudanças na paisagem manipulando a região a ser simulada como uma matriz, na qual cada célula representa uma porção do terreno. É estabelecido um conjunto de estados possíveis, onde cada célula pode se encontrar durante determinado instante da simulação. O processo de mudança de estado é denominado transição.

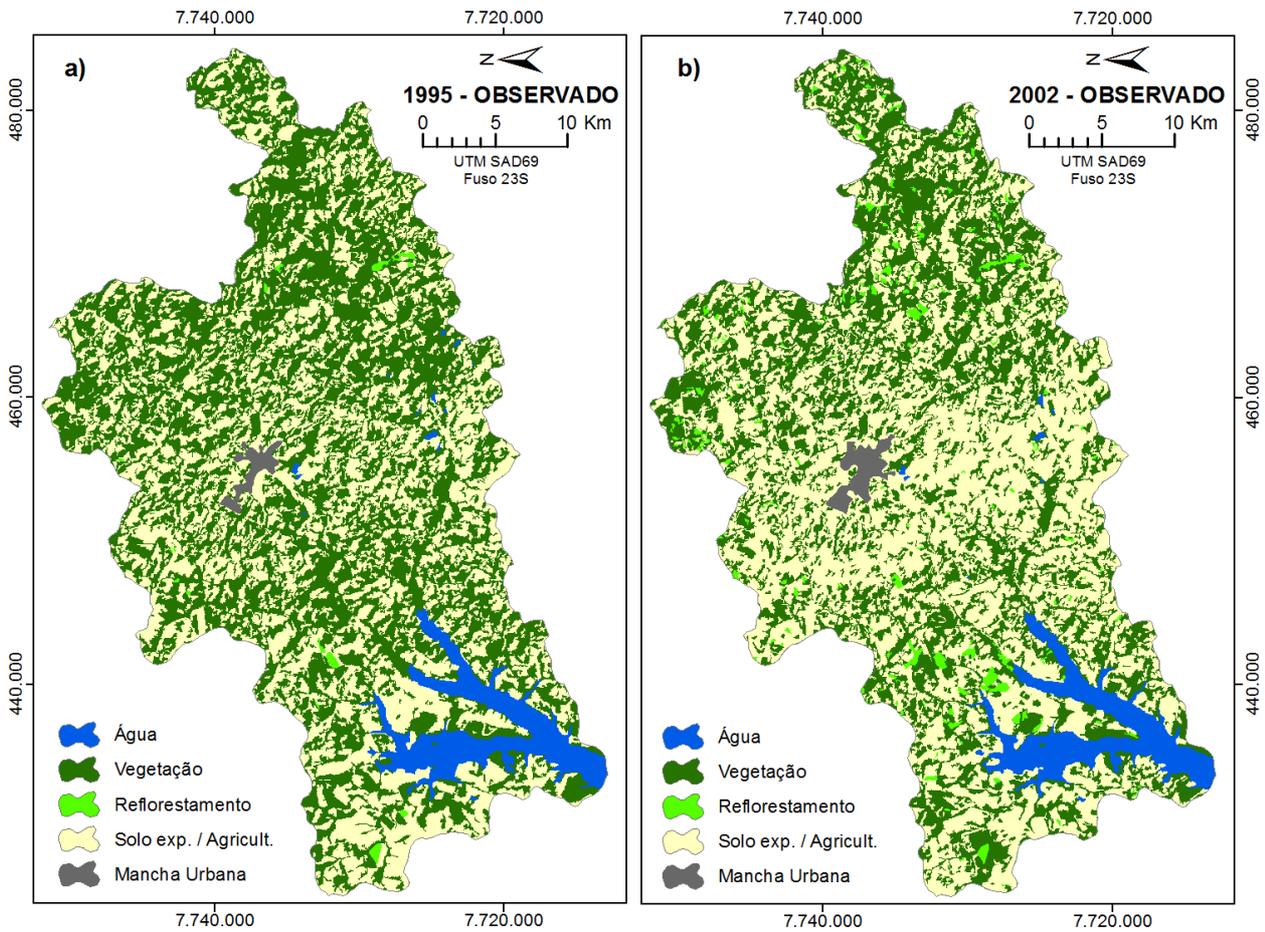


Fig. 3 - Mapas de uso do solo classificados do ano de 1995 e 2002.

A versão utilizada para este estudo (v.2.4), não se encontra mais disponível. Atualmente o *software* foi reestruturado e atualizado, se tornando uma plataforma de modelagem denominada de Dinamica EGO<sup>®</sup> - acrônimo para *Environment for Geoprocessing Objects* (ambiente para objetos de geoprocessamento), em duas versões, uma 32 bits e uma 64 bits, sendo que a versão 64 bits atual é a 1.6.2 continua sob licença *freeware* e foi desenvolvida como instrumento para investigação de trajetórias de paisagens e dinâmica de fenômenos espaciais. É uma plataforma genérica de modelagem de mudanças ambientais que vem sendo usada em vários estudos (RODRIGUES *et al.*, 2007).

A versão do *software* empregada neste estudo (v.2.4) usa como entrada de dados um conjunto de mapas direcionados. Possui algoritmos implementados e um modelo de mudança de uso do solo, sem flexibilidade, permitindo apenas a entrada (*inputs*) de dados predeterminados.

Um mapa de entrada ou mapa da paisagem inicial alimenta o *software*. Outros dados que alimentarão o *software* são: o mapa de tempo de permanência de cada célula em seu estado atual e

as variáveis cartográficas que podem ser divididas em estáticas e dinâmicas. Os mapas estáticos são as variáveis supostas de controle da configuração da mudança (Fig. 4). Estas variáveis são combinadas, através da definição de seus pesos de evidências, com o objetivo de gerar os mapas de transição, ou seja, a configuração da mudança (Soares-Filho *et al.*, 1998,2003). As variáveis dinâmicas são os resultados de cada passo do modelo utilizados para retroalimentação do mesmo.

Pesos de evidência é um método Bayesiano, probabilístico que representa a influência de cada

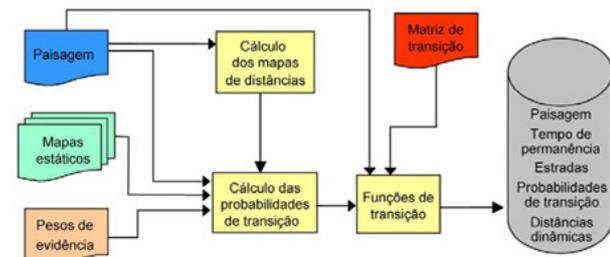


Fig. 4 - Módulos e fluxograma do modelo utilizado, *software* DINAMICA v.2.4.

categoria (faixa de valores) de certa variável nas probabilidades espaciais de uma transição  $i \rightarrow j$ , sendo calculado pelas equações (1) e (2). Com este método é possível identificar as variáveis mais importantes para a análise de mudança e quantificar os respectivos pesos para cada tipo de mudança.

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

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

onde:  $O\{D\}$  e  $O\{D/B\}$  são razões de chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento  $D$ , dado um padrão espacial  $B$ . A probabilidade *a posteriori* de uma transição  $i \rightarrow j$ , dado um conjunto de dados espaciais considerando que  $O\{D\}=1$ , pois esta já é passada ao modelo via matriz de transição, é expressa pela equação

$$P(i \Rightarrow j(x,y)/V) = \frac{e^{\sum_k W_k n_{i \Rightarrow j(V)xy}}}{1 + \sum_{ij} e^{\sum_k W_k n_{i \Rightarrow j(V)xy}}} \quad (3)$$

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

A calibração do modelo deve ser executada para que as simulações alcancem resultados satisfatórios. Este processo pode ser feito a partir da percepção da paisagem pelo pesquisador em conjunto com o conhecimento teórico e os reflexos nos mapas de resultados.

Com um pacote de ferramentas disponibilizado pelo DINAMICA, foram calculados, a matriz de transição e o peso de evidência das variáveis que farão parte do modelo. O programa possibilita configurações para calibração do modelo para que as configurações de mudança se tornem satisfatórias.

O modelo então foi aplicado diversas vezes, com diversas configurações, a fim de ajustar e calibrar o mesmo. Nesta etapa o software gera mapas de probabilidades e o mapa simulado, ou seja, os resultados do modelo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 5a apresenta um dos mapas resultantes da integração dos pesos de evidência, conforme a Equação (3), que assinalam as áreas mais favoráveis para cada tipo de mudança, podendo ser interpretados como mapas de probabilidades espaciais de transição.

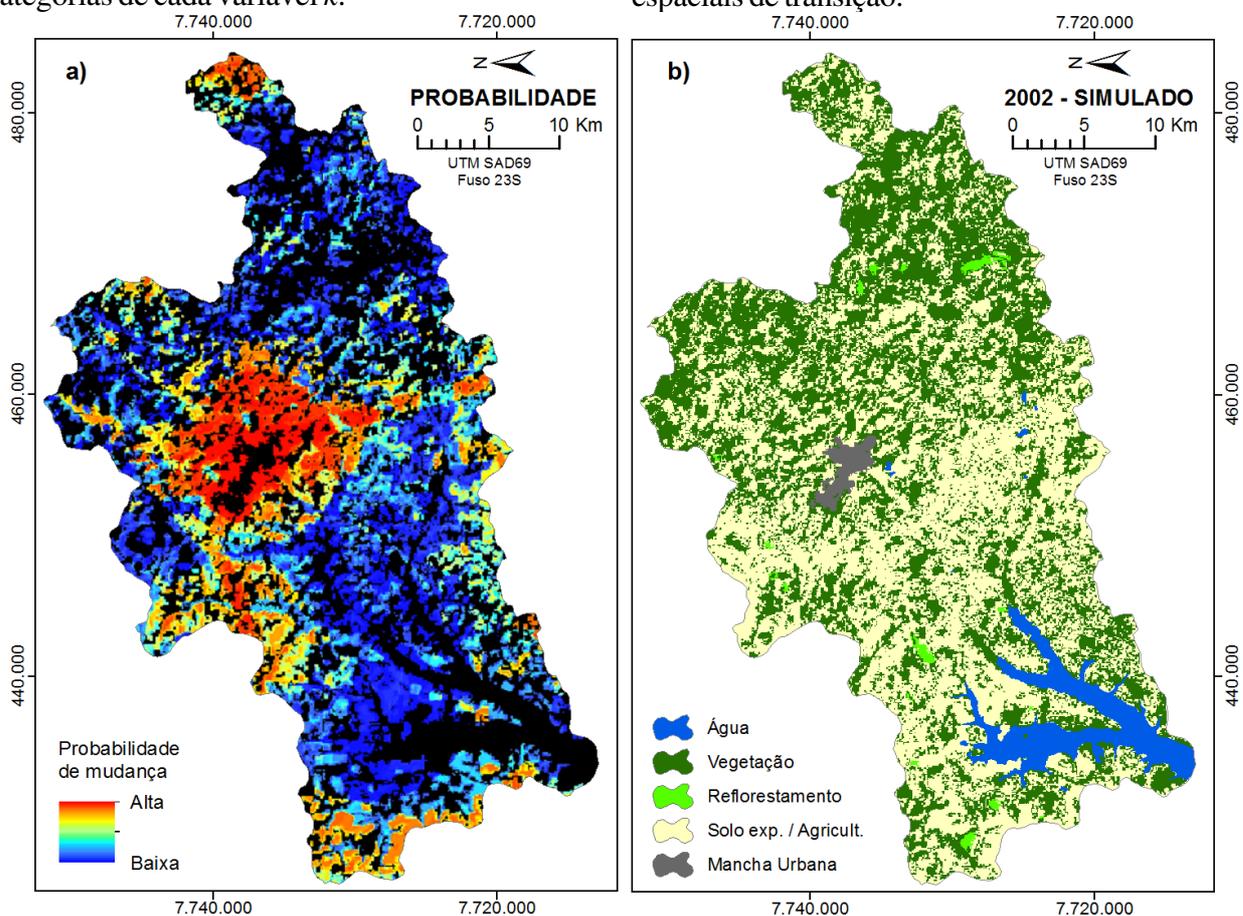


Fig. 5 – (a) Mapa de probabilidades de mudança e (b) mapa de uso do solo simulado de 2002.

Este mapa representa a probabilidade de ocorrer mudança da classe solo exposto / agricultura, para a classe mancha urbana, observando que: quanto mais próximo às cores quentes (vermelho), maior a probabilidade de ocorrer mudança e quanto mais próximo às cores frias (azul), o contrário. Foi gerada uma coleção de mapas, que mostra a relação de probabilidade de ocorrer mudança entre as classes.

Na Fig. 5b, observamos outro resultado do modelo: um mapa classificado, simulado para o ano de 2002, onde sobre os mapas de probabilidades, através do ordenamento e sorteio das células mais prováveis, alocou as quantidades desejadas de mudança, influenciadas pela vizinhança, tendendo a formar padrões espaciais com distinto arranjo no que tange ao tamanho, forma e orientação das manchas. A função de alocação das mudanças envolve algoritmos de interação da célula sorteada com as vizinhas pelo uso de técnicas de autômatos celulares descritas por Soares-Filho *et. al.*, (2003).

A matriz de transição (Tabela 1), através de cálculos da diferença entre as células dos mapas classificados observados em 1995 e 2002, mostra a porcentagem de células que foram conservadas e também a porcentagem de células que podem se transformar em outra categoria. A constante assinalada com fundo cinza na Tabela 1 é a quantidade de células de cada categoria que não sofreu alterações.

Já as outras porcentagens observadas na Tabela 1, são as possíveis taxas de mudanças entre as categorias. Por exemplo: 36,53% das células de vegetação podem se transformar em Solo Exposto / Agricultura, 10,67% das células de Reflorestamento também podem ser modificadas para Solo Exposto / Agricultura.

Tabela 1 - Matriz de Transição.

	Água	Vegetação	Reflorestamento	Solo exp./ Agric.	Mancha Urb.
Água	100%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Vegetação	0,00%	61,68%	1,63%	36,53%	0,14%
Reflorestamento	0,00%	19,62%	69,70%	10,67%	0,00%
Solo exp./ Agric.	0,00%	19,54%	2,20%	77,53%	0,71%
Mancha Urb.	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%

Tabela 2 - Contagem das Células, Uso do Solo 1995, 2002 e Simulação.

	Vegetação (%)	Reflorestamento (%)	Solo exp./ Agric. (%)	Mancha Urb. (%)
1995 (%)	54,23%	0,34%	44,83%	0,60%
2002 (%)	42,35%	2,12%	54,56%	0,97%
Simulação (%)	42,18%	2,11%	54,74%	0,98%

Na Tabela 2 são mostrados os valores, em porcentagem, da quantificação das células para cada categoria, relativas às imagens classificadas: Uso do Solo 1995, Uso do Solo 2002 e a imagem resultante da Simulação para o ano de 2002. Na Fig. 6 observamos o Gráfico da distribuição da contagem das células.

Em 1995, a quantidade de vegetação observada foi de aproximadamente 578,15 km<sup>2</sup>, 3,6 km<sup>2</sup> de reflorestamento, 478 km<sup>2</sup> de solo exposto / agricultura e 6,39 km<sup>2</sup> de mancha urbana. Em 2002, a quantidade de vegetação observada foi de aproximadamente 451,56 km<sup>2</sup>, 22,54 km<sup>2</sup> de reflorestamento, 581,67 km<sup>2</sup> de solo exposto / agricultura e 10,37 km<sup>2</sup> de mancha urbana. E para o mapa simulado para o ano de 2002, a quantidade de vegetação observada foi de aproximadamente 449,71 km<sup>2</sup>, 22,46 km<sup>2</sup> de reflorestamento, 583,58 km<sup>2</sup> de solo exposto / agricultura e 10,39 km<sup>2</sup> de mancha urbana.

Ao observar a Tabela 2, a distribuição destes valores, em porcentagem, na Figura 6 e seus valores absolutos, podemos afirmar que a similaridade obtida pelo mapa simulado de 2002, comparado com a contagem das células da Imagem de uso do solo 2002 observado, são valores bem próximos, o que valida o modelo sob esta ótica. Isso nos mostra que quanto à proporção das taxas de mudança a simulação alcançou seu objetivo satisfatoriamente.

Do esperado para esta simulação os resultados obtidos foram satisfatórios. A etapa de calibração do modelo é a mais demorada e a que exige um alto conhecimento das variáveis que influenciam os fenômenos estudados.

A Fig. 7 e a Fig. 8 despontam em detalhe a classificação observada para o ano de 2002 e a

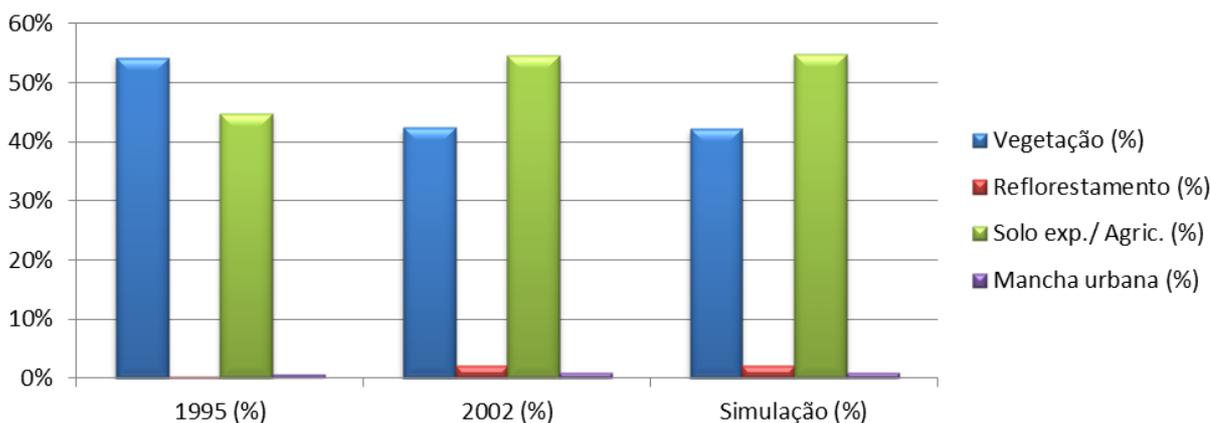


Fig. 6 - Gráfico da contagem das células.

classificação simulada para o ano de 2002, respectivamente. Em verde escuro, é referente a classe de uso do solo Vegetação, em verde claro Reflorestamento, em cinza, Mancha Urbana, em amarelo, Solo exposto/ Agricultura e em azul, Água. A Fig. 9 mostra lado a lado: a) classificação observada no ano de 2002 e b) mapa resultante da simulação para o mesmo ano facilitando assim uma comparação visual entre os mesmos.

É possível observar, visualmente, que este tipo de simulação nos mostra as tendências da dinâmica espacial para alguns fenômenos, como o crescimento da mancha urbana e áreas com maior probabilidade de desmatamento.

Quanto ao reflorestamento, o resultado do modelo, mostra que o fenômeno aconteceu de forma mais esparsa e em maior quantidade do que no obtido pelo mapa simulado, onde se apresentou mais

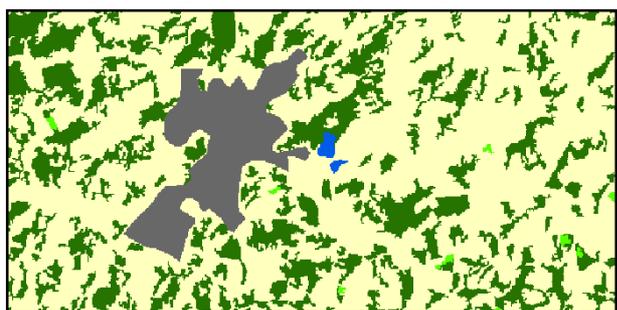


Fig. 7- Detalhe 2002 observado.

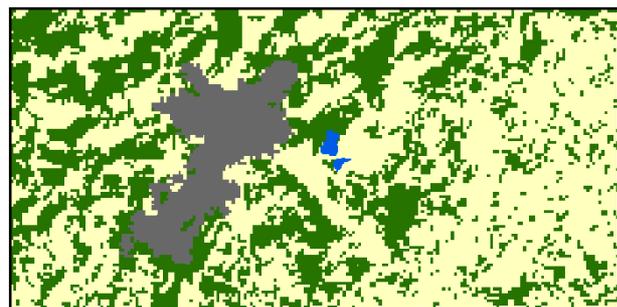


Fig. 8- Detalhe 2002 simulado.

agrupado. Uma análise quantitativa é apresentada na sequência do texto o que corrobora com esta observação.

A mudança da vegetação em outras classes observadas na Fig. 9, no mapa (b) ocorreu de forma mais desagregada do que a observada no mapa (a). Esta afirmação também pode ser observada comparando a Fig. 7 e a Fig. 8.

Para avaliar a precisão temática entre os mapas classificados, observado e simulado foi empregada a matriz de erro, também conhecida como matriz de confusão e a estatística descritiva conhecida como exatidão global, conforme observado na Tabela 3. A matriz de confusão é uma matriz quadrada de números definidos em linhas e colunas que expressam o número de unidades da amostra (pixels, grupos de pixels ou polígonos) atribuído a uma categoria simulada relativa à categoria observada. A unidade de amostra para este estudo foi o pixel. A exatidão global é calculada dividindo-se o total correto (somatório da diagonal principal, que são as células sombreadas em cinza na Tabela 3) pelo número total de pixels da matriz de confusão, número destacado em negrito na Tabela 3 (CONGALTON e GREEN, 2009).

A acurácia das categorias individuais pode ser obtida de forma similar. Deve-se dividir o número de pixels corretos em dada categoria pelo número total de pixels na linha ou coluna correspondente. Quando o número total de pixels correto de uma categoria é dividido pelo número total de pixels desta categoria, proveniente dos dados observados (ou seja, do total da coluna), esta medida de acurácia indica a probabilidade de um pixel de referência ser corretamente classificado e é realmente uma medida de erro de omissão. Se o número total de pixels correto em uma categoria é dividido pelo número

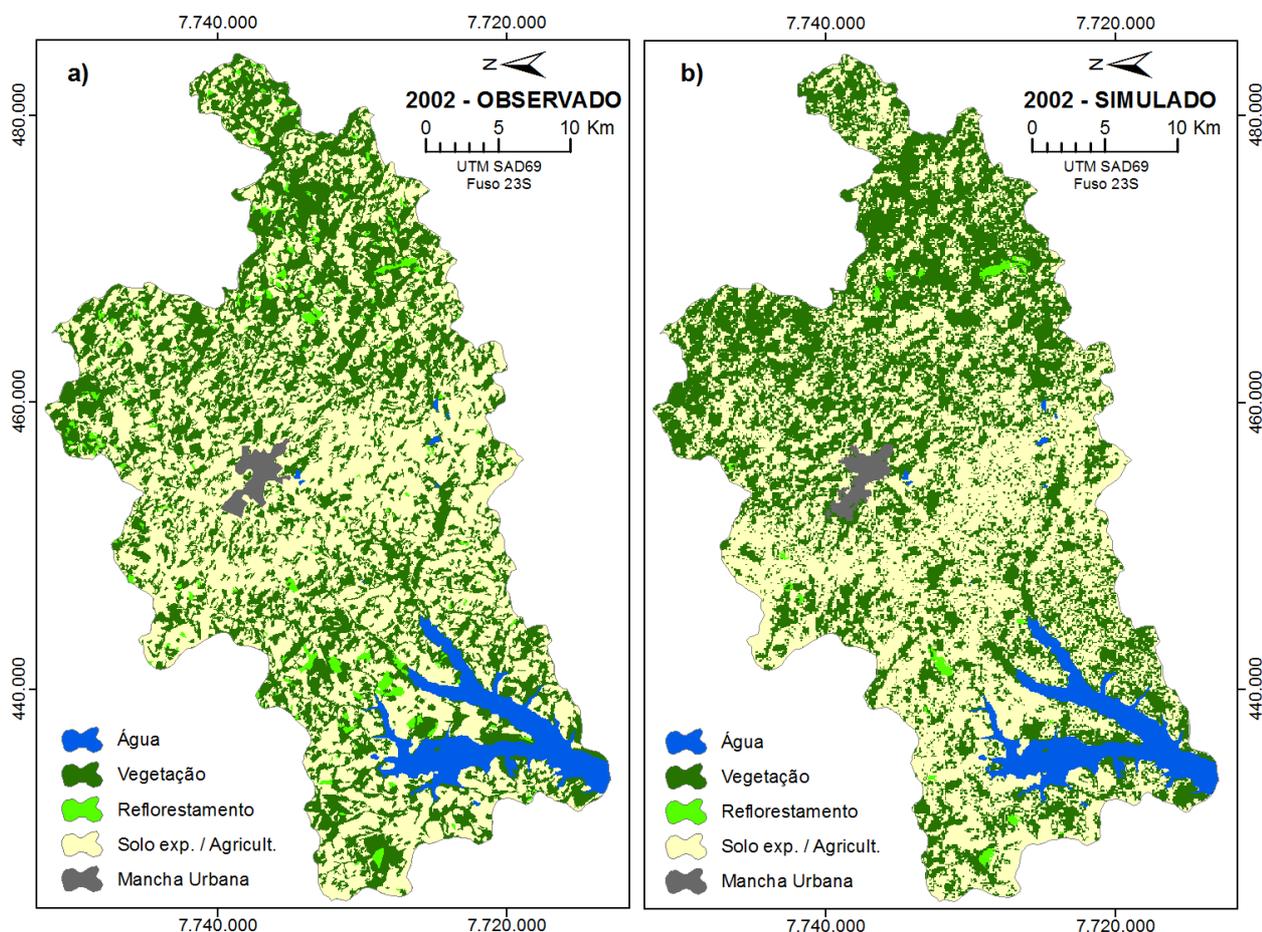


Fig. 9- Mapa de uso do solo observado em 2002 e mapa de uso do solo simulado 2002.

total de pixels simulados nessa categoria, então este resultado é uma medida de erro de comissão ou medida de confiabilidade (CONGALTON e GREEN, 2009).

A estatística descritiva da exatidão global atingiu a proporção de 67% de exatidão, considerada como regular por (CONGALTON e GREEN, 2009). Analisando o erro de omissão, Tabela 4, constatamos que a classe com maior probabilidade de um pixel de referência ser corretamente simulado é a classe Solo exposto / Agricultura, com 83%. A medida de confiabilidade, Tabela 5, para a mesma classe foi também de 83% e é a indicativa da probabilidade que um pixel simulado no mapa/imagem realmente representa essa categoria no mapa observado (e também no campo), que é considerado como muito bom por

(CONGALTON e GREEN, 2009). Usando a mesma analogia para o restante das classes, os índices alcançados são considerados regulares, salvo a classe reflorestamento cuja probabilidade das áreas de reflorestamento ter sido corretamente simulada é de 14%, e apenas 41% das áreas simuladas como Reflorestamento foram corretamente observadas como tal classe.

Resumindo, os resultados alcançados pela simulação, temos que: 83% da classe Solo exposto / Agricultura, 68% da classe Mancha Urbana, 67% da classe Vegetação e 14% da classe Reflorestamento foram corretamente simuladas. E que 83% simulado como Solo exposto / Agricultura, 72% simulado como Mancha Urbana, 60% simulada como Vegetação e 41% simulado como Reflorestamento, realmente correspondem a tais

Tabela 3 - Matriz de Erro ou Matriz de Confusão.

	Vegetação	Reflorestamento	Solo exp./ Agric.	Mancha Urb.	Total Linha
Vegetação	344.126	8.327	723	221.494	574.670
Reflorestamento	3.156	3.398	0	1.827	8.381
Solo exp./ Agric.	467	0	11.788	1.944	14.199
Mancha Urb.	169.695	12.319	1.709	482.681	666.404
Total Coluna	517.444	24.044	14.220	707.946	<b>1.263.654</b>

Tabela 4 – Medida do Erro de Omissão.

Vegetação	67%
Reflorestamento	14%
Solo exp./ Agric.	83%
Mancha Urb.	68%

Tabela 5 – Medida de Confiabilidade.

Vegetação	60%
Reflorestamento	41%
Solo exp./ Agric.	83%
Mancha Urb.	72%

classes no mapa de referência (uso do solo observado em 2002).

Frente aos processos estocásticos e heurísticos expostos e envolvidos neste trabalho, podemos concluir que a capacidade de simular classes de uso do solo como Solo exposto / Agricultura é considerada boa. Para as classes Mancha Urbana e Vegetação é considerada regular, ainda assim tem sua precisão temática confiável. A classe simulada referente ao Reflorestamento, não alcançou índices satisfatórios e devem ser considerados com cautela em qualquer análise correlata ao estudo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cartografia, por meio de técnicas de abstração capazes de representar os fenômenos espaço temporais, através de modelos de simulação, permite realizar avaliações distintas da paisagem e do espaço geográfico. É uma ferramenta para tomada de decisões, para simulação de cenários e tendências futuras, dado um conjunto de variáveis que afeta os fenômenos estudados, tanto fenômenos urbanos quanto ambientais.

O objetivo deste trabalho foi alcançado já que a aplicação de um modelo dinâmico de simulação foi realizada e tornou possível a comparação dos resultados obtidos entre uma realidade observada para o ano de 2002 e uma simulação da paisagem para o mesmo ano.

Uma análise mais detalhada da correlação espacial das variáveis escolhidas, com suas influências, na probabilidade da mudança podem melhorar o entendimento e o resultado dos modelos.

Hipoteticamente a inclusão de outras variáveis, estáticas ou dinâmicas ao modelo, assim

como um processo de calibração mais refinado, pode aumentar a precisão temática alcançada, principalmente se o interesse desta precisão seja em relação à classe Reflorestamento.

Com base nos resultados obtidos, fica aberta a possibilidade de explorar melhor os modelos de simulação, podendo ser criadas simulações preditivas para tempos futuros, sob a perspectiva de diferentes cenários. Estas hipóteses são sugeridas para aprofundamento deste estudo, em momento oportuno ou para serem desenvolvidas por pesquisadores com interesse na temática deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Deixamos expresso meu sincero agradecimento às seguintes pessoas: Ao Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó Elmiro e demais pesquisadores envolvidos na pesquisa de referência por ceder os mapas temáticos classificados de uso do solo utilizados neste artigo. À minha atual orientadora do Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – UFPE Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias por acreditar no meu projeto de mestrado. Sem o apoio destas pessoas, a publicação deste artigo não seria viável. Britaldo Soares-Filho recebe apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAKR, N.; WEINDORF, D. C.; BAHNASSY, M. H.; MAREIB, S. M.; & EL-BADAWI, M. M. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multitemporal Landsat data. **Climate Change and Applied Geography**, v. 30, p. 592-605, ISSN: 01436228, dez. 2010.

BURROUGH, P.A. Dynamic modelling and geocomputation. **Geocomputation: A Primer**. Editador: LONGLEY, P. A.; BROOKS, S. M.; MCDONNELL, R.; MACMILLAN, B. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., Cap. 9, p. 165-192, 1998.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à modelagem da dinâmica Espacial. In: SBSR, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Belo Horizonte: SBSR, 2003. Disponível em: < http://

www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>  
Último acesso em: 31/01/2013. 11:22:30.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, p. 55-119, 2009.

CORREIA, A. C. S.; SÁ, L. A. C. M. Mapas Mentais na Construção do Conhecimento para Geração de Bases de Dados Espaciais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 16, n.1, p. 39-50, ISSN: 1982-2170, jan. 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, p. 1-56, 1999.

FOLEY, J. A.; DEFRIES R.; ASNERG, P.; BARFORD, C.; BONAN G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, K.; HELKOWSKI, H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, J.; MONFREDA, C.; PATZ, A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, K. Global consequences of land use, **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574. 22 jul. 2005.

GALVÍNIO, J. D. ; MOURA, M. S. B. Detecting hydroclimatic changes using spatio-temporal analysis in the sub-medium São Francisco-PE Basin. **Journal of Environmental Hydrology**, v. 18, p. 1-14, 2010.

GEOMINAS – Mapas digitais para download. Minas Gerais, 2005. Disponível em: <<http://geominas.mg.gov.br/>> Último acesso em: 25/03/2008, 22:45:13.

GERI, F.; AMICI, V.; ROCCHINI, D. Spatially-based accuracy assessment of forestation prediction in a complex Mediterranean landscape. **Applied Geography**, v. 31, p. 881-890, Applied Geography, ISSN: 01436228, jul. de 2011.

GODOY, M. M. G. **Modelagem da dinâmica de ocupação do solo no bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil**. Originalmente apresentada como dissertação ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de Mestre em Geografia, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, p. 1-84, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**, IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/>> Acessado em: 14/07/2011, 00:18:16.

LACERDA, F.; NOBRE, P. Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.3, n.1, p.14-17, jun. 2010.

MAEDA, E. E.; CLARK, B. J. F.; PELLIKKA, P.; SILJANDER, M. Modelling agricultural expansion in Kenya's Eastern Arc Mountains biodiversity hotspot. **Agricultural Systems**, v.103, p. 609-620, ISSN: 01436228, nov. 2010.

METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. **Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 541-568, 2007.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. **Dinâmica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP., p. 3089-3096, 2007.

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: espaço e tempo: razão e emoção**. São Paulo: Hucitec, p. 66-71, 1996.

SOARES-FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. São Paulo, SP. Originalmente apresentada como tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p. 1-299, 1998. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/csr/publicacoes/tese/tese.html>> Último acesso em: 16 mai. 2011, 02:08:30.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. Modelagem de Dinâmica de Paisagem: Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação baseados em Autômato Celular. **Megadiversidade**. v.3, p. 75-86, 2007.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; VOLL, E.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modeling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p. 520-523, doi:10.1038/nature04389, 23 de mar. 2006.

SOARES FILHO, B. S.; DIETZSCH, L.; MOUNTINHO, P.; SUAREZ, A. F.;

- RODRIGUES, H.; PINTO, E.; MARETTI, C.; SUASSUNA, K.; SCARAMUZZA, C. A.; VASCONCELOS, F. **Reduction of carbon emissions associated with deforestation in Brazil: The role of the Amazon region Protected Areas Program (ARPA)**. Brasília: IPAM, 2008. v. 1. 32 p.
- SOARES-FILHO, B.S.; DIETZSCH, L.; MOUNTINHO, P.; SUAREZ, A. F.; RODRIGUES, H. **Protected Areas Helping to Reduce Carbon Emissions in Brazil** In: Arguments for Protected Areas - Multiple Benefits for Conservation and Use. London, Washington DC: EarthScan, v.1, p. 1-268, 2010.
- TIMBÓ, M. A. E.; FREITAS, C. R.; DUTRA, L. V.; ROSA, G. **Análise da redução do índice de qualidade de água (IQA) utilizando ambientes de Geoprocessamento**, 2005. Disponível em: <<http://www.cartografia.cl/download/02CT07.pdf>> Acessado em: 14/07/2011, 00:38:00;
- VERBURG, P. H.; SCHOT, P.; DIJST, M., VELDKAMP, A. Land use change modelling: current practice and research priorities. **GeoJournal**, v. 61, n. 4, p. 309-324, ISSN: 0343-2521, DOI: 10.1007/s10708-004-4946-y, dez. 2004.