



Revista Brasileira de Cartografia (2013) N° 65/1: 77-94  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## MODELAGEM DA DINÂMICA ESPACIAL DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO LAGO PARANOÁ-DF

*Modeling Spatial Dynamics from Land Use and Land Occupation in the Lago Paranoá Basin – DF*

**Lidiane Tomaz Dias & Detlef Hans-Gert Walde**

**Universidade de Brasília – UnB**  
**Instituto de Geociências – Geociências Aplicadas**  
Campus Darcy Ribeiro, Brasília. CEP: 70910-900  
lidiane.tomaz@gmail.com  
detlef@unb.br

*Recebido em 31 de julho, 2011/ Aceito em 15 de março, 2012*  
*Received on July 31, 2011/ Accepted on March 15, 2012*

### RESUMO

Observa-se uma crescente preocupação com as tendências ocupacionais do território urbano brasileiro, principalmente a partir dos anos 1950, pois o rápido crescimento da população têm resultado no aumento do número de cidades e suas dimensões. O uso de técnicas apropriadas de análise da dinâmica espacial permite efetuar simulações de cenários futuros de expansão urbana e dinâmica de uso do solo, possibilitando ao gestor conhecer as tendências da ocupação e tomar decisões no sentido de torná-las sustentáveis, ou de impedi-las, seja qual for o caso. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo modelar a dinâmica espacial do uso e ocupação do solo em unidades da bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF. Esse estudo se propõe a identificar os processos de mudança no uso e ocupação do solo por meio de análises multitemporais de imagens de satélite, e a criar cenários de tendência histórica para os anos de 2014 e 2020 nas sub-bacias do Bananal, do Ribeirão do Gama e do Lago Paranoá. Para tanto, utilizou-se o *software* Dinamica EGO como plataforma para modelagem. Foi possível destacar as transições de uso do solo ocorridas nos períodos de 1984 a 1994, de 1994 a 1998 e de 1998 a 2009. Esse último período foi utilizado para calibragem do modelo para a simulação futura, por meio do método de pesos de evidência. Os prognósticos modelados para os dois períodos futuros indicaram uma saturação no espaço territorial das unidades hidrográficas estudadas caso mantenha-se a tendência de mudança no uso do solo avaliado nos períodos anteriores.

**Palavras chaves:** Dinamica EGO, Modelagem Espacial Dinâmica, Simulação de Cenários.

### ABSTRACT

It is observed an increasing concern regarding the occupational trends of the Brazilian urban territory, mainly from 1950's, since the rapid population growth has resulted in increasing number of cities and their dimensions. The use of appropriate techniques for analysis of spatial dynamics allows simulations of future scenarios of urban expansion and land use dynamics. Thus, managers can know the trends of the occupations and make decisions to turn them sustainable or to prevent them, regardless of the situation. Accordingly, this paper aims to model the spatial dynamics of land use and soil units in the basin of Lake Paranoá. It is also proposed to identify the processes of change in land use and land occupation through multitemporal analysis and to create future scenarios for the years 2014 and 2020 in the Bananal,

Ribeirão do Gama and Lake Paranoá subbasins. We used the Dinamica EGO software as the platform for modeling. It was possible to highlight the transitions in land use occurred in the following time periods: 1984-1994, 1994-1998, and 1998-2009. The last time period was used to calibrate the model to simulate future, through the weights of evidence method. The modeled prognosis for 2014 and 2020 indicated saturation in the territorial space of the basin units studied if the trend of change in the land use evaluated in previous periods is kept.

**Keywords:** Dinamica EGO, Spatial Dynamics Modeling, Simulation of Scenarios.

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional concentrado em áreas urbanas faz com que, muitas vezes, o processo de urbanização aconteça de forma desordenada, resultando em ocupação de áreas irregulares, não planejadas. A partir de 1960, tem havido um crescimento acelerado na maioria das cidades brasileiras. Nessa mesma época, Brasília foi concebida, não fugindo à regra de crescimento populacional.

A ocupação do Distrito Federal (DF) se deu de forma rápida e intensa. A instalação da nova capital, Brasília, no Planalto Central, tinha como premissa um novo processo de ocupação, como uma esfera fechada para abrigar o poder com um número populacional pré-definido. No entanto, 50 anos depois, o que se pode observar é um quadro urbano-populacional característico de grandes metrópoles, e com os mesmos problemas. Tudo isso decorrente da política de ocupação de terras adotada. A princípio, pelo grande número de pessoas atraídas para trabalhar em sua construção e que buscava, em Brasília, a esperança de uma vida melhor. Depois, pela política populista do governo local, com a promoção de imensos loteamentos.

Tendo em vista esse crescimento populacional, o planejamento urbano tem sido tema de grande interesse, sendo amplamente abordado nas últimas décadas. O planejamento visa ordenar as áreas urbanas, levantando em consideração as que são e as que não são favoráveis à ocupação, e que podem, de alguma forma, causar desequilíbrio ao meio ambiente. O estudo da dinâmica do uso do solo pode auxiliar nesse sentido, por levar ao planejador a compreensão das tendências ocupacionais de determinada área, relacionadas ao processo histórico e às suas características.

Assim, como uma ferramenta para o planejamento urbano, o conhecimento sobre a dinâmica do uso e ocupação do solo pode fornecer ao planejador informações importantes a cerca das tendências de ocupação de determinado território. O emprego de modelos matemáticos ajuda a

entender o processo das mudanças no uso e cobertura da terra e a prever alterações futuras, gerando importantes contribuições científicas ao planejamento ordenado de uma área (CÂMARA E MONTEIRO, 2003).

A modelagem pode antever prováveis eventos em uma determinada área de acordo com as suas peculiaridades e simular cenários futuros. Nesse sentido, o propósito da modelagem dinâmica é simular as mudanças espaço-temporais atreladas a uma região, permitindo o entendimento das variáveis que influenciam a mudança, para assim ter uma visão de como o sistema urbano evolui.

Assim, a modelagem espacial dinâmica é tida como uma representação matemática do mundo real capaz de representar como uma determinada área ou região muda em resposta às circunstâncias impostas a ela. Esse tipo de simulação permite a construção de cenários futuros quando as forças inerentes aos fenômenos de transição do solo são devidamente identificadas.

Para tanto, a construção desses cenários deve ser precedida de uma análise multitemporal para o reconhecimento dos indicadores de mudança e exploração das transições que a área vem sofrendo. Essas transições podem ser representadas célula a célula em um modelo de autômatos celulares.

Modelos de autômatos celulares consistem em um ambiente de simulação representado por um espaço em forma de grade, no qual um conjunto de regras de transição determina o estado de cada célula, levando em consideração os atributos das células de sua vizinhança (ALMEIDA, 2007).

Neste trabalho foi utilizado o Dinamica EGO como plataforma para simulação. Esse se baseia em um algoritmo de autômato celular, sendo um modelo de simulação espacial da dinâmica da paisagem. Trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Utiliza o método dos pesos de evidência para o cálculo das probabilidades de transição de determinada classe

para outra, método esse, baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (ALMEIDA et al., 2005; SOARES-FILHO et al., 2009).

Assim, o objetivo deste estudo é a modelagem dinâmica espacial do uso do solo em unidades da Bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF, identificando os processos de mudanças no uso e ocupação do solo para assim projetar cenários de tendência histórica, de intensidade e localização dos processos de transição do uso e ocupação do solo.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá, a única bacia integralmente localizada em território do DF. Está localizada na região central do DF e possui uma área de aproximadamente 1.034,07 km<sup>2</sup> correspondendo a cerca de 18% do território. Limita-se ao norte com as Regiões Administrativas (RA) de Brazlândia – RA IV e de Sobradinho – RA V (Bacia do Maranhão); a leste, com parte das RAs V e VII, do Paranoá (Bacia do São Bartolomeu); ao sul, com a RA II do Gama (Bacia do Corumbá); e, a oeste, com a RA III, de Taguatinga, e parte da RA IV, Brazlândia (Bacia do Descoberto) (FERRANTE et al., 2001).

A bacia hidrográfica do Lago Paranoá, juntamente com as bacias hidrográficas do Rio São Bartolomeu, do Rio Descoberto, do Rio Corumbá e do Rio São Marcos, compõe a região hidrográfica do Paranoá. Essa é responsável pela maior área drenada do DF com área aproximada de 3.658 km<sup>2</sup> e com uma descarga média de 64 m<sup>3</sup>/s. Nessa região estão localizadas todas as grandes áreas urbanas e todas as captações de água para o abastecimento público do DF (FERRANTE et al., 2001).

Compõem, a bacia hidrográfica do Lago Paranoá, as unidades hidrográficas do Bananal, Lago Paranoá, Riacho Fundo, Ribeirão do Gama e Santa Maria/Torto (fig.1).

O clima predominante da região é o tropical de savana segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual varia de 18°C a 22°C e a umidade relativa do ar de 70 a 20%, podendo chegar a valores próximos de 12% nos meses de agosto e setembro (FERRANTE et al., 2001). A vegetação típica é o cerrado.

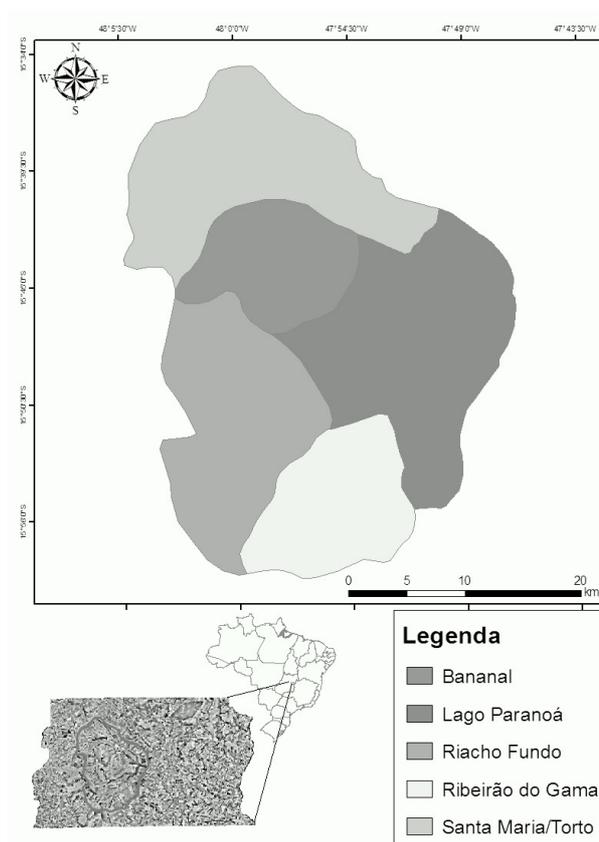


Fig. 1 – Localização da bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF e suas sub-bacias.

## 3. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação – FAO define o termo “uso do solo” pelo critério funcional, relacionando-o com a finalidade para qual a terra é usada pela população humana, como sendo as atividades humanas diretamente relacionadas à terra, fazendo uso e tendo impacto sobre ela (FAO, 1995). Dessa forma, pode-se entender a mudança no uso do solo como as transformações de um determinado tipo de atividade em uma mesma área.

### 3.1 Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal

Para entender a dinâmica do uso e ocupação do solo no DF, é necessário discorrer sobre os caminhos percorridos desde a escolha do local onde a capital do Brasil seria instalada, até os dias atuais. A capital federal, Brasília, foi planejada no centro do país com o propósito estratégico de promover o desenvolvimento do interior.

O ano de 1894 pode ser considerado o marco histórico do denominado Quadrilátero Cruls, que viria a ser o DF. Trata-se do ano da apresentação do “Relatório da Comissão

Exploradora do Planalto Central”, que, sob a chefia do astrônomo belga Luiz Cruls, realizou um levantamento minucioso sobre a topografia, clima, geologia, flora, fauna, recursos minerais e outros aspectos da região. A Comissão, que era composta por oito especialistas e mais 14 ajudantes, demarcou, estudou, analisou e fotografou um quadrilátero de 14.400km<sup>2</sup> (BARBO, 2001).

Em 1955, foi concluído o “Relatório Técnico sobre a Nova Capital da República” - Relatório Belcher - que teve como objetivo definir o sítio onde se localizaria a nova capital. Foram levantadas inúmeras informações em uma área de 50.000km<sup>2</sup>, como topografia, geologia, drenagem, solos para engenharia, solos para agricultura e utilização da terra dentro de um retângulo previamente escolhido para conter o DF (UNESCO, 2002).

Com base nesse relatório foram indicados cinco sítios onde seria possível implementar a nova capital. Esses sítios foram denominados como sítio amarelo, vermelho, azul, verde e castanho, cada um com 1000km<sup>2</sup>. Em abril de 1955, o sítio castanho, onde se localizava a Fazenda Bananal, foi escolhido, exatamente no local onde esteve acampada a comitiva de Luiz Cruls. Em torno do local escolhido, foram traçados os limites do novo DF, com uma área de aproximadamente 5.000km<sup>2</sup>. Já em 1955, começaram as desapropriações de terra a partir da Fazenda Bananal que se situava entre os córregos Bananal e Torto. (MENEZES JUNIOR et al., 2001).

Definido o sítio e a configuração do Lago Paranoá, o Plano Piloto de Brasília foi objeto de concurso público, saindo vencedora a proposta de Lúcio Costa (GDF, 1991).

A construção de Brasília atraiu um grande número de pessoas que foram trabalhar nos canteiros de obra. A cidade recebeu pioneiros de todas as regiões do país. A partir daí, iniciou-se o processo de ocupação, muitas vezes desordenada, do solo do DF.

Já no final de 1959, mesmo antes da inauguração de Brasília, já se configuravam ocupações diversas nas proximidades da então Cidade Livre, como a Vila Matias, além de outros pequenos agrupamentos próximos. Esses assentamentos e outros que foram criados no início dos anos 60, como o Gama e Sobradinho, além da expansão de cidades pré-existentes como Planaltina

e Brazlândia, serviram para atender o intenso fluxo migratório, bem como realocar a população instalada em torno das grandes áreas de construção do Plano Piloto (GDF, 1991; FRANÇA e VIANA, 2010).

Em 1986, o DF foi subdividido em oito RAs. Em 1989, apenas três anos depois, já eram 12 Regiões Administrativas. Nos fins do ano 2000 já eram 19. Hoje, o DF conta com 30 RAs, sendo a última criada em 2009, a de Vicente Pires.

Com o grande e rápido crescimento, Brasília se encontra hoje com muitas dificuldades de gestão dos processos de ocupação e crescimento urbano e já apresenta um processo de saturação urbano-populacional que é causador de uma série de problemas, tais como: grilagem de terras, ocupação indevida com conflito de uso do solo, proliferação de ocupações irregulares e em situação de risco, impermeabilização do solo, sobrecarga dos sistemas públicos básicos (transporte, educação, saúde) e os conseqüentes impactos ambientais correlacionados (BARBO, 2001; SOARES e ALVES, 2004).

Assim, se faz necessário conhecer a dinâmica do uso e tendências futuras de ocupação para subsidiar a tomada de decisão dos gestores no sentido de conter, controlar ou organizar o crescimento da cidade.

### **3.2 Políticas Públicas de Uso e Ocupação do Solo**

Segundo Barbo (2001), o processo de urbanização do DF tem se caracterizado por um crescente descompasso entre as diversas ações do poder público, muitas vezes contraditórios entre si. Segundo o autor, tal fato tem estimulado o desrespeito à legislação urbanística vigente, contribuindo assim para a existência de duas realidades distintas - a cidade formal e a cidade informal ou ilegal.

Foram muitas as tentativas do GDF em fixar diretrizes de ordenamento do solo, sendo a primeira delas o Decreto nº 163, de 26 de fevereiro de 1962, seguido pelo PEOT – Plano Estrutural de Organização Territorial do DF, de 1977, pelo Plano de Ordenamento Territorial – POT (1985), e o Plano de Ocupação e Usos do Solo do DF – POUZO (1986-1990).

### **3.2.1 Plano Diretor de Ordenamento Territorial**

O Plano Diretor de Ordenamento Territorial - PDOT, segundo Barbo (2001), foi uma das principais ações do poder público do DF no tocante ao seu território. O primeiro PDOT foi produzido em 1992 e homologado pela Lei nº 353, de 18 de novembro de 1992.

Esse PDOT previu uma ocupação para a Bacia do Lago Paranoá, até o ano 2030, de 1.223.045 habitantes, distribuídos por diversas localidades a serem implantadas, ou com vistas ao adensamento populacional de localidades existentes (BARROS et al., 2010). Na bacia do Lago Paranoá, incluindo as Regiões Administrativas de Brasília, Lago Sul, Lago Norte, Candangolândia, Cruzeiro, Núcleo Bandeirante, Guará, Riacho Fundo, Paranoá e parte da RA de Taguatinga, os dados do Censo de 1991 (IBGE) revelavam que a população naquela época era de 506.498 habitantes (DISTRITO FEDERAL, 1992).

Em 1997, por meio da Lei Complementar n.º17, de 28 de janeiro de 1997, foi aprovado um novo PDOT. Esse confirmou a ocupação do eixo oeste/sudoeste sob as premissas de respeito às restrições ambientais e de saneamento, dando preferência ao adensamento das áreas já urbanizadas à criação de novas áreas. Assim, uma estratégia era consolidar a ocupação urbana do Plano Piloto e dos núcleos urbanos das RAs de Sobradinho, Planaltina, Paranoá, Candangolândia, Cruzeiro e Setores de Habitação Individual Sul (SHIS) e Norte (SHIN) e restringir a ocupação urbana nas áreas consideradas sensíveis do ponto de vista ambiental e de saneamento, incluindo as áreas com incidência de parcelamentos nas bacias do Rio São Bartolomeu, do Lago Paranoá e do Rio Maranhão. O PDOT de 1997 buscou ainda reforçar a autonomia de cada cidade do DF (DISTRITO FEDERAL, 1997).

Depois de quatro anos de discussões, o PDOT foi aprovado em 2008 e sancionado em abril de 2009. O Plano prevê a criação de mais 29 áreas habitacionais, como os setores Catetinho, Mangueiral e Noroeste (DISTRITO FEDERAL, 2009).

O PDOT, sancionado em 2009, atualmente está passando por um processo de atualização por relevante interesse público e pela declaração de

inconstitucionalidade de diversos dos seus dispositivos.

Dentre as estratégias de ordenamento territorial do PDOT-2009, França e Viana (2010) destacaram: a dinamização das áreas urbanas, a revitalização dos conjuntos urbanos, a ampliação da estrutura viária, ofertas habitacionais e a regularização fundiária.

### **3.3 Unidades de Conservação no Distrito Federal**

O DF tem cerca de 45% do seu território composto de áreas legalmente protegidas na forma diferentes unidades de conservação (CARDOSO et al., 2001). A maioria dessas áreas foram implantadas na década de 1990 como uma tentativa de controle do processo de ocupação que aqui se instalava.

O DF conta com as seguintes unidades de conservação: as Áreas de Proteção Ambiental - APA, as Estações Ecológicas, as Reservas Biológicas e Áreas de Relevante Interesse Ecológico- ARIE. Além das unidades de conservação previstas, parte das áreas protegidas do DF possui nomenclatura própria, não constante no Sistema Nacional de Unidades de Conservação como Reservas Ecológicas, Parques Ecológicos e de Uso Múltiplo e Áreas de Proteção de Mananciais.

#### **3.3.1 Unidades de Conservação na Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá**

A bacia do Lago Paranoá tem cerca de 67% do seu território ocupado por unidades de conservação, sendo identificadas por 11 Unidades de Conservação de Proteção Integral, quatro Unidades de Conservação de Uso Sustentável, 22 Parques Ecológicos e de Uso Múltiplo, e sete Áreas de Proteção de Mananciais (CARDOSO et al., 2001).

Dentro das unidades de Uso Sustentável presentes na Bacia do Lago Paranoá, estão as APAs das Bacias do Gama e Cabeça de Veado e do Lago Paranoá; a ARIE da Granja do Ipê; e a Floresta Nacional de Brasília. Além dessas, estão presentes pequenas áreas das APAs do Rio Descoberto, do Rio São Bartolomeu e de Cafuringa nas bordas da porção norte da bacia (RAMOS et al., 2001).

Na APA das bacias do Gama e Cabeça de Veado encontram-se a Estação Ecológica do Jardim

Botânico, Estação Ecológica da Universidade de Brasília, Reserva Ecológica do IBGE, Fazenda Experimental Água Limpa, Jardim Zoológico e Áreas de Relevante Interesse Ecológico (RAMOS et al., 2001).

Na APA do Lago Paranoá, encontra-se outras unidades de conservação como o Jardim Botânico de Brasília, o Parque Nacional de Brasília, a Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, as áreas de relevante interesse ecológico (ARIE) Capetinga-Taquara e Riacho Fundo, a Reserva Ecológica do IBGE e a Área do VI Comando Aéreo da Aeronáutica (RAMOS, et al., 2001).

#### 4. MODELAGEM AMBIENTAL

A modelagem ambiental é uma atividade que vem sendo desenvolvida através dos séculos. Busca-se com um modelo respostas a uma determinada situação. Para tanto se exige do usuário que possua conhecimentos sobre os processos e eventos envolvidos a fim de que a modelagem encontre resultados o mais próximo possível da realidade (JAMES e HUNTLEY, 1990).

Para Christofoletti (1999), o objetivo principal da modelagem é buscar reproduzir as características relevantes para o tratamento de uma determinada questão, e não produzir uma cópia exata. Assim, pode-se modelar uma mesma situação de maneiras diferentes, de acordo com as informações e objetivos que se quer alcançar.

##### 4.1 Modelagem Espacial Dinâmica

Uma importante contribuição dos atuais recursos computacionais tem sido a possibilidade de simulação de fenômenos dinâmicos espaciais como expansão urbana, mudança do uso do solo, processos de ocupação, entre outros.

O modelo espacial dinâmico, para Burrough e McDonnel (1998), sintetiza a superação da modelagem em relação às limitações das ferramentas de geoinformação. Os autores o definiram como sendo uma “uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações nas forças direcionadoras”.

Assim, o propósito da modelagem dinâmica é simular as mudanças espaço-temporais nos atributos do meio ambiente, atreladas a um território geográfico, permitindo o entendimento dos mecanismos que determinam a função de mudança

e, assim, avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de variáveis definidas pelo modelador (BENEDETTI, 2010).

Por possibilitar a simulação de cenários futuros, a modelagem dinâmica, quando utilizada para o estudo de fenômenos de transição no uso e ocupação do solo, se torna uma ferramenta valiosa para o planejamento urbano (BENEDETTI, 2010).

Para Valentin (2008), a modelagem dinâmica constitui uma potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrer dentro de uma bacia hidrográfica.

##### 4.2. Modelos Autômatos Celulares

Modelos autômatos celulares, ACs, que transmitem a idéia de representação das cidades como células e transições urbanas como regras, conquistam cada vez mais usuários pelo fato de se articularem bem com dados matriciais muito usados em SIG (BATTY, 2007).

Os ACs podem ser entendidos como sistemas formais baseados em grades, representando os processos de mudanças célula a célula, como um mapeamento do estado atual de uma célula e das suas vizinhas para o estado da mesma no instante de tempo seguinte (ALMEIDA, 2003).

No modelo baseado em AC, o estado de cada célula depende de seu estado anterior, além de um conjunto de regras de transição, de acordo com o arranjo específico de certa vizinhança, sendo todas as células atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo (SOARES-FILHO et al., 2002).

Os modelos computacionais baseados em agentes e autômatos celulares (ACs) mostram o potencial de representar e simular a complexidade dos processos envolvidos na dinâmica espacial e na mudança do uso da terra (DELANEZE et al., 2011).

##### 4.3 Dinamica EGO

O Dinamica EGO é uma ferramenta desenvolvida e mantida pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais para ser aplicada a uma variedade de estudos de dinâmica da paisagem e modelagem ambiental. Nesse trabalho, utilizou-se a versão 1.6, intitulada Dinamica EGO – acrônimo para *Environment for Geoprocessing Objects*

(ambiente para objetos de geoprocessamento), disponível como *freeware* em [www.csr.ufmg.br/dinamica/EGO](http://www.csr.ufmg.br/dinamica/EGO).

O Dinamica EGO é um modelo de simulação espacial do tipo Autômato Celular. O *software* é utilizado como um instrumento de investigação da trajetória de paisagens e da dinâmica de fenômenos espaciais, sendo um modelo genérico de mudanças. Algumas de suas aplicações com relação à dinâmica urbana estão em ALMEIDA (2003), GODOY (2004), TRENTIN (2008), VALENTIN (2008).

Uma grande vantagem do Dinamica EGO, segundo Rodrigues et al. (2007) é a alocação de memória. Utiliza um fluxo de dados que é mantido em memória durante o tempo em que for necessário à execução do modelo.

O seu ambiente de modelagem envolve uma série de operadores chamados de funtores (*functors*). Os funtores podem ser considerados como os elementos básicos de um modelo cartográfico. Um functor aplica um número finito de operações sobre um conjunto de dados de entrada, produzindo, como saída, um novo conjunto de dados. Para cada tarefa específica, existe um functor responsável que inclui todos os operadores de álgebra cartográfica (TOMLIM, 1990 *apud* RODRIGUES et al., 2007).

Os modelos criados pelo Dinamica EGO são gravados na forma de *scripts* textuais e criados em duas sintaxes: XML ou EGO Script. Sua interface gráfica é escrita em Java e seu núcleo, responsável pela criação e execução dos modelos, é escrito em C++.

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

As sub-bacias do Lago Paranoá estudadas foram as do Bananal, do Ribeirão do Gama e do Lago Paranoá (fig. 1). A modelagem da dinâmica urbana destas unidades hidrográficas foi elaborada em quatro fases principais para cada período de simulação, em uma série multitemporal de 25 anos, que compreendeu os anos de 1984 a 2009. Na primeira fase, foram preparados os dados de entrada; a segunda fase foi constituída pela calibração do modelo; na terceira fase, procedeu-se a construção do modelo de simulação e validação; e na quarta fase, a obtenção dos cenários de tendência histórica.

### 5.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada do modelo fornecem informações sobre os aspectos de uso e ocupação do solo, como áreas urbanas, rurais, vegetação, rede viária entre outros. Neste trabalho, os dados de entrada do modelo englobaram: mapas temáticos relativos a quatro cenários do uso e ocupação do solo para os anos de 1984, 1994, 1998 e 2009; e dados vetoriais.

Os mapas de uso e ocupação do solo, referentes aos anos de 1984, 1994 e 1998, foram elaborados pela UNESCO (2000; 2002) por meio de classificação supervisionada MAXVER sobre imagens Landsat (FELIZOLA et al., 2001 *apud* MENEZES, 2010), validadas por Menezes (2010). A validação foi realizada por meio de interpretação visual de fotografias aéreas e imagens do sensor Landsat 5 TM e por sobreposição dos mapas vetoriais com as imagens das respectivas datas, permitindo a ratificação e/ou a retificação das classes de uso do solo (MENEZES, 2010).

As imagens foram registradas utilizando, como referência, a imagem de 1998 que foi georreferenciada utilizando-se a base cartográfica da CODEPLAN, na escala de 1:10.000 no sistema de projeção SICAD (CODEPLAN, 2008 *apud* MENEZES, 2010).

O mapa de uso e ocupação de solo referente ao ano de 2009 foi elaborado por Menezes (2010) com base na análise da imagem do sensor AVNIR-2 a bordo do satélite ALOS, de setembro de 2009. Essa imagem foi georreferenciada utilizando-se a base cartográfica da CODEPLAN na escala de 1:10.000 no sistema de projeção SICAD. O mapa foi validado por meio de dados em campo.

Todos esses mapas passaram por adaptação para aplicação na simulação da dinâmica do uso e ocupação do solo. Na classificação original (MENEZES, 2010), foram considerados oito tipos de classe para todo o período: cerrado, campo, mata de galeria, corpos d'água, agricultura, solo exposto, reflorestamento e área urbana. Neste trabalho foi necessário fazer uma generalização destas classes, pois a complexidade do modelo tende a aumentar quanto maior for o número de atividades distintas (BATTY et al., 1999). Desta forma, foi proposta a criação de uma nova classe: vegetação, que englobou as classes: cerrado, campo e solo exposto. Assim, as classes consideradas neste estudo foram:

1 - **Agricultura** – compreende as áreas ocupadas por culturas intensivas, áreas irrigadas, chácaras e setores habitacionais ainda não consolidados caracterizados pela coexistência de atividades agrícolas e empreendimentos de parcelamento do solo;

2 - **Área urbana** – compreende todas as áreas urbanas consolidadas;

3 - **Vegetação** – compreende as formações savânicas, dentre elas: cerrado típico, cerrado denso, cerrado ralo e campo cerrado; as formações com extrato predominantemente herbáceo de caráter natural ou antropizado; e as áreas sem nenhuma cobertura vegetal, com exposição direta do solo às intempéries, tais como: áreas de empréstimo, cascalheiras e solo preparado para o plantio;

4 - **Mata de galeria** – compreende as formações florestais (mata ciliar, mata de galeria, mata mesofítica (seca), mata de encosta e cerradão);

5 - **Corpos d'água** – correspondem aos espelhos d'água formados por lagos, lagoas e represas;

6 - **Reflorestamento** – corresponde às áreas com plantios homogêneos de pinus e eucaliptos;

Os mapas vetoriais foram convertidos em mapas matriciais, por meio da construção de mapas de distância. Todos os mapas devem conter a mesma resolução espacial e o mesmo *box* de coordenadas com igual número de linhas e colunas. Para tanto, os mapas foram convertidos em formato matricial no *software* ArcGIS 9.3 e convertidos para o formato *geotiff file filter*. O sistema de referência foi o SICAD.

## 5.2 Calibração do modelo

Todo procedimento a partir daqui foi realizado com o *software* Dinamica EGO. A fim de analisar a dinâmica da paisagem pela forma como as classes de uso e ocupação do solo variam em dois instantes de tempo distintos, foi utilizada a matriz de transição. Essa matriz descreve um sistema que muda em intervalos de tempo (SOARES-FILHO et al., 2009). Nesse passo, foram obtidas todas as transições entre as classes de uso e ocupação do solo. A série multitemporal adotada, de 25 anos, foi dividida em três períodos para estudo: 1984-1994; 1994-1998; e 1998-2009. A matriz consiste basicamente na tabulação cruzada destes mapas por meio de um modelo elaborado pelo Dinamica EGO que gera duas matrizes para cada período, *single*

*step matrix* e *multiple step matrix*. A primeira corresponde à transição ocorrida para todo o período e a segunda apresenta a transição ocorrida por passos de tempo, neste caso, transições ocorridas anualmente. Para a construção de cenários futuros, foram consideradas as matrizes por passos de tempo (*multiple steps matrix*).

Foram selecionadas as variáveis estáticas que melhor explicam as transições encontradas para cada unidade estudada. As variáveis são categóricas, quando separadas por classes, e não categóricas. No último caso, os mapas utilizados serão mapas de distância até as variáveis, como vias, lago e drenagem. Os mapas de distância das variáveis estáticas não categóricas foram desenvolvidos no *software* ArcGIS 9.3, utilizando a distância euclidiana.

O Dinamica EGO adota o método dos pesos de evidência baseado no teorema da probabilidade condicional de *Bayes* para produzir um mapa de probabilidades de transição, que representa as áreas mais favoráveis para possíveis mudanças (SOARES-FILHO et al., 2009). A obtenção dos pesos de evidência foi estruturada em duas etapas. A primeira etapa consistiu na definição dos intervalos para a derivação dos pesos de evidência e a segunda, no cálculo dos coeficientes. Os produtos utilizados para a primeira etapa foram os mapas de uso e ocupação do solo final e inicial; uma série de mapas de variáveis estáticas e de variáveis dinâmicas, que podem ser atualizadas durante a iteração do modelo, como mapas de distância produzidos por meio do *functor Calc to Distance Map* do Dinamica EGO. O resultado da primeira etapa, um arquivo esqueleto dos pesos de evidência, foi usado como entrada para a segunda etapa. Além deste, foram usados, como entrada, o mapa de uso de solo final e inicial e as variáveis estáticas.

Para o método dos pesos de evidência, supõem-se que os mapas de variáveis devem ser independentes entre si. Para estimar esta suposição, dois métodos foram utilizados: o *índice de Cramer* e o *join information uncertainty* (incerteza da informação conjunta) (BONHAN-CARTER, 1994). Ambos destinam-se a avaliar a existência de dependência ou associação entre duas variáveis. O intervalo de valores varia de zero a um, sendo que as variáveis são independentes quando seu valor é igual a zero e completamente dependentes quando for igual a um. As variáveis correlacionadas devem

ser desprezadas do modelo. O limiar de corte considerado neste estudo foi fixado em 0,5. As variáveis que ultrapassaram esse limiar foram descartadas ou vinculadas à outra formando uma nova variável.

Desta forma, foram selecionados os melhores conjuntos de variáveis para cada transição dentro de cada unidade hidrográfica estudada, para construção do modelo de simulação.

### **5.3 Construção do Modelo de Simulação e Validação**

Para produzir os padrões espaciais de mudanças na transição do uso do solo, o Dinamica EGO apresenta dois algoritmos: o *patcher* e o *expander*. A função *expander* é responsável pela expansão ou contração das manchas já existentes de determinada classe, ou seja, executa transições de um estado *i* para um estado *j* somente nas adjacências de células no estado *j*. Já a função *patcher* destina-se a gerar novas manchas de transição de um estado *i* para um estado *j* nas vizinhanças de células com estado diferente de *j*. Variando os parâmetros de entrada, estas funções possibilitam a formação de uma variedade de tamanhos e formas de manchas representativas das transições para a construção do modelo.

O tamanho das novas manchas, a expansão ou a contração das manchas já existentes são fixados de acordo com uma distribuição de probabilidade lognormal, portanto os parâmetros de distribuição de cada mancha a ser formada devem ser especificados. (SOARES-FILHO et al., 2003).

A validação do modelo compreendeu a elaboração de modelos de diferença e de similaridade. São métodos de comparação baseados em proximidade. Segundo Soares-Filho et al. (2009), os mapas – mesmo os que não se assemelham exatamente – podem apresentar padrões similares e concordância espacial nas proximidades de uma célula.

Hagen (2003) desenvolveu um método para avaliar a similaridade de um conjunto de mapas com dados categóricos, esse método aplica a lógica *fuzzy* e foi denominado de *kfuzzy*. Envolve tanto a incerteza da localização quanto a incerteza da categoria.

O método empregado neste trabalho foi uma adaptação do método desenvolvido por Hagen (2003) para aplicação no Dinamica EGO. Utiliza

uma função de decaimento exponencial com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central (SOARES-FILHO et al., 2009). Cada célula recebe um valor de grau de semelhança, e é gerado um valor global de similaridade. Esse varia de 0 a 1 sendo que quanto mais próximo de 1, maior a similaridade entre os mapas. Como entrada, o modelo recebe os mapas de uso de solo inicial, final e final simulado. Assim, foram identificadas as distinções entre os mapas de uso final e inicial reais; e final simulado e inicial real.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As unidades da Bacia do Lago Paranoá aqui estudadas foram escolhidas por apresentar predomínio de diferentes usos. A sub-bacia do Lago Paranoá apresenta um alto índice de ocupação urbana, enquanto a sub-bacia do Bananal, pelo fato de abrigar parte da Floresta Nacional, caracteriza-se por ser uma unidade com alta taxa de preservação vegetal. Entre as duas situações, tem-se a sub-bacia do Ribeirão do Gama, que é equilibrada em termos de índices de ocupação urbana e ocupação vegetal. Com isso, pôde-se construir a modelagem ambiental em cenários com dinâmicas de uso distintas.

### **6.1 Calibração do modelo**

A partir dos mapas de uso inicial e final do solo correspondentes a três períodos distintos, 1984-1994; 1994-1998 e 1998-2009, foram calculadas as taxas de transição no Dinamica EGO por meio da matriz de transição – tabulação cruzada destes mapas. As transições encontradas estão dispostas nas tabelas 1, 2 e 3, que apresentam as taxas em porcentagem de transição de determinada classe para outra, considerada para todo o período. As classes estão sendo representadas numericamente, sendo que 1 representa agricultura, 2 área urbana, 3 vegetação, 4 mata de galeria, 5 corpos d'água e 6 reflorestamento.. As células representadas por —, indicam que as transições foram nulas e as representadas por XX, indicam uma mesma classe.

Com base no resultado obtido pelas matrizes de transição, procedeu-se à seleção das variáveis estáticas para a calibração do modelo (tabela 4). A escolha das variáveis se deu após a realização de vários testes de tentativa e erro, levando-se em

consideração a influência dessas sobre as transições observadas.

Para representar as variáveis estradas/vias, drenagem, área protegida e lago, foram construídos mapas de distância no ArcGis 9.3, usando a distância euclidiana.

Além dessas variáveis, foi incluído o mapa do PDOT e os mapas de distância até as classes, criados por meio do operador *Calc Distance Map* no Dinamica EGO. Esse functor calcula um mapa que representa a distância entre uma célula e as células mais próximas de uma determinada categoria especificada.

A independência entre os pares de variáveis, verificada pelo cálculo dos índices de *Cramer (V)* e da incerteza da informação conjunta (*U*) (*Joint information Uncertainty*) (BONHAM-CARTER, 1994), foi calculado pelo *contêiner Determine Weights Of Evidence Correlation*. A saída deste modelo é uma planilha contendo a descrição dos pares de variáveis e os resultados correspondentes aos dois testes. Como não há um consenso na literatura sobre o valor de corte que deve ser utilizado e considerando que quanto maior o valor, maior a correlação, resolveu-se utilizar como corte os valores superiores a 0,5 obtidos em ambos os testes. Neste estudo, nenhum dos pares de variáveis apresentou valores de correlação superior a 0,5 para nenhuma das três áreas estudadas, indicando razoável independência entre eles.

## 6.2 Construção do Modelo de Simulação e Validação

Concluído o processo de calibração, passou-se à construção do modelo de simulação para um intervalo de 11 anos, considerando o período de 1998 a 2009.

Nesta etapa definiram-se os parâmetros para as manchas de uso do solo a serem criadas, por meio do algoritmo *patcher*. Este operador busca as células que apresentam a maior probabilidade de transição e gera novas manchas de uma determinada classe usando um mecanismo de semeadura (SOARES-FILHO et al., 2009). Os parâmetros que devem ser definidos para o algoritmo são: *Mean patch size*, *Patch size variance*, e *Patch isometry*, responsáveis pelas características das novas manchas. O tamanho médio e a variância são definidos em unidade de área (hectares), já a isometria varia de 0 a 2, sendo que quanto maior, mais isométrica (células

agregadas) a mancha aparece. A escolha destes parâmetros foi realizada por meio da execução de vários testes até se obter o resultado esperado, comparando visualmente as mudanças de uso do solo ocorridas no período (tabela 5).

Um dos primeiros resultados na fase de simulação do uso do solo foi a obtenção de mapas de probabilidade espacial de mudança, que mostram as áreas com maiores probabilidades de transição. O modelo executado no Dinamica EGO criou um mapa de probabilidade para cada transição encontrada. Além dos mapas de probabilidade espacial de transição, obteve-se obtido um cenário simulado para 2009.

A partir do cálculo de diferenças entre o mapa inicial e o mapa final real, obteve-se o que pode ser chamado de primeiro mapa. As células iguais entre o mapa inicial e o mapa final real recebem um valor nulo, enquanto que as células do mapa final real que não coincidem com a do mapa inicial são conservadas. Com a mesma operação entre o mapa inicial e o mapa final simulado, obteve-se o segundo mapa.

Os dois mapas obtidos virtualmente foram usados no cálculo dos índices de similaridade *fuzzy*. O tamanho da janela trabalhada foi de 11x11 células.

A partir daí, foram gerados dois índices de similaridade: o *First Mean* e o *Second Mean* (tabela 6). O *First Mean* compara o primeiro mapa com o segundo e o *Second Mean* compara o segundo mapa com o primeiro. O primeiro mapa de similaridade mostra o grau de correspondência espacial entre o primeiro e segundo mapa de entrada, já o segundo mapa de similaridade mostra do segundo para o primeiro. A similaridade varia de zero a um, quando da combinação perfeita.

As similaridades encontradas para a Bacia do Bananal e do Ribeirão do Gama apresentaram índices baixos, considerando que estes variam de 0 a 1. A sub-bacia do Lago Paranoá foi a que apresentou maior índice. Em todos os casos os valores encontrados podem ser considerados válidos tendo como explicação a morfologia dispersa das áreas (TRENTIN e FREITAS, 2010).

Considerando esses dados, um novo modelo foi executado, com a inclusão do algoritmo *Expander*. O *Expander* é responsável pela expansão ou contração de manchas previamente existentes de uma determinada classe. Assim como no operador *Patcher*, o *Expander* também usa uma

Tabela 1 – Transições encontradas na sub-bacia do bananal nos seguintes períodos: 1984-1994; 1994-1998; e 1998-2009. 1 – agricultura; 2 - área urbana, 3 – vegetação; 4 - mata de galeria; 5 - corpos d’água ; 6 – reflorestamento.

Classes	1994					1998				2009						
	1	2	3	4		1	2	3		1	2	3	4			
1984	1	XX	--	--	0	1994	1	XX	3,1	28	1998	1	XX	11	5,83	--
	2	--	XX	0,1	--		2	--	XX	--		2	--	XX	--	--
	3	3	3,2	XX	2,1		3	0,2	3	XX		3	3,2	2,86	XX	0
	4	0,1	0	2,5	XX		4	0,3	0	23,6		4	0,5	0,13	21,7	XX
	5	--	--	0,3	--		5	--	--	100		5	--	--	--	--
	6	--	--	44	--		6	100	--	--		6	--	--	--	--

Tabela 2 – Transições encontradas na sub-bacia do lago paranoá por período.

	1994						1998						2009						
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5		1	2	3	4			
1984	1	XX	--	100	--	--	1994	1	XX	99,5	0,3	0	--	1998	1	XX	--	--	--
	2	--	XX	2	0,2	0,1		2	--	XX	1	0	--		2	--	XX	--	--
	3	0,4	13	XX	0,3	1,1		3	0,1	15	XX	0	--		3	11	31,1	XX	0,4
	4	--	7,7	24	XX	8		4	--	7,87	43	XX	--		4	2,5	18,9	24,7	XX
	5	--	0,7	2,8	0,2	XX		5	--	1,32	5,5	1	XX		5	--	--	--	--
	6	--	6,9	66	0,6	--		6	--	1,28	9,3	--	--		6	12	4,75	10,4	--

Tabela 3 – Transições encontradas na sub-bacia do ribeirão do gama por período. Tabela 4 – Variáveis estáticas.

	1994							1998					2009					
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4		1	2	3	4		
1984	1	--	32	--	--	#	1994	1	--	22	4	0,3	1998	1	--	7,44	13,7	--
	2	--	--	--	--	--		2	--	--	--	--		2	--	--	--	--
	3	6,6	2,3	--	0,1	--		1	0,77	4,6	0,3	3		3,1	6,47	--	0	
	4	1,5	1	27	--	--		4	1	2	#	4		0,8	3,1	10,7	--	
	5	--	35	10	--	--		5	--	--	#	5		--	--	--	--	
	6	2,6	--	25	--	--		6	--	--	#	6		50	--	49,9	--	

matriz de parâmetros de transição que inclui *Mean Patch size*, *Patch size variance*, e *isometry*. Na função *Expander*, a probabilidade de transição espacial de células *i* para células *j* depende da quantidade de células do tipo *j* em torno de um tipo de célula *i* (SOARES-FILHO, et al., 2009).

Com a inserção deste novo operador, é preciso estabelecer a quantidade de mudança que deve ser considerada para cada tipo de função de transição. Qual a taxa que deve ser considerada para a criação de novas manchas e qual a taxa que deve ser considerada para a expansão das

categorias já existentes (SOARES-FILHO et al., 2009). Para isso, é incluído no modelo o *Modulate Change Matrix*.

A escolha dos parâmetros estabelecidos nesta etapa para o *Patcher* e para o *Expander*, assim como a quantidade de mudança que deve ir para cada um deles, foi realizado por meio de tentativa e erro até se obter o melhor resultado de simulação. Esses valores são apresentados na tabela 7.

Esses valores podem ser alterados para cada transição encontrada. Neste trabalho, pelo fato do grande número de transições trabalhadas,

principalmente nas sub-bacias do Lago Paranoá e Ribeirão do Gama, optou-se por padronizar os valores para todas as transições, com exceção do valor do parâmetro *Mean Patch Size* do *Expander* nas sub-bacias do Ribeirão do Gama e Lago Paranoá. Esse parâmetro foi estabelecido de acordo com as tabelas 8 e 9, tendo como base o número de células que sofreram transição.

Os resultados desta etapa são apresentados por meio dos mapas de uso e ocupação final simulado para o ano de 2009 disponíveis nas figuras 2, 3 e 4. Pode se observar, quando comparados ao mapa real de uso e ocupação de 2009, que os padrões de transição alcançados foram bem próximos, seguindo a tendência de transição das sub-bacias tanto para a localização das mudanças quanto para a estrutura da paisagem. Assim, o modelo mostrou sua capacidade em expor as

Tabela 4 – Variáveis estáticas.

Variáveis estáticas	Unidades Hidrográficas		
	Bananal	Lago Paranoá	Ribeirão do Gama
Estradas/vias		x	x
Drenagem	X	x	x
Solos	X	x	x
Área protegida	X		
PDOT		x	x
Lago		x	

Tabela 5 – Parâmetros de transição.

	<i>Mean patch size</i>	<i>Patch size variance</i>	<i>Patch isometry</i>
Bananal	5	5	1,5
Lago Paranoá	10	1	2
Ribeirão do Gama	20	5	2

Tabela 6 – Índices de similaridade.

	First Mean	Second Mean
Bananal	0,46319	0,40509
Lago Paranoá	0,64207	0,65728
Ribeirão do Gama	0,4266	0,39932

Tabela 7 – Parâmetros de transição.

Unidades	<i>Modulate</i>	<i>Expander</i>			<i>Patcher</i>		
		<i>Mean Patch size</i>	<i>Patch size variance</i>	<i>isometry</i>	<i>Mean Patch size</i>	<i>Patch size variance</i>	<i>Isometry</i>
Bananal	0,2	5	10	1	5	25	1,5
Lago Paranoá	1	*	10	1,5	1	0	1
Ribeirão do Gama	0,8	**	10	1,5	1	0	1

\* valores definidos na tabela 8

\*\* valores definidos na tabela 9

Tabela 8 – Parâmetros de transição na sub-bacia do Lago Paranoá.

Classes	1	2	3	4
3	320	915	XXXX	10
4	30	25	30	XXXX
6	15	7	15	--

Tabela 9 – Parâmetros de transição na sub-bacia do Ribeirão do Gama.

Classes	1	2	3	4
1	XXXX	42	80	--
2	--	XXXX	60	--
3	280	590	XXXX	20
4	40	15	52	XXXX
6	56	--	56	--

tendências de ocupação podendo ser usado para construção de cenários futuros.

### 6.3 Construção de Cenários de Tendência Histórica

Nesta etapa, foram elaborados os cenários de tendência histórica, que consideram as transições em taxas fixas, projetando-as para o futuro. Dessa forma, esses cenários partem da calibração obtida para simulação do cenário de 2009, mantendo todos os parâmetros utilizados inalterados.

Segundo Almeida (2003), deve-se evitar o prognóstico de longo prazo pelo fato de que as mudanças são dificilmente previsíveis para grandes períodos por sofrer influência de setores como a economia, dentre outros. Para a autora, apenas o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e tomada de decisão.

Ainda segundo a autora, quanto à delimitação de horizontes de projeção, não existem definições oficiais com relação a curto e médio prazo para fenômenos de mudanças de uso do solo urbano.

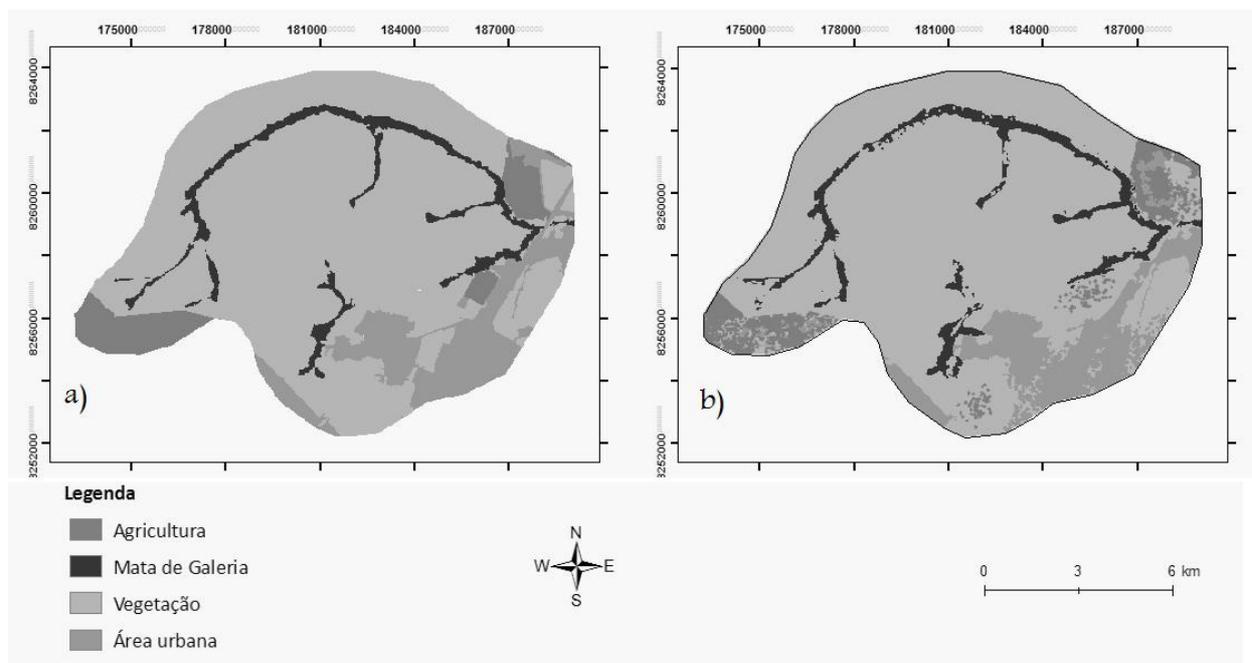


Fig. 2 – Simulação do uso e ocupação de 2009 na sub-bacia do Bananal; a) mapa de uso final real; b) mapa de uso final simulado.

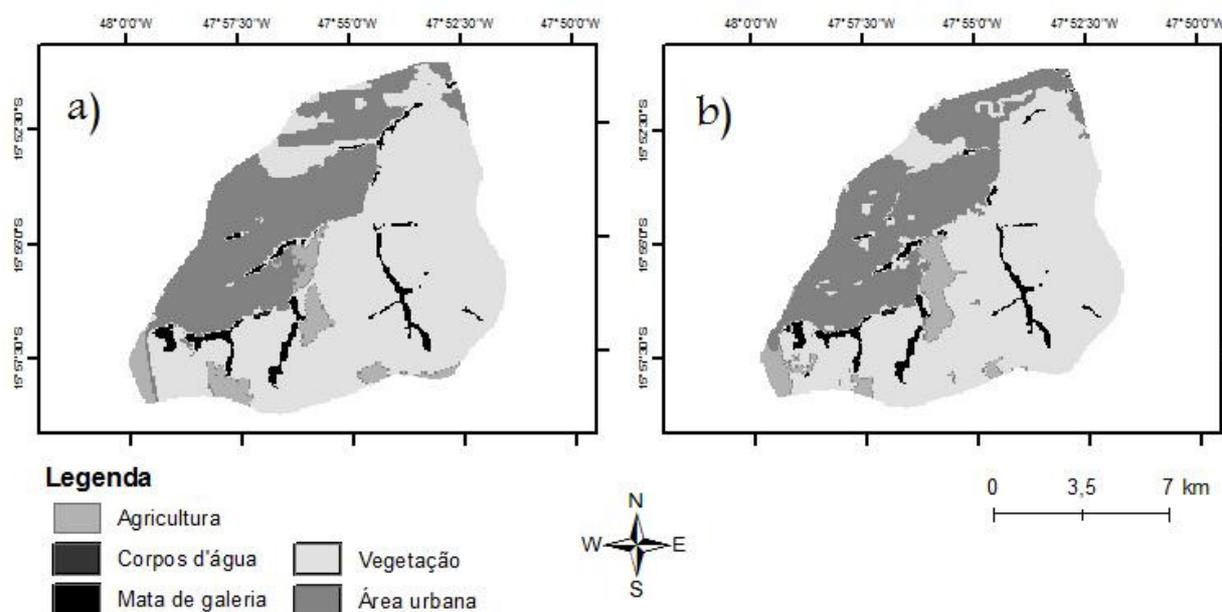


Fig. 3 – Simulação do uso e ocupação de 2009 na sub-bacia do Ribeirão do Gama; a) mapa de uso final real; b) mapa de uso final simulado

Ela define como curto prazo um período de até cinco anos e médio prazo entre cinco e dez anos.

Assim, considerou-se para curto prazo um período de 5 anos e para médio prazo um período de 11 anos, sendo então estabelecida para os anos de 2014 e 2020. O período estabelecido para longo prazo extrapolou em um ano o estabelecido por Almeida (2003). Esse prazo foi estabelecido considerando o resultado positivo da construção do

cenário para o ano de 2009 – etapas anteriores – que utilizou um prazo de interação de 11 anos.

Os cenários obtidos são apresentados nas figuras 5, 6 e 7.

Os cenários simulados mostraram a tendência de ocupação levando em consideração as taxas de transição validadas para o período anterior. Devemos ter em mente que esse período (1998 a 2009) foi marcado por uma grande explosão na

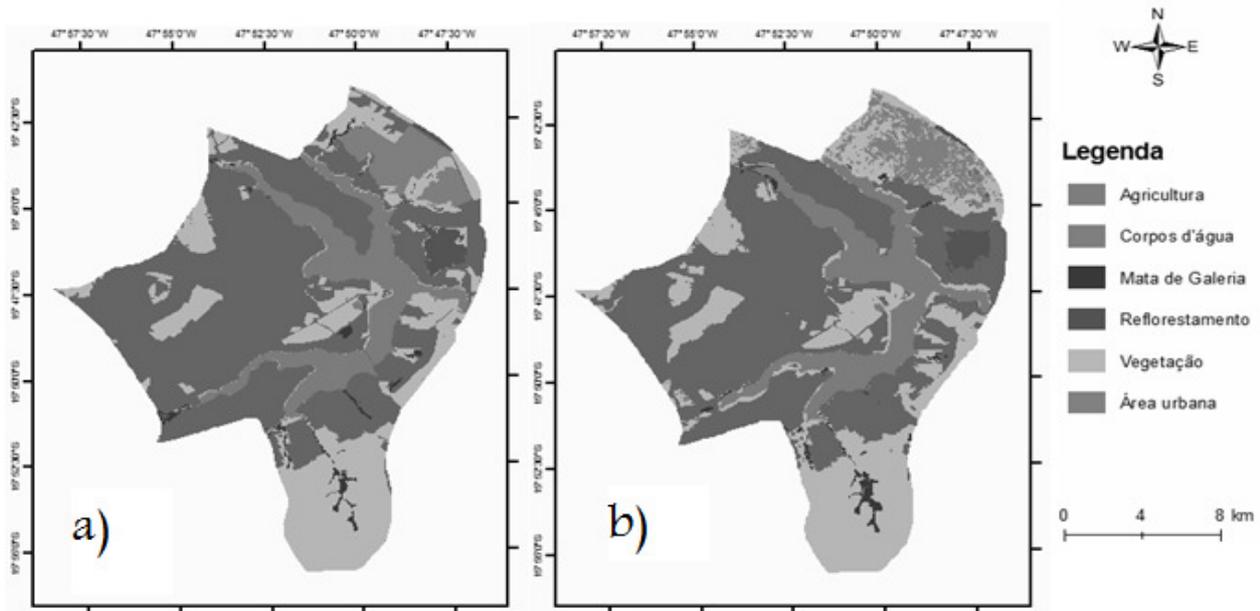


Fig. 4 – Simulação do uso e ocupação de 2009 na sub-bacia do Lago Paranoá. a) mapa de uso final real; b) mapa de uso final simulado.

ocupação das terras do DF. O modelo atribuiu ao cenário de tendência histórica essa mesma taxa, alocando as transições nas faixas mais favoráveis a elas.

Caso essa taxa de ocupação ou transição do solo do DF seja constante, áreas como os arredores do aeroporto, na sub-bacia do Ribeirão do Gama e os parques ecológicos, como o de Burle Max na sub-bacia do Lago Paranoá sofreriam com a ocupação urbana logo em 2014.

Em 2020, de acordo com a classificação do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do DF de 2009, praticamente toda a Zona de Uso Controlado I, na sub-bacia do Ribeirão do Gama estaria ocupada, levando a expansão da mancha urbana à ocupar áreas inseridas na Macrozona de Proteção Integral. A expansão da mancha rural, nessa mesma sub-bacia permaneceria dentro dos limites estabelecidos pelo PDOT na Zona Rural de Uso Controlado.

Na sub-bacia do Lago Paranoá, a área de Proteção integral, estabelecida pelo PDOT, e que corresponde à Estação Ecológica do Jardim Botânico permaneceria inalterada até o ano de 2020. Outras áreas de proteção como os parques ecológicos passariam a sofrer ocupação para suportar as altas taxas de transição da mancha urbana e rural.

Já na Bacia do Bananal, as taxas de transição no período de 1998 a 2009 foram mais baixas, mas,

seguindo essa tendência, grande parte da área fora daquele pertencente à Floresta Nacional de Brasília estaria sujeita a expansão das manchas urbana e rural.

Deve-se levar em consideração que nenhum sistema é fechado e ele sofre influências externas. A simulação da dinâmica do uso do solo, neste trabalho considerou as transições fechadas dentro de cada sub-bacia. Deve-se atentar para o fato de que a ocupação do DF se dá em diversas áreas do seu território, assim, as taxas de transição consideradas para o futuro poderiam ser projetadas para áreas fora das bacias e mais adequadas à ocupação. Não resultando necessariamente na saturação do território, como pode se perceber nas simulações dos cenários futuros, principalmente das sub-bacias do Lago Paranoá e Ribeirão do Gama no ano de 2020.

Assim, embora o nível alcançado na simulação seja considerado satisfatório, melhores resultados com relação à representação da realidade poderão ser obtidos se a modelagem for realizada abrangendo uma área maior, seja a totalidade da bacia ou ainda toda a área do DF. Para tanto, deve-se ter em vista que a complexidade do modelo tende a aumentar com o número de variáveis e transições no uso do solo.

De qualquer forma, os resultados encontrados apontam para a importância de uma política de uso e ocupação mais rígida na região, observando as

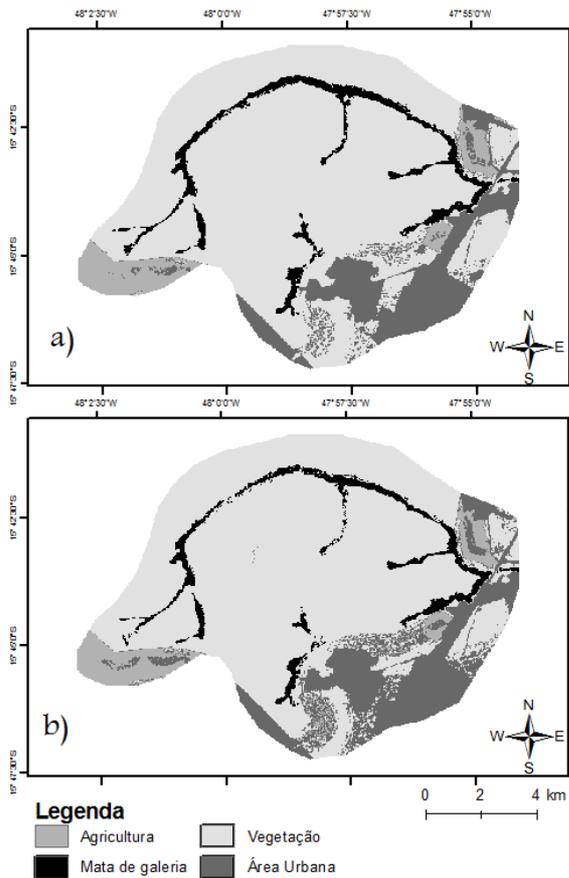


Fig. 5 – Cenários de tendência histórica para a sub-bacia do Bananal em 2014 (a) e 2020 (b).

normas ambientais e a capacidade do meio em absorver a demanda por infra-estrutura, abastecimento, educação dentre outros.

Assim, estudos como esse servem para alertar os tomadores de decisão nas estratégias de crescimento das cidades.

## 7. CONCLUSÕES

As principais transições ocorreram no sentido de urbanização do território com as transformações de áreas agrícolas e de vegetação (campo, cerrado e solo exposto) para área urbana, confirmando a tendência de crescimento urbano do DF. É importante destacar que grande parte da transição para área urbana ocorre diretamente, ao contrario do esperado, que é de vegetação para agricultura e daí então para área urbana. Também foi possível observar a perda de áreas de reflorestamento para agricultura e em menor grau para área urbana. O método utilizado, a matriz de transição, se mostrou eficiente no levantamento dessas mudanças.

O *software* Dinamica EGO se mostrou uma excelente ferramenta na modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo, sendo eficiente

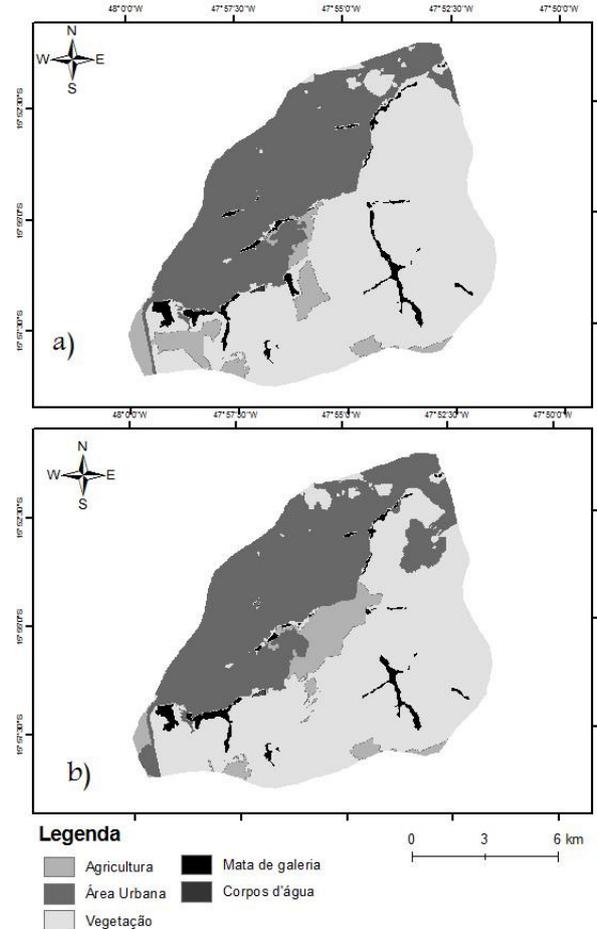


Fig. 6 – Cenário de tendência histórica para a sub-bacia do Ribeirão do Gama em 2014 (a) e 2020 (b).

no desenvolvimento de cenários de tendência histórica. A metodologia aplicada ao Dinamica EGO permitiu simular cenários de curto e médio prazos, o que permite ao usuário final uma clara dimensão dos processos inseridos em cada unidade. Faz com que o usuário, seja ele o tomador de decisão ou não, tenha noção, não somente dos processos atuais, mas dos processos históricos passados e como esses podem afetar o futuro.

As simulações futuras para cada unidade mostraram que a continuidade do processo de ocupação de tais bacias pode acarretar uma saturação do território em 2020. Recomenda-se que para trabalhos futuros seja trabalhado uma extensão maior da bacia, e que sejam inseridas mais variáveis como as relacionadas à aspectos demográficos, sociais e econômicos que possam ajudar a explicar melhor as transições.

De qualquer forma, trabalhos como este aqui desenvolvido é de considerável importância para uma melhor prática de planejamento urbano.

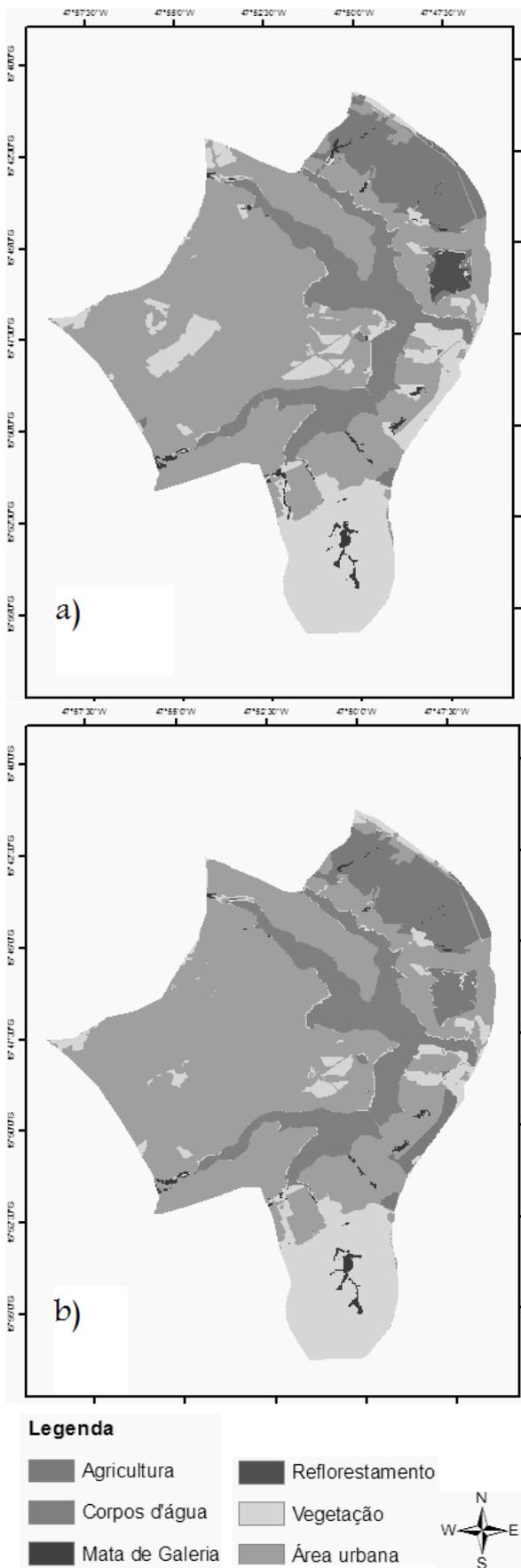


Fig. 7 – Cenário de tendência histórica para a sub-bacia do Lago Paranoá. a) 2014; b) 2020

Permitindo ao tomador de decisão visualizar as tendências de uso da região e controlá-las por meio de medidas públicas adequadas, dando especial atenção à proteção de áreas de interesse ambiental, a fim de assegurar uma qualidade de vida e condições favoráveis às futuras gerações. E da mesma forma, identificar as áreas mais favoráveis ao desenvolvimento de determinada atividade, seja ela de cunho social, econômico ou ambiental.

Assim, espera-se que os resultados deste estudo contribuam com o desenvolvimento de políticas públicas e pesquisas voltadas ao uso e ocupação do solo. Principalmente quanto à expansão urbana na Bacia do Lago Paranoá e que possa servir de subsídio para elaboração de cenários e identificação de mudanças no uso do solo em toda a extensão da Bacia hidrográfica do Lago Paranoá e em outras unidades hidrográficas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALMEIDA, C. M.; 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 DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 11., 2005, Salvador. 2005. **Anais...** Salvador: ANPUR, 2005. 21p.

ALMEIDA, C. M. O diálogo entre as dimensões real e virtual urbano. In.: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Geoinformação em Urbanismo: Cidade Real x Cidade Virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p19-33.

BARBO, L. C. A ocupação do solo no Distrito Federal. **Revista de Conjuntura do Corecon-DF**. Brasília, n. 7, 2001. p. 20-24.

BARROS, A. M. F. B.; CARVALHO, C. S.; MONTANDON, D. T. **O Estatuto da Cidade Comentado** (Lei Nº 10.257 de 10 de julho de

- 2001). 2010. Disponível em: <<http://www.conselhos.mg.gov.br/>>. Acesso em: 08 mar. 2011.
- BATTY, M.; XIE, Y.; SUN, Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.23, p.205–233, 1999.
- BATTY, M. Geomatics in urban and regional planning challenges & perspectives. In.: ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.) **Geoinformação em Urbanismo: Cidade Real x Cidade Virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 6-11.
- BENEDETTI, A. C. P. **Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul**. 2010. 167f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria., 2010.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.
- BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Clarendon Press, 1998. 333p.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução à modelagem dinâmica espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11 Belo Horizonte, INPE, 2003. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2003. p. 1687-1694.
- CARDOSO, E. S.; FONSECA, F. O.; SANTOS, R. M. D. B. Vulnerabilidade das áreas protegidas. In: FONSECA, F. O. **Olhares sobre o Lago Paranoá**, 1ª Ed. Brasília – DF: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, 2001. p. 228-242
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher. 236p. 1999.
- DELANEZE, M. E.; RIEDEL, P. S.; MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. V.; BENTZ, C. M. Modelagem espacial utilizando autômato celular aplicada à avaliação das mudanças do uso e cobertura da terra no entorno da faixa de dutos Rio de Janeiro – Belo Horizonte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., Curitiba, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p.5909-5916, 2011.
- DISTRITO FEDERAL (Brasil). Câmara Legislativa do Distrito Federal. **Lei nº 353, de 18 de novembro de 1992**. Aprova o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal, institui o Sistema de Planejamento Territorial e Urbano do Distrito Federal e dá outras providências. 1CD
- DISTRITO FEDERAL (Brasil). Lei Complementar nº 17, de 28 de janeiro de 1997. Aprova o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal - PDOT e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, 29 janeiro 1997. Disponível em: <<http://www.sedhab.df.gov.br/sites/300/379/00001416.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2011.
- DISTRITO FEDERAL (Brasil). Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009. Aprova a revisão do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT e dá outras providências. **Diário Oficial do Distrito Federal**, 27 abril 2009. Disponível em: <<http://www.cl.df.gov.br/>>. Acesso em: 08 mar. 2011.
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Planning for sustainable use of land resources. **FAO Land and Water Bulletin**, 2. Roma: FAO, 1995. 67p.
- FERRARI, R. **Modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra da Quarta Colônia, RS**. 2008. 130f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- FERRANTE, J. E. T.; RANCAN, L.; BRAGANETTO, P. Meio físico. In: FONSECA, F. O. **Olhares sobre o Lago Paranoá**, 1ª Ed. Brasília – DF: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, SEMARH, 2001. p. 44-79.
- FRANÇA, K.; VIANA, R. Brasília: a imposição da utopia. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, 16., Porto Alegre, 2010. **Anais...** Porto Alegre: AGB, 2010. 12p
- GDF. Companhia Imobiliária de Brasília. **Estudo de impacto ambiental – EIA: Zona de expansão**

- urbana da cidade satélite de Brazlândia – RAIV. Vol II. Brasília: ENGEA, 1991.
- GODOY, M. M. G. **Modelagem da dinâmica intra-urbana no Bairro Savassi, Belo Horizonte**. 2004. 84f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- 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.
- JAMES, D. J. G.; HUNTLEY, I. D. Some aspects of the processes of mathematical models. In: **Mathematical Modeling** – a source book of case studies. Londres: Elsevier, 1990. p. 1-17.
- MENEZES, P. H. B. J. **Avaliação do efeito das ações antrópicas no processo de escoamento superficial e assoreamento na Bacia do Lago Paranoá**. 2010. 117f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.
- MENEZES JUNIOR, A.; SINOTI, M. L.; SARAIVA, R. C. F. II – Histórico. In: FONSECA, F. O. **Olhares sobre o Lago Paranoá**. 1ª Ed. Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH, 2001. p. 25-43.
- RAMOS, A. E.; NÓBREGA, M. G. G.; CARDOSO, E. S. Vegetação, flora e unidades de conservação na Bacia do Lago Paranoá. In: FONSECA, F. O. **Olhares sobre o Lago Paranoá**. 1ª Ed., Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH, 2001. p. 85-110.
- RODRIGUES, H.O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. Florianópolis, 2007. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3089-3096.
- SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C.; CERQUEIRA, G. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v.154, p. 217-234, 2002.
- SOARES-FILHO, B. S.; CORRADI-FILHO, L.; CERQUEIRA, G. C.; ARAUJO, W. L. Simulating the spatial patterns of change through the use of the dinamica model. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11.. Belo Horizonte, 2003. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. p. 721-728.
- SOARES, F. S.; ALVES, F. Análise multitemporal do desenvolvimento urbano do Distrito Federal. ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 14., Caxambú (MG), 2004. **Anais...** Caxambu: ABEP, 2004. 15p
- SOARES-FILHO, B. S; RODRIGUES, H.; LELLES, W. **Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO**. 1ª ed., v.1, Belo Horizonte: UFMG, 2009. 115p.
- TRENTIN, G. **A expansão urbano-industrial do município de Americana - SP: geotecnologias aplicadas à análise temporal e simulação de cenários**. 2008. 236f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro (SP), 2008.
- TRENTIN, G.; FREITAS, M. I. C. Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62, Ed. Especial 01, 2010. p.291-305.
- UNESCO. **Vegetação do Distrito Federal**. Tempo e espaço: uma avaliação multitemporal da perda de cobertura vegetal no DF e da diversidade florística. 2ª ed., Brasília: UNESCO, 2002. 80p.
- VALENTIN, E. F. D. **Modelagem da dinâmica de perdas de solo: o caso do Alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto – DF/GO**. 2008. 149f. Tese (Doutorado em Geologia). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2008.