



Revista Cerrados (Unimontes)
ISSN: 1678-8346
ISSN: 2448-2692
revista.cerrados@unimontes.br
Universidade Estadual de Montes Claros
Brasil

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PROSPECTIVO DE MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA NA SUB-BACIA DO RIO CAPIVARA, BOTUCATU - SP, POR MEIO DE MODELAGEM ESPACIAL DINÂMICA

Pisani, Rodrigo José; Demarchi, Julio Cesar; Riedel, Paulina Setti

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PROSPECTIVO DE MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA NA SUB-BACIA DO RIO CAPIVARA, BOTUCATU - SP, POR MEIO DE MODELAGEM ESPACIAL DINÂMICA

Revista Cerrados (Unimontes), vol. 14, núm. 2, 2016

Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576960996002>

DOI: <https://doi.org/10.22238/rc24482692v14n22016p03a29>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



Este trabalho está sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Não Derivada 4.0 Internacional.

SIMULAÇÃO DE CENÁRIO PROSPECTIVO DE MUDANÇAS NO USO E COBERTURA DA TERRA NA SUB-BACIA DO RIO CAPIVARA, BOTUCATU - SP, POR MEIO DE MODELAGEM ESPACIAL DINÂMICA

PROSPECTIVE SCENARIO OF LAND USE AND LAND
COVER CHANGE AT RIO CAPIVARA WATERSHED,
MUNICIPALITY OF BOTUCATU, SÃO PAULO
STATE, THROUGH DYNAMIC SPATIAL MODELING

SIMULACIÓN DE ESCENARIO PROSPECTIVO DE
CAMBIO DEL USO Y COBERTURA DE LA TIERRA EN
LA SUB-CUENCA DEL RÍO CAPIVARA, BOTUCATU-
SP, POR MODELAJE ESPACIAL DINAMICA

Revista Cerrados (Unimontes), vol. 14,
núm. 2, 2016

Universidade Estadual de Montes Claros,
Brasil

Recepção: 19 Novembro 2016
Aprovação: 04 Dezembro 2016

DOI: [https://doi.org/10.22238/
rc24482692v14n22016p03a29](https://doi.org/10.22238/rc24482692v14n22016p03a29)

Redalyc: [https://www.redalyc.org/
articulo.oa?id=576960996002](https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=576960996002)

Rodrigo José Pisani pisanigeo@gmail.com

Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL, Brasil

Julio Cesar Demarchi julio.demarchi@gmail.com

*Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP,
Brasil*

Paulina Setti Riedel psriedel@rc.unesp.br

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Brasil

Resumo: Existem várias abordagens metodológicas com o intuito de modelar as mudanças do uso e cobertura da terra de determinada região, dentre as quais se destacam aquelas que relacionam essas mudanças a diversas variáveis da paisagem de maneira integrada como as rochas, os solos, o relevo, a drenagem, entre outros. Esta pesquisa teve como objetivo elaborar uma modelagem espacial dinâmica para o monitoramento e predição das mudanças de uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, município de Botucatu - SP, Brasil, utilizando imagens de satélite (Landsat 5 TM), cartas topográficas, os programas ENVI 4.7, ArcGIS 10, Spring 5.1 e a plataforma do Dinamica EGO. Primeiramente foram elaborados os mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1988, 1997 e 2007. Posteriormente, o modelo do Dinamica EGO foi calibrado a partir do método de Pesos de Evidência a partir da análise e comparação dos mapas reais e simulados, e validado pelo método de decaimento exponencial a partir do índice de similaridade fuzzy. Com isso foi simulado um cenário de uso e cobertura da terra da área estudada para o ano de 2017. Os resultados mostraram, a partir dos métodos usados, por exemplo, regiões de decréscimo nas áreas de pastagem, que deram lugar à classe silvicultura até 2007, a qual tende a ultrapassar em área a classe de mata nativa no cenário de 2017. Conclui-se que o modelo Dinamica EGO pode auxiliar fortemente no monitoramento das mudanças do uso e cobertura da terra no contexto da sub-bacia. Além disso, a metodologia proposta pode ser utilizada para a construção de cenários probabilísticos e, com isso, predizer diagnósticos e estratégias no planejamento do uso da terra.

Palavras-chave: Pesos de Evidência, autômatos celulares, similaridade fuzzy.

Abstract: There are several modeling approaches to model land use and land cover changes of a given region, which can, for example, analyze and evaluate several landscape variables based on integrated approaches (i.e. lithology, soil, relief and drainage). The aim of this research was to test the applicability of the Dinamica EGO model for simulating and evaluating scenarios of land use and land cover changes in Capivara river watershed, municipality of Botucatu, São Paulo State, Brazil. Using satellite images (Landsat 5 TM), topographic maps and the softwares ENVI 4.7, ArcGIS 10, Spring 5.1 and Dinamica EGO platform. Firstly, land use and land cover maps for the years 1988, 1997 and 2007 were produced. Secondly, the Dinamica EGO model was calibrated by the analysis and comparing the real and simulated maps, so it was validated by the use of exponential decay method by means of fuzzy similarity index. Finally, using the validated model, a scenario for this watershed for the year 2017 was built. Results showed, from used method, for example, a decrease in grasslands areas and its substitution by reforestation until 2007, that tends to overtake native forest class in the simulated map of 2017. As a conclusion, the Dinamica EGO model can strongly aid in the monitoring of land use and land cover change in the context of watershed. In addition, the proposed methodology can be used to build probabilistic scenarios and, consequently, predict diagnoses and strategies for land use planning.

Keywords: Weights of Evidence, cellular automata, fuzzy similarity.

Resumen: Varios abordajes metodológicos tienen el intento de modelar los cambios en el uso y cobertura de la tierra de una región y entre ellos se destacan los que relacionan estos cambios a diversas variables del paisaje de una manera integrada, como las rocas, los suelos, el relieve, el drenaje, entre otros. Esta investigación tuvo como objetivo elaborar un modelaje espacial dinámico para el monitoreo y la predicción de los cambios de uso y cobertura de la tierra en la subcuenca del río Capivara, ciudad de Botucatu – SP, Brasil, utilizando imágenes satelitales (Landsat 5 TM), cartas topográficas, los programas ENVI 4.7, ArcGIS 10, Spring 5.1 y la plataforma Dinamica EGO. En primer lugar, se produjeron los mapas de uso y cobertura de la tierra de los años 1988, 1997 y 2007. Enseguida, se calibró el modelo Dinamica EGO a partir del análisis e comparación entre los mapas reales y simulados, y se lo validó por el método de decaimiento exponencial a partir del índice de similitud fuzzy. Por último, se generó un escenario de uso y cobertura de la tierra del área de estudio para el año 2017. A partir de los métodos usados, los resultados mostraron, por ejemplo, regiones de disminución de las áreas de pastos, que fueron reemplazadas por la silvicultura en 2017, categoría que tiende a superar en área las forestas nativas en el escenario de 2017. Se concluye con este estudio que el modelo Dinamica EGO puede ser de gran ayuda en el monitoreo de los cambios en el uso y cobertura de la tierra en el contexto de subcuenca. Además, se puede utilizar la metodología propuesta para la construcción de escenarios probabilísticos y, a partir de ellos, predecir diagnósticos y estrategias para la planificación del uso de la tierra. Palabras clave: Pesos de Evidencia; autômatas celulares; similitud fuzzy.

INTRODUÇÃO

O uso e a cobertura da terra têm influência direta na configuração dos fenômenos ambientais, como os processos hidrológicos, os relacionados à erosão do solo, à conservação dos recursos naturais, aos elementos climáticos, entre outros, sem considerar sua importância política, econômica e social. Neste contexto, a análise temporal do uso e cobertura da terra e a simulação de cenários futuros são de fundamental importância nos estudos acadêmicos e aplicados, para fins de planejamento da ocupação do espaço urbano e rural e da mitigação dos impactos ambientais negativos, muito comuns nos últimos anos. A predição de

cenários futuros de uso e cobertura da terra a partir dos usos atuais e pretéritos pode ser facilitada pelo uso da modelagem matemática.

De acordo com Zhang et al. (2009), a elaboração de cenários para mudanças no uso e cobertura da terra pode fornecer subsídios para um planejamento estratégico por parte de prefeituras e órgãos competentes, visando prevenir os possíveis fatores responsáveis, principalmente os relacionados a atividades de ordem antrópica. No mundo real, os processos ambientais são tipicamente tridimensionais, dependentes do tempo e complexos (STEYAERT, 1993). Comportamentos não lineares, componentes estocásticos e retroalimentações em múltiplas escalas de tempo e de espaço podem ser incluídos nessa escala de análise (BONHAM-CARTER, 1994). Na modelagem matemática, as propriedades ambientais são tratadas como variáveis do modelo, enquanto suas inter-relações são representadas por operações aritméticas ou lógicas (Briassoulis, 2000; VILLA-VIALANEIX et al., 2012).

Os modelos que consideram os processos da natureza resultantes de interações espaço-temporais com as relações complexas entre os diversos elementos que os compõem, analisando mecanismos causais e processos de desenvolvimento dos sistemas ambientais, têm recebido cada vez mais atenção por parte dos pesquisadores e têm se tornado uma promissora ferramenta de análise (MAS et al., 2014; PATHIRANA et al., 2014). O acesso e o entendimento das ferramentas de análise das mudanças no uso e cobertura da terra são tão importantes quanto o entendimento das complexas relações dos processos que determinam essas mudanças (PÉREZ-VEGA et al., 2012).

Atualmente, a elaboração de mapas estáticos de uso e cobertura da terra não mais atende à necessidade de gestores locais, sendo necessário que se forneçam simulações de diferentes cenários futuros (ALMEIDA e GLERIANI, 2007). Neste contexto inserem-se os modelos espaciais dinâmicos, que são utilizados principalmente para a modelagem espaço-temporal de processos, especialmente os físicos e os de planejamento urbano-regional (ALMEIDA e GLERIANI, 2007; SUAREZ e SOARES-FILHO, 2013). Esses modelos têm como característica principal a facilidade com que são utilizados na descrição da dimensão espacial, bem como o fato de tentarem abordar o sistema como um todo.

A modelagem espacial dinâmica é usada, entre outras finalidades, para o entendimento das alterações do uso e cobertura da terra, possibilitando, ainda, a realização de simulações de mudanças na paisagem como potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrerem em uma região (ALMEIDA, 2003; DELANEZE, 2011; GONÇALVES et. al., 2011; MAEDA et. al., 2011; DIAS e WALDE, 2013).

Inserido neste contexto, este trabalho teve como objetivo modelar as mudanças do uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, município de Botucatu (SP), nos períodos de 1988 a 1997 e 1997 a 2007, e simular cenários prospectivos para 2017 a partir da abordagem da

Modelagem Espacial Dinâmica, por meio da plataforma Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objects).

A escolha das referidas datas se deu principalmente por se verificar que este período retrata o fenômeno da expansão de monoculturas como a citricultura e a silvicultura (eucalipto) em lugar de pastagens degradadas na área de estudo. A projeção de cenários futuros de médio prazo para 2017 constitui importante ferramenta de apoio para o planejamento do uso da terra. Define-se como médio prazo a modelagem de cenários prospectivos com não menos do que cinco e não mais do que dez anos, pois cenários de longo prazo estão altamente sujeitos a imprecisões pelas mudanças na dinâmica do uso e cobertura da terra (ALMEIDA, 2003).

O programa Dinamica EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto - CSR da Universidade Federal de Minas Gerais, é um programa que utiliza um modelo com base no paradigma de autômatos celulares, implementado por meio de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo, e a natureza de sua interface gráfica baseia-se na teoria de grafos direcionados (SOARES-FILHO et al., 2009).

Os modelos de autômatos celulares (AC), considerados como uma categoria de modelos dinâmico-espaciais, correspondem a mecanismos compostos por conjuntos de células que imprimem determinados movimentos, assemelhando-se a seres animados (SOARES-FILHO et al., 2004). Os operadores responsáveis pela realização das tarefas são chamados de funtores. Cada functor é responsável pela execução de uma tarefa específica, incluindo operadores de álgebra cartográfica, tais como cálculo de mapa de custo, sorteio de pontos mais prováveis para a ocorrência de um determinado fenômeno, cálculo de caminho de menor custo e cálculo de mapas usando de expressões lógicas e aritméticas (SOARES-FILHO et al., 2009).

ÁREA, MATERIAIS E MÉTODOS

Localização da área

A área de estudo pertence à sub-bacia do rio Capivara, localizada no município de Botucatu (SP), região centro-oeste paulista, distante 220 km da capital São Paulo, que compreende a área total de 222,18 km² (Fig. 1). O rio Capivara é um dos mais importantes afluentes da margem esquerda da bacia do rio Tietê e sua sub-bacia foi selecionada por apresentar atributos naturais que merecem atenção, tais como seu relevo peculiar, constituído pela formação de Cuesta de declividades elevadas em seu front; a fragilidade de seus solos, além da importância de seu manancial com aptidão potencial de abastecimento de água para a região e por se inserir em uma importante área de recarga do aquífero Guarani.

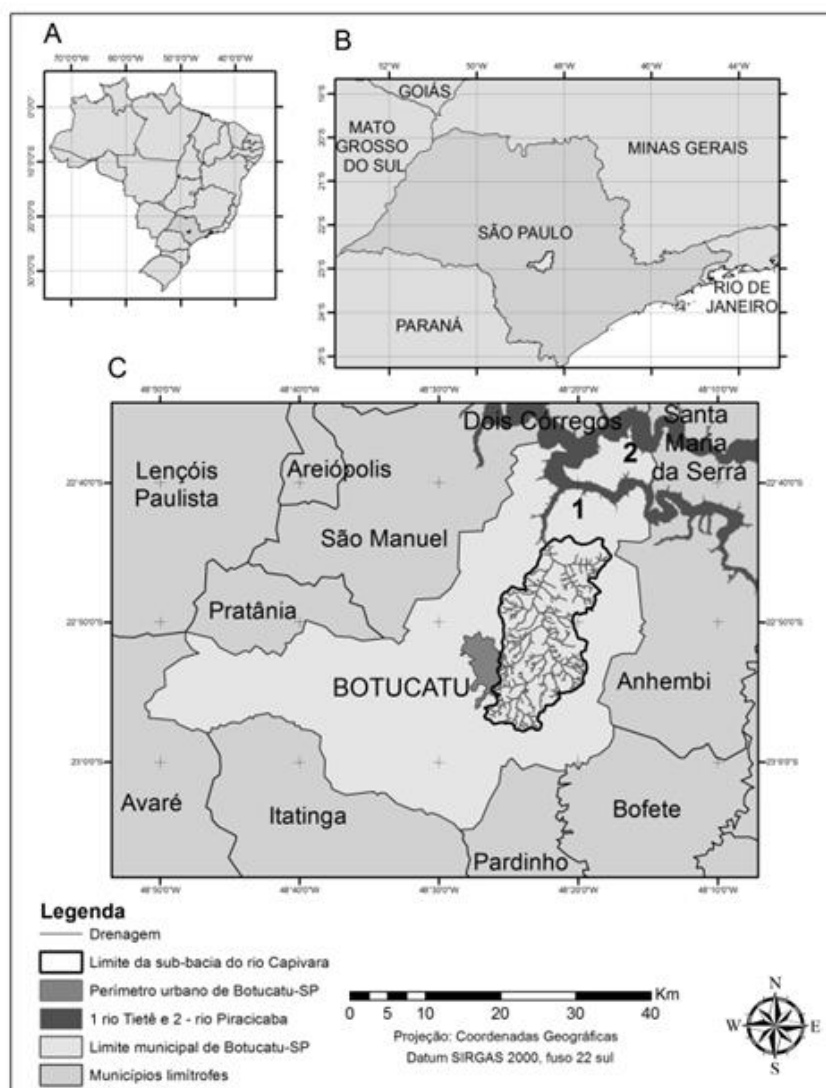


Figura 1

Mapa de localização. A e B: município da área de estudo no Brasil e estado de São Paulo; C: Sub-bacia do rio Capivara com perímetro urbano de Botucatu e municípios limítrofes IBGE, (2014). Organização: Pisani (2014).

A sub-bacia do rio Capivara compreende principalmente solos do tipo Latossolos Vermelhos distróficos a montante, Neossolos Litólicos nas regiões de frente de cuesta e Neossolos Quartzarênicos e Argissolos Vermelhos-Amarelos nas regiões de jusante, já na Depressão Periférica Paulista (PIROLI, 2002). Três compartimentos de relevo estão presentes na área de estudo, sendo eles: 1 - Planalto Ocidental Paulista, que compreende regiões mais altas e a montante da sub-bacia, onde estão os arenitos da Formação Marília; 2 - Frente de cuesta, com altas declividades e altitudes médias onde estão os arenitos da Formação Botucatu e rochas ígneas do tipo basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral; 3 - Depressão Periférica Paulista, com altitudes mais baixas, onde se destaca a presença do Neossolo Quartzarênico e, em menor parte, do Argissolo Vermelho e do Latossolo Vermelho distrófico, localizados os arenitos da Formação Pirambóia (ROSS E MOROZ, 1997). De acordo com a

classificação de Koppen o clima é classificado como mesotérmico, com estação mais seca no inverno, identificado como Cwa (MARTINS, 1989).

Materiais Elaboração dos mapas de uso da terra e variáveis espaciais utilizadas na modelagem

Para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra, foram utilizadas três imagens orbitais do satélite Landsat-5, sensor Thematic Mapper, órbita 220, ponto 076, resolução de 30 metros, dos anos de 1988, 1997 e 2007. A imagem de 1988 foi obtida pelo cadastro gratuito de imagens GLCF (Global Land Cover Facility), disponível em: <http://glcf.umiacs.umd.edu/research/portal/geocover>. Já as imagens de 1997 e 2007 foram obtidas a partir do cadastro de imagens gratuitas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponíveis em: <http://www.inpe.br>. As datas de passagem foram: 01/07/1988, 08/06/1997 e 20/06/2007. Todas as imagens foram registradas com base nas cartas topográficas do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo), utilizadas na pesquisa. O datum horizontal utilizado foi o SIRGAS 2000, fuso 22 sul.

Foram consideradas as seguintes classes de uso e cobertura da terra: 1 – Mata nativa; 2 – Pastagem; 3 – Área urbana; 4 – Cana de açúcar; 5 – Silvicultura; 6 – Citricultura. A interpretação das imagens para a obtenção dos dados de uso e cobertura da terra foi realizada por meio da técnica de segmentação, no software ENVI EX (RSI, 2009), a partir do módulo Feature Extraction, no qual são definidos os limiares de segmentação (scale level) e de união de segmentos com características parecidas (merge level).

Para uma melhor interpretação visual e rotulação dos polígonos, as imagens utilizadas foram contrastadas, utilizando-se uma função linear. As bandas utilizadas foram 3 (vermelho), 4 (infravermelho próximo) e 5 (infravermelho médio). Depois de contrastadas, gerou-se uma composição colorida das imagens no SIG ArcGIS 10 (ESRI, 2010) (função Composite bands) para ser utilizada como base das interpretações. Realizadas estas etapas, os polígonos obtidos na segmentação foram exportados para o SIG ArcGIS 10, no qual foram nomeados com as suas classes de uso e cobertura por meio de interpretação visual. O método visual de atribuição das classes de uso e cobertura dos diferentes polígonos é baseado inteiramente na experiência do intérprete, que extrai as informações de uso e cobertura da terra com base nas características das imagens como: textura, forma, tamanho e padrões, além das informações obtidas no campo.

A vetorização das curvas de nível foi feita por meio do SIG ArcGIS, a partir das rotinas de elaboração dos arquivos “feature class” em um geodatabase. Cada linha recebeu um atributo de altitude com equidistância vertical de 5 m e, posteriormente, foi elaborado o mapa de declividade da sub-bacia por meio de interpolação pelo método de Rede Triangular Irregular - TIN (Triangular Irregular Network). A partir das

cartas topográficas, foram elaborados também as redes de drenagens e o limite da sub-bacia.

Métodos

No período analisado (1997-2007) para a calibração do modelo as variáveis espaciais utilizadas, que mais ajudaram a explicar as dinâmicas das mudanças no uso e cobertura da terra foram: Altimetria (DEM - modelo digital de elevação do terreno, calculado a partir das curvas de nível das cartas do IGC de escala 1:10.000 e corrigido hidrologicamente com a ferramenta Fill do SIG ArcGIS); Declividade (ferramenta Slope do SIG ArcGIS); Distância às rodovias principais, vicinais e drenagens (elaborados por meio do cálculo da distância euclidiana - função Euclidian Distance) e mapa de solos, produzido por Piroli (2002). O mapa de 1988 foi considerado apenas para análise e representação multi temporal de um período anterior que, após somado com os períodos posteriores, apresenta uma multi temporalidade de 29 anos, ou seja 1988 – 2017 (simulação).

Entrada dos dados no Dinamica EGO

A modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra da sub-bacia do rio Capivara, cujas etapas são apresentadas de forma sumária na Figura 2, foi realizada para o período 1997-2007, a partir da construção da matriz de transição múltipla, na qual se buscou identificar as transições anuais de cada classe de cobertura da terra em valores de porcentagem anual de mudança. Com os parâmetros calibrados para essa transição, realizou-se então a simulação para 2017.

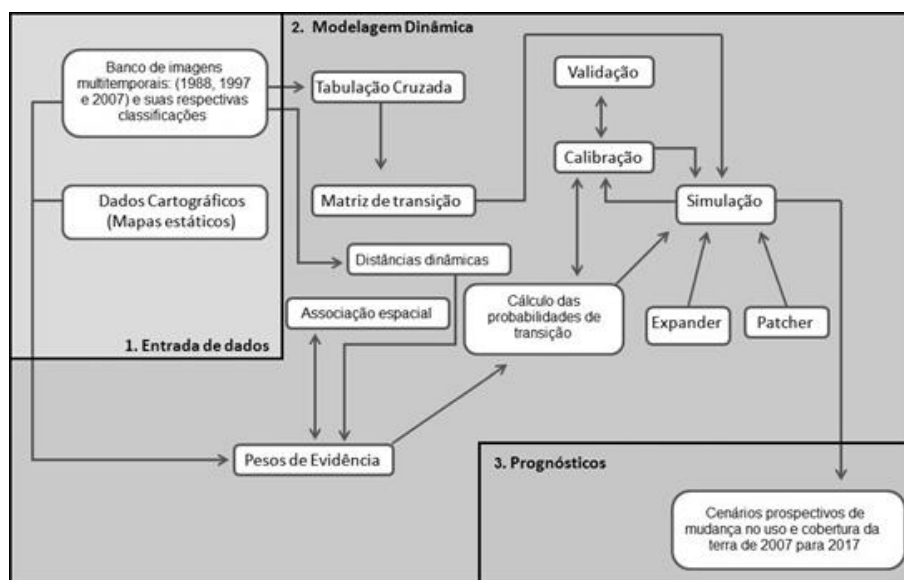


Figura 2
Síntese da modelagem e simulação no Dinamica EGO para o presente estudo
Pisani (2014).

A figura 2 ilustra o fluxograma de modelagem no Dinamica EGO, a qual compreende as seguintes fases:

1 – Entrada dos dados: são utilizadas as imagens orbitais, além das variáveis selecionadas (contínuas: Modelo digital de elevação do terreno – MDE, declividade, distância euclidiana às drenagens, às principais rodovias e às estradas vicinais; e a variável categórica solos) como input do sistema;

2 – Modelagem Dinâmica: a partir dos dados de entrada é realizada a tabulação cruzada, que serve de base para construção das matrizes de transição das mudanças de uso e cobertura da terra nos períodos analisados e, por sua vez, auxiliam na etapa de simulação de cenários. Nessa etapa também são calculados os Pesos de Evidência, a partir da análise de associação espacial (ou correlação) entre as variáveis selecionadas. Estes, por sua vez, servem de base para o cálculo das probabilidades de transição que auxiliam tanto na fase de calibração, como na de simulação do modelo, além da fase de validação do modelo, que analisa pelo método de similaridade fuzzy a semelhança entre os mapas simulados e os mapas de base (ou verdade terrestre);

3 – Prognósticos: nessa etapa são calculados os mapas com os cenários prospectivos (ou futuros) com as probabilidades de mudança no uso e cobertura da terra, nesse caso para 10 anos, ou seja, de 2007 para 2017.

Uma das etapas de simulação realizada nesse trabalho consistiu na elaboração das matrizes de transição da mudança do uso e cobertura da terra nos períodos de 1988-1997 e 1997-2007. A matriz de transição vem a ser a distribuição da quantidade de alterações por toda a paisagem e é responsável por fornecer ao algoritmo de simulação a porcentagem de mudança de um estado da paisagem para outro, sendo o primeiro componente da função de mudança (SOARES-FILHO et al., 2004). Essa informação pode ser obtida por meio da tabulação cruzada do mapa de uso e cobertura da terra inicial com outro mapa, desse mesmo tipo, em um instante de tempo ulterior. No Dinamica EGO essa matriz é chamada de matriz de transição unitária.

Calibração do modelo

A calibração tem o objetivo de selecionar o melhor conjunto de variáveis de entrada e parâmetros internos do modelo dinâmico, a fim de produzir o melhor ajuste entre os dados levantados e a realidade observada (ALMEIDA, 2003). Devido à impossibilidade de se validar um cenário futuro, torna-se fundamental a calibração, ou seja, a geração de simulações pretéritas e sua consequente relação com referências conhecidas (mapas base) (MACEDO et al., 2013).

Para o presente trabalho, utilizou-se do método de Pesos de Evidência (Bonham-Carter, 1994), que se baseia no teorema de probabilidade condicional bayesiana e foi utilizado originalmente na área de prospecção mineral para avaliar os fatores condicionantes da ocorrência de mineralizações. No presente trabalho, foi calculada a probabilidade de mudança de uso e cobertura da terra a partir da influência de um conjunto

de variáveis (solos, litologia, declividade, distância às drenagens, entre outros).

Os pesos de evidência são aplicados no Dinamica EGO após a categorização dos mapas de variáveis contínuas. Nesse processo, a preservação da estrutura dos dados é essencial. Por essa razão, o Dinamica EGO utiliza um método em que os intervalos são calculados de acordo com a estrutura dos dados (AGTERBERG e BONHAM-CARTER, 1990). Posteriormente, são aplicados os intervalos de categorização e, por último, calculados os pesos de evidência. É importante observar que os valores positivos são obtidos para variáveis que favorecem determinada transição, ao passo que valores negativos indicam baixa probabilidade de transição, e valores próximos a zero são obtidos para variáveis que não exercem efeito sobre a transição (MAEDA et al., 2011). Essas variáveis tentam explicar as mudanças de uso e cobertura da terra ocorridas nos períodos analisados, a partir de diversos testes combinatórios para a calibração do modelo. O conhecimento do analista na área de estudo é de fundamental importância para a calibração, de forma que, na etapa final, o mapa simulado nos períodos analisados (1997-2007 e 2007-2017) fique o mais próximo possível do mapa real. É importante ressaltar que todos os dados foram gerados com resolução espacial de 30 m, para que fossem compatíveis com a resolução das imagens de satélite utilizadas.

Testes de validação

Os testes de validação podem ser entendidos como mecanismos de análise para se verificar se os modelos refletem ou não a realidade no grau desejado (BATTY, 1976). Existem diversos métodos desenvolvidos para validação de similaridade entre mapas baseados na comparação da vizinhança (PONTIUS, 2002; HAGEN, 2003).

Os modelos espaciais necessitam de uma comparação dentro de um contexto de vizinhança, uma vez que mapas que não são exatamente coincidentes podem mostrar padrões espaciais similares dentro de uma determinada vizinhança do pixel (SOARES-FILHO et al., 2009).

O Dinamica EGO emprega o método de decaimento exponencial e constante, utilizado nesta pesquisa, sem a utilização de mapas diferença e se baseia no conceito de “fuzziness of location” (dubiedade de localização), segundo o qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas (HAGEN, 2003; SOARES-FILHO et al., 2009).

Por não se considerar a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança “fuzzy neighborhood” pode representar a dubiedade de localização (HAGEN, 2003). Na presente pesquisa, a validação do modelo foi realizada por meio do índice de similaridade fuzzy, que compara os mapas finais simulados e os reais. Foram inseridos o mapa real e o mapa simulado para 2007. Nos dois casos, foram observadas as semelhanças e diferenças entre os mapas, de forma que se estiverem muito diferentes, volta-se à fase de calibração e realização de novas simulações, até que estes apresentem a maior semelhança possível. No presente

trabalho, após a etapa de calibração citada, foram gerados os mapas simulados para o ano de 2017 com base nos parâmetros de calibração de 2007.

Resultados

Mapa de uso e cobertura da terra

A partir das imagens orbitais utilizadas e das técnicas empregadas na pesquisa, já citadas anteriormente, obtiveram-se os mapas de uso e cobertura da terra nos anos de 1988, 1997 e 2007 (Figura. 3).

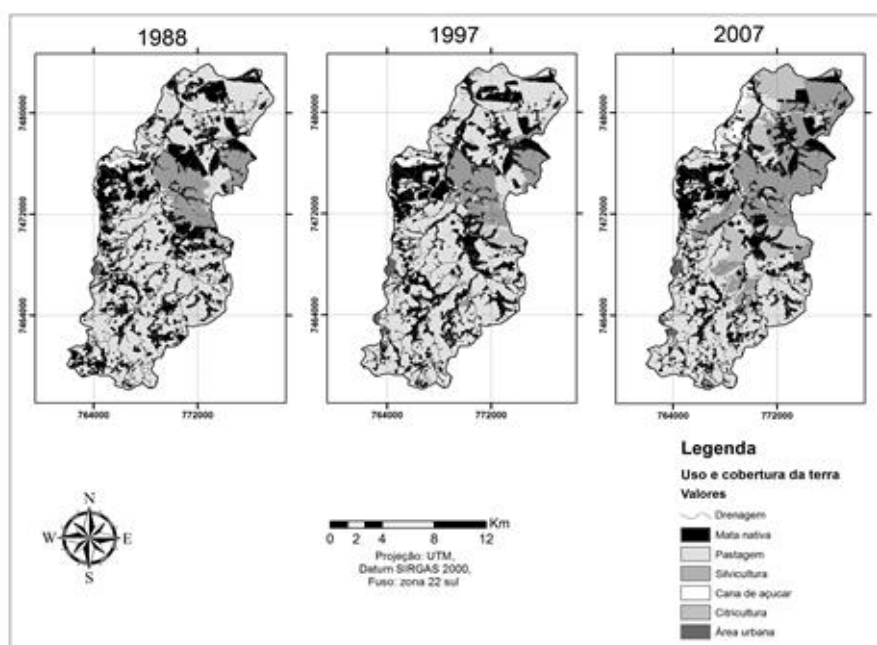


Figura 3

Mapas de mudança no uso e cobertura da terra entre 1988 e 2007.

Pisani (2014).

Em relação ao desflorestamento da área, é possível afirmar que nos 19 anos de análise houve uma perda de 10,03 km² de mata nativa. Entretanto, a maior intensidade deste fenômeno se deu entre os anos de 1997 e 2007, com uma perda de 8,24 km² em relação aos 1,79 km² perdidos entre os anos de 1988 e 2007. Um decréscimo considerável também pode ser verificado a partir da classe pastagem, que perdeu aproximadamente 40,38 km² nos últimos 19 anos analisados. A mudança do uso e cobertura da terra nos anos analisados pode ser conferida na Tabela 1.

Tabela 1

Mudança no uso e cobertura da terra entre os anos de 1988, 1997 e 2007.

Classes de uso e cobertura da terra	Área (km ²)		
	1988	1997	2007
Mata nativa	66,72	64,93	56,69
Pastagem	132,15	131,50	91,77
Citricultura	1,31	3,37	19,16
Cana-de-açúcar	1,9	2,52	4,64
Silvicultura	19,23	18,58	48,09
Área Urbana	1,02	1,41	1,95

Pisani (2014)

Este fato pode ser explicado em grande parte pelo aumento de área de outras classes de cobertura existentes nos dez últimos anos analisados, principalmente as classes silvicultura e citricultura, que apresentaram um aumento considerável de área nesse período (29,51 km² para silvicultura e 15,79 km² para citricultura).

Em relação às outras classes (área urbana e cana-de-açúcar), estas tiveram um aumento pouco significativo, sendo que a classe cana-de-açúcar foi a que sofreu a maior expansão, tendo um aumento de 2,74 km² entre 1988 e 2007, e de 2,12 km² nos últimos dez anos analisados.

Cabe destacar a existência do fenômeno da expansão da citricultura no interior do estado de São Paulo nos últimos 20 anos, inclusive na área de estudo, com um aumento de área em torno de 13,6 vezes. Além do aumento da rentabilidade econômica, com grande demanda de mercado, essa expansão explica-se também por essas áreas ainda não terem tido registro do Greening e do Cancro Cítrico, as principais doenças relacionadas à citricultura.

Análise das matrizes de transição

A fim de se analisar as mudanças da paisagem entre os anos de 1988 – 1997 e 1997 - 2007, foram elaboradas as matrizes de transição global em função das mudanças das classes de uso e cobertura da terra, descritas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2

Matriz de transição em km² do uso e cobertura da terra entre os anos de 1988-1997

Classes 1988-1997	Mata	Pastagem	Citricultura	Cana-de-açúcar	Silvicultura	Área urbana
Mata	-	19,93	1,45	0,41	1,74	0,17
Pastagem	19,99	-	1,13	0,59	1,78	0,74
Citricultura	0,01	0,03	-	0	0	0
Cana-de-açúcar	0,14	0,20	0	-	0	0
Silvicultura	1,26	1,13	0,19	0	-	0
Área urbana	0	0	0	0	0	-

Pisani (2014).

Tabela 3Matriz de transição em km² do uso e cobertura da terra entre os anos de 1997-2007

Classes 1997-2007	Mata	Pastagem	Citricultura	Cana-de-açúcar	Silvicultura	Área urbana
Mata	-	14,48	2,64	0,33	2,89	0,19
Pastagem	0,19	-	12,80	3,61	27,39	1,03
Citricultura	0,0001	0,14	-	0	0,13	0
Cana	0,0014	1,56	0	-	0	0
Silvicultura	0,15	0,61	0,027	0	-	0
Área urbana	0	0	0	0	0	-

Pisani (2014).

É importante observar nos dados que se referem aos valores de área que, de 1988 para 1997, o desflorestamento (ou seja, a somatória de todas as classes de uso e cobertura que substituíram a classe mata) variou aproximadamente 23,7 km² em nove anos. Porém, verificou-se também uma recuperação de 21,4 km² (considerando a somatória de todas as classes de uso e cobertura que foram convertidas para a classe mata). O desflorestamento real, calculado pela diferença entre essas duas áreas (desflorestamento e recuperação), foi de aproximadamente 2,3 km² no período analisado. Em relação às outras classes, não houve uma expansão significativa no período observado, apenas a classe citricultura teve um aumento médio de 2,77 km² (somatória do avanço nas áreas de mata nativa, pastagem e silvicultura em menor quantidade). Já em relação ao período 1997-2007, quanto às áreas cujo uso e cobertura foram convertidos para a classe mata e desta para outras classes, houve um desflorestamento de 20,55 km², ou seja, um desflorestamento aproximadamente quatorze vezes maior do que em relação ao período anteriormente analisado (1988-1997). As classes que mais ganharam expressão no período foram principalmente a silvicultura, a pastagem e a citricultura, totalizando áreas de 30,41, 16,79 e 15,46 km², respectivamente. A classe cana-de-açúcar teve um avanço de aproximadamente 3,94 km², adquirindo grande parte de sua área da classe pastagem. Notou-se, no período analisado, um avanço crescente das monoculturas, principalmente na região do médio e baixo Capivara. O avanço de área urbana foi de 1,22 km².

Calibração dos dados no Dinamica EGO

A calibração tem o objetivo de selecionar o melhor conjunto de variáveis de entrada e parâmetros internos do modelo dinâmico, a fim de produzir o melhor ajuste entre os dados levantados e a realidade observada (ALMEIDA, 2003). Devido à impossibilidade de se validar um cenário futuro, torna-se fundamental a calibração, ou seja, a geração de simulações

pretéritas e sua consequente relação com referências conhecidas, também chamadas de mapas base (MACEDO et al., 2013).

O conhecimento do analista na área de estudo é de fundamental importância para a calibração, de forma que, na etapa final, o mapa simulado nos períodos analisados fique o mais próximo possível do mapa real. É importante ressaltar que todos os dados foram gerados com resolução espacial de 30 m, para que fossem compatíveis com a resolução das imagens de satélite utilizadas.

Por meio do método de Pesos de Evidência presentes no Dinamica EGO, que primeiramente analisam a influência de determinada variável na mudança no uso e cobertura da terra, foram calibrados os parâmetros: positivos, que indicam alta influência da variável na mudança e próximos a zero com baixa influência. Após a calibração compara-se o mapa real e simulado no intuito de se modelar as transições propriamente ditas no período: 1997 para 2007 que, por conseguinte, serviu de parâmetro para a simulação de 2007 para 2017. Elencou-se a principais transições de mudança de uso e cobertura da terra na área de estudo: mata para pastagem (1-2), pastagem para citricultura (2-3), pastagem para cana-de-açúcar (2-4) e pastagem para silvicultura (2-5) levando em consideração as variáveis já citadas anteriormente. O Quadro 1 permite uma análise das influências dos Pesos de Evidência obtidos para as transições no presente trabalho:

Foi possível verificar os seguintes resultados a partir da análise do Quadro acima: A partir transições elencadas no período 1997 – 2007, na transição “mata para pastagem” (1-2), as variáveis que mais apresentaram influência na mudança foram as variáveis “Declividade” principalmente nos intervalos 0 a 3 % (relevo plano) e 3 a 8 % (relevo suave ondulado), fortemente explicado pela facilidade de abertura de pastagens sem grandes custos com grande influência no desflorestamento. A segunda variável que obteve Peso de Evidência significativo na transição 1-2 foi “Distância às vicinais” com maiores valores encontrados nos intervalos 0 a 700 e 700 a 1400 metros, que pode ser explicado em grande parte pelo desflorestamento ocorrido próximo às estradas vicinais para escoamento de produtos agropecuários, no caso, principalmente a pecuária leiteira. Destaca-se também para a transição citada a variável “Solos” com Peso de Evidência significativo verificado para o solo do tipo RQo (Neossolo Quartzarênico), onde mais foi observado na modelagem o desflorestamento no período analisado. Cabe lembrar que esse tipo de solo tem alta propensão a erosão hídrica laminar e linear.

Em relação a transição “Pastagem para Citricultura” (2-3) e “Pastagem para Silvicultura” (2-5) destacou-se a variável a “Distância às rodovias vicinais” que obtiveram os maiores valores de Peso de Evidência na modelagem, ajudando a explicar as dinâmicas de mudanças no uso e cobertura da terra regional pois são por meio das estradas vicinais que se dão os escoamentos da citricultura e silvicultura de Eucalipto para indústrias de suco de laranja e de processamento de madeira, papel e celulose dos municípios da região.

Ao considerar a variável “Distância às rodovias principais”, os valores de Peso de Evidência mais significativos se deram nas transições Pastagem para Citricultura, Cana-de-açúcar e Silvicultura em distâncias não maiores do que 3000 metros, sobretudo a Silvicultura com valores em torno de 2,4 e 2,8 nas distâncias 1500 a 3000 metros e 0 a 1500 metros respectivamente.

Quadro 1

Pesos de Evidência obtidos a partir das transições de uso e cobertura da terra entre 1997 e 2007 relacionadas com diferentes variáveis de análise

Variáveis	Intervalos	Pesos de Evidência de acordo com as principais transições de mudança de uso da terra			
		(1 - 2)	(2 - 3)	(2 - 4)	(2 - 5)
Altimetria DEM (metros)	450 - 550	0,567	1,987	0,576	1,798
	550 - 650	0,356	1,398	0,345	1,646
	650 - 750	0,452	0,045	-	0,876
	750 - 850	0,498	-	-	-
	850 - 918	1,519	-	-	-
Declividade (%)	0 - 3	1,365	1,787	1,854	1,907
	3 - 8	1,318	1,243	1,354	1,798
	8 - 20	0,892	0,865	0,407	-
	20 - 40	0,033	0,019	0,065	0,021
	> 40	0,002	-	-	-
Distância às rodovias (metros)	0 - 1500	1,657	2,567	2,165	2,865
	1500 - 3000	1,265	2,276	1,965	2,467
	3000 - 5000	0,856	1,978	1,276	2,134
	5000 - 6500	0,365	0,978	0,513	1,952
	6500 - 8974	0,315	0,543	0,435	1,591
Distância às vicinais (metros)	0 - 700	2,789	4,145	3,214	4,234
	700 - 1400	2,512	3,845	2,546	4,146
	1400 - 2100	1,023	3,579	1,879	3,934
	2100 - 3165	0,457	3,194	1,560	3,567
Distância às drenagens (metros)	0 - 300	1,176	0,9234	0,765	0,832
	300 - 900	0,765	0,457	0,287	0,712
	900 - 1200	0,751	0,145	0,276	0,335
	1200 - 1500	0,202	0,003	0,094	0,015
	1500 - 1952	0,013	-	-	-
Solos	GXBd	1,267	0,043	0,587	0,386
	LVAd1	2,546	-	0,621	2,326
	LVd	2,981	1,832	0,156	1,954
	LVdf	1,578	1,402	-	-
	PVAd1	1,872	1,632	1,143	1,943
	RLe	0,732	0,324	-	-
	RQo típico	3,765	3,103	0,951	3,290

Pisani (2014)

Geração de cenários

Após a calibração e validação do modelo, foram gerados cenários prospectivos de mudança de uso e cobertura da terra de 1997 para 2007 (Figura. 4) para comparação com o mapa real de uso e cobertura de 2007, elaborado a partir de imagem do satélite Landsat 5 TM.

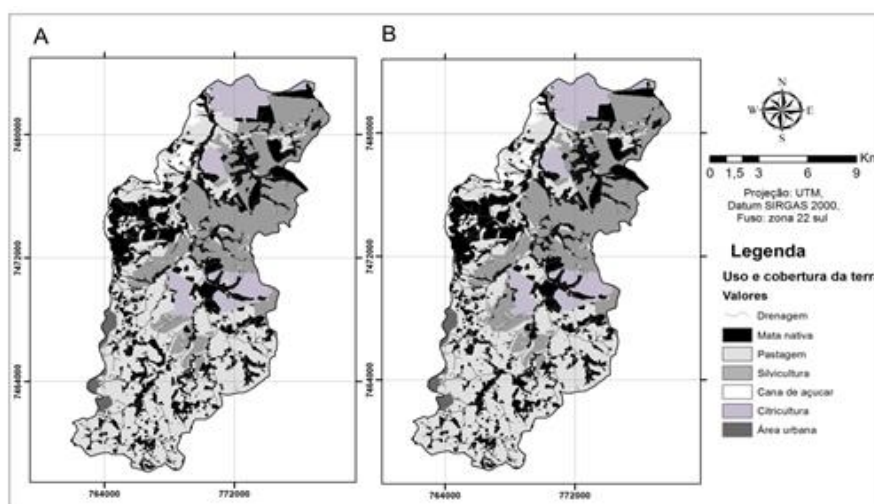


Figura 4

Mapa resultante da simulação 1997-2007. Mapa real de 2007 (A) e mapa simulado para 2007 (B)
Pisani (2014).

O resultado da validação do modelo para a simulação do ano de 2007 (Figura 5) foi obtido por meio do decaimento exponencial, a partir do método de similaridade fuzzy, feito diretamente com o mapa final simulado e real, conforme descrito anteriormente na seção 2.2.5. Cumpre destacar que os cenários prospectivos (2007 – 2017) foram calculados com base na validação do segundo período (1997 – 2007), no qual o valor de similaridade foi obtido a partir da calibração e simulação numa janela de 5 x 5 pixels.

Posteriormente, com os parâmetros estabelecidos, simulou-se o mapa de uso e cobertura para o período de 10 anos futuros, ou seja, de 2007 para 2017 (período de médio prazo), conforme ilustra a Figura 6, que mostram a evolução do uso e cobertura da terra na série temporal de 1988 a 2017. Observa-se nas referidas figuras uma tendência de avanço significativo da classe silvicultura nas regiões centrais da sub-bacia para o sul, ou seja, em direção as áreas de nascente. Em menor grau, nota-se também a tendência no avanço da classe citricultura no mesmo sentido.

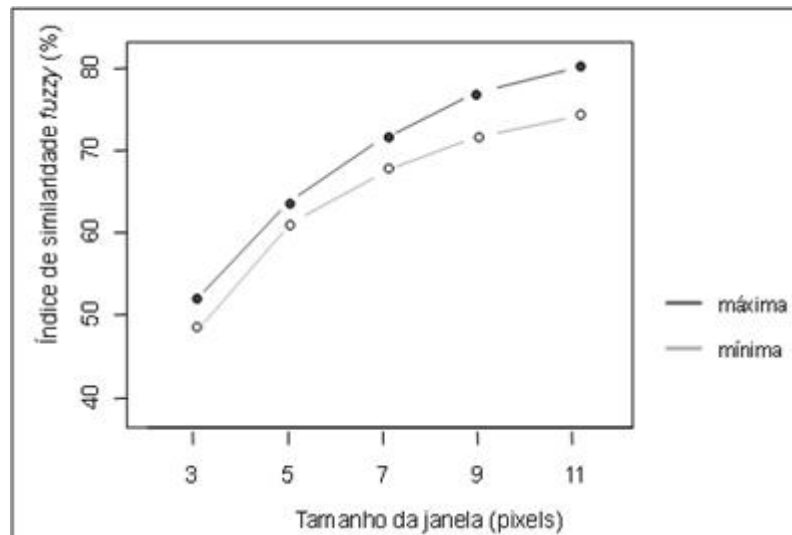


Figura 5

Validação estatística por similaridade fuzzy para a simulação 1997-2007
Pisani (2014).

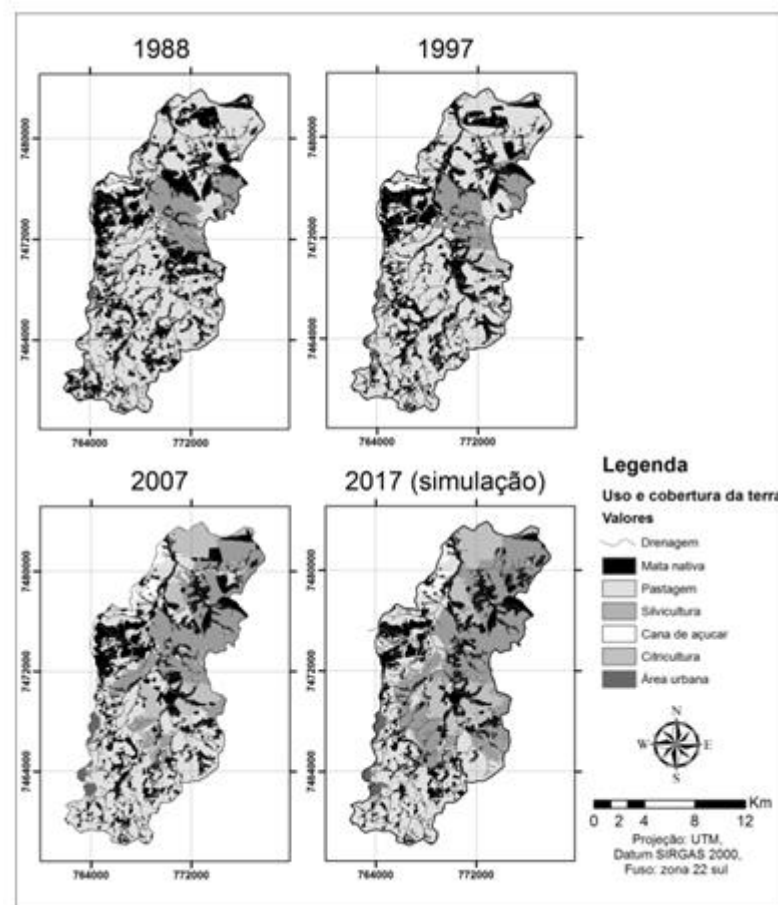


Figura 6

Mapas de mudança no uso e cobertura da terra: 1988, 1997, 2007 e simulação para 2017
Pisani (2014).

Discussão dos resultados

Em relação à classe mata nativa, percebe-se uma tendência positiva para o desmatamento de 2007 para 2017, a partir dos parâmetros alcançados na calibração e validação do modelo. Já as classes uso urbano e cana-de-açúcar não apresentaram tendência de avanços significativos nos cenários prospectivos da área de estudo. Os resultados se aproximam dos obtidos por metodologias semelhantes como os trabalhos de Delaneze et al. (2014), que estudaram a simulação de expansão urbana no entorno da faixa de dutos Orbel no estado do Rio de Janeiro; Maeda et al. (2011), que analisaram o avanço do desmatamento em regiões da margem do rio Xingu, onde mais de 50% da área passarão a pertencer principalmente as classes pastagens e culturas agrícolas; e de Suarez e Soares Filho (2013), que realizaram simulações para as mudanças no uso e cobertura da terra em uma bacia hidrográfica no entorno do lago de Furnas em Formiga, MG, utilizando a mesma metodologia.

Entretanto, é importante ressaltar que, para o presente trabalho o grande número de classes de uso e cobertura, associadas às variáveis estudadas fez com que a etapa de calibração demandasse tempo maior para a sua elaboração.

Na etapa de calibração, uma das variáveis que mais auxiliou no entendimento das mudanças da paisagem foi a variável “distância às estradas vicinais”, pois foi a partir da logística do escoamento, tanto da produção de pequenas e médias propriedades quanto das monoculturas, que se compreendeu a dinâmica das alterações do uso e cobertura da bacia hidrográfica. A escolha dessa variável se deu após um estudo pormenorizado da dinâmica regional da área de estudo e com intenso trabalho de campo que foi fundamental para o êxito da pesquisa.

No tocante às mudanças no uso e ocupação da terra da sub-bacia do rio Capivara mapeadas e simuladas, a redução das áreas de vegetação nativa e sua gradual substituição por lavouras de eucalipto (silvicultura), laranja (citricultura) e pelas pastagens, pode dar origem a impactos ambientais negativos à área, relacionados à conservação dos solos, dos recursos hídricos e à recarga/contaminação do sistema aquífero Guarani. Os solos da sub-bacia, oriundos dos arenitos Botucatu e Pirambóia, são naturalmente suscetíveis à erosão em razão da textura arenosa, da baixa agregação das partículas, da pequena espessura e/ou da localização em terreno acidentado, a exemplo dos Neossolos Quartzarênicos órticos típicos, situados na Depressão Periférica Paulista e constituídos por 88 % de areia; dos Neossolos Litólicos eutróficos, situados sobre as escarpas do front da cuesta, e dos Latossolos e Argissolos de textura predominantemente arenosa identificados na sub-bacia por Piroli (2002). A ocupação por pastagem inadequadamente manejada já provocou inúmeros processos erosivos em ravinas e voçorocas, constatadas por Carneiro (2008) e confirmadas nos trabalhos de campo. Os sedimentos removidos nesses processos de erosão linear são depositados nos leitos dos rios, provocando assoreamento e redução dos volumes de água.

A região das cuestas basálticas de Botucatu, sobretudo as áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia, constituem áreas de recarga do sistema aquífero Guarani. O aquífero é confinado pelos basaltos da formação Serra Geral, rocha vulcânica que sustenta o relevo cuestiforme característico de borda de bacia sedimentar, de orientação suavemente inclinada (CARNEIRO, 2008). As mudanças no uso e cobertura da terra nessas áreas, com destaque para a substituição da vegetação nativa por cultivos agrícolas, pode ocasionar a redução nas taxas de infiltração da água pluvial em decorrência da compactação do solo, degradação de sua estrutura e perda de toneladas de solos por erosão. Ademais, os agroquímicos usados na produção agrícola podem infiltrar no solo dissolvidos na água e contaminar partes do aquífero Guarani, comprometendo permanentemente a qualidade de suas reservas. Nesse sentido, fazem-se necessários a gestão, restrição e controle do uso e ocupação da terra nessas áreas, como por meio da já existente Área de Preservação Ambiental Corumbataí – Botucatu -Tejupá e dos planos de bacias hidrográficas, por exemplo.

CONCLUSÕES

A metodologia dos Pesos de Evidência mostrou-se viável para a modelagem e simulação das mudanças de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica estudada, podendo ser utilizada em outras áreas, por auxiliar no entendimento das dinâmicas das mudanças no uso e cobertura da terra da região ao complementar o conhecimento prévio da área de estudo. Por essa razão tem como finalidade auxiliar como valiosa ferramenta de análise e planejamento regional. No caso da sub-bacia do rio Capivara, esta possui papel importante como um dos principais tributários do rio Tietê na sua margem esquerda, constitui-se de uma área de recarga do Sistema aquífero Guarani e contribui de maneira significativa para o reservatório de Barra Bonita – SP.

Com relação à área de estudo, pode-se destacar as transições de pastagem para silvicultura e citricultura, entre 1988 e 2007, nas áreas de jusante, com projeções para o avanço da silvicultura para as áreas centrais e em direção ao sul da sub-bacia. Além disso, merece destaque o gradual e crescente desflorestamento nas áreas de cuesta, permitindo, com isso, que essas áreas se tornem suscetíveis à erosão.

Destacou-se principalmente como resultados, o mapa prospectivo de uso e cobertura da terra de 2007 para 2017, alcançado pela simulação, com uma validação satisfatória pelo método de similaridade fuzzy, ilustrando com isso uma série temporal de 30 anos (1988 – 2017).

Por fim, a modelagem e a simulação constituem instrumentos para monitoramento e análise das tendências de mudança do uso e cobertura da terra que podem subsidiar ações de planejamento e gestão do meio físico e dos espaços urbanos.

REFERÊNCIAS

- AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F. Deriving weights of evidence from geo-science contour maps for the prediction of discrete events. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM AP-COM, 22., 1990, Berlin. Proceedings... Berlin, Tech. University Berlin, v.1, p. 381-395. Disponível em: . Acesso em: 10 out. 2016.
- 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), Brasil. São José dos Campos. 2003. 351 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2003. Disponível em: . Acesso em: 28 jan. 2016.
- ALMEIDA, C. M.; GLERIANI, J. M. Redes neurais e autômatos celulares como uma plataforma para a simulação de mudanças do uso do solo 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, p. 305-327. 2007.
- BATTY, M. Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions. Cambridge, Cambridge University Press, 381p. 1976.
- BRIASSOULIS, H. Analysis of land use change: theoretical and modeling approach In: Loveridge, S. (Ed.). The Web Book of Regional Science. 2000. Morgantown, Regional Research Institute, West Virginia University. Disponível em: . Acesso em: 16 fev. 2016.
- BONHAM-CARTER, G. F. 1994. Geographic Information systems for geoscientists: modelling with GIS. Ontario, Pergamon Press, 398 p.
- CARNEIRO, C. D. R. Viagem virtual ao Aquífero Guarani em Botucatu (SP): Formações Pirambóia e Botucatu, Bacia do Paraná. Terrae Didática, 3(1): 50-73. Disponível em: . Acesso em: 05 fev. 2016.
- DELANEZE, M. E. Modelagem dinâmica espacial aplicada na avaliação das mudanças da cobertura da terra no entorno de dutos utilizando autômatos celulares – estudo de caso: Duto Orbel. 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado Geociências e Meio Ambiente), Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011. Disponível em: . Acesso em: 27 jan. 2016.
- DELANEZE, M. E.; RIEDEL, P. S.; MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. V. Modelagem Dinâmica Espacial para o monitoramento do crescimento urbano no entorno do Duto ORBEL. Revista Brasileira de Cartografia, 66(3): 473-484. 2014. Disponível em: <http://www.lsic.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=article&op=view&path%5B%5D=553&path%5B%5D=694>. Acesso em: 14 jan. 2016.
- DIAS, L. T.; WALDE, D. H. G.. Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF. Revista Brasileira de Cartografia, 65(1): 77-94. 2013 Disponível em: . Acesso em: 08 fev. 2016.
- Esri. Environmental System Research Institute. 2010. ArcMap v. 10. Redlands, ESRI. Programa de computador. 1DVD-ROM.

- GONÇALVES, R. M.; CENTENO, T. M.; CANDEIAS, A. L. B. Autômatos Celulares aplicados na modelagem de tendência em imagens multi-temporais. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(2): 233-241. 2011. Disponível em: . Acesso em: 20 jan. 2016.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, 17(3): 235-249. 2003. Disponível em: . Acesso em: 04 fev. 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades: Botucatu. Dados do Censo Demográfico, 2014. Disponível em: . Acesso em: 28 out. 2016.
- MACEDO, R. C.; ALMEIDA, C. M.; SANTOS, J. R.; RUDORFF, B. F. T. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 19(2): 313-337. 2013. Disponível em: . Acesso em: 02 fev. 2016.
- MAEDA, E. E.; ALMEIDA, C. M.; XIMENES, A. C.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; PELLIKKA, P. Dynamic modeling of forest conversion: Simulation of past and future scenarios of rural activities expansion in the fringes of the Xingu National Park, Brazilian Amazon. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3): 435-446. 2011. Disponível em: . Acesso em: 13 jan. 2016.
- MARTINS, D. Clima na região de Botucatu – SP. In: ENCONTRO DE ESTUDOS SOBRE A AGROPECUÁRIA DE BOTUCATU, 1., 1989, Botucatu. Anais... Botucatu, UNESP, v. 1, 1989, p.8-12.
- MAS, J. F.; KOLB, M.; PAEGELOW, M.; OLMEDO, M. T. C.; HOUET, T. Inductive pattern-based land use/cover change models: A comparison of four software packages. *Environmental Modelling Software*, 51: 94-111. 2014. Disponível em: . Acesso em: 30 jan. 2016.
- PATHIRANA, A.; DENEKEW, H.B.; VEERBEEK, W.; ZEVENBERGEN, C., Banda, A.T. Impact of urban growth-driven land use change on microclimate and extreme precipitation -A sensitivity study. *Atmospheric Research*, 138:59-72. 2014. Disponível em: . Acesso em: 04 fev. 2016.
- PÉREZ-VEGA, A.; MAS, J. F.; LIGMANN-ZIELINSKA, A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 29(1): 11-23. 2012. Disponível em: . Acesso em: 19 jan. 2016.
- PIROLI, E. L. Geoprocessamento na determinação da capacidade e avaliação do uso da terra do município de Botucatu – SP. 2002. 108 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Energia na Agricultura, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002. Disponível em: . Acesso em: 30 jan. 2016.
- PISANI, R. J.; Modelagem espacial dinâmica para o monitoramento do aporte de sedimentos na sub-bacia do Rio Capivara, município de Botucatu-SP. 2014. 162 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.
- PONTIUS, R. G. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68(10): 1041-1049. 2002. Disponível em: . Acesso em: 29 jan. 2016.

- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, DG-FFLCH-USP, IPT, FAPESP, 1 v., escala 1:500.000. 1997
- R. S. I. Research Systems Inc.. The environment for visualizing images ENVI v.4.7. Boulder, RSI. Programa de computador. 1DVD-ROM. 2009
- STEYAERT, L. A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: Goodchild, M. F., Parks, B.O. Steyaert, L.T. (Ed.). Environmental Modeling with GIS. 1. ed. Oxford, Oxford University Press, 2003, p. 16-30. 1993.
- SOARES-FILHO, B.S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, L. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: Albernaz A. L., Silva J.M.C. Valeriano, D. Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais. 1. ed. Belém: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003, p. 1-100. Disponível em: http://csr.ufmg.br/dinamica_utils/download/files/publications/dinamica_ac.pdf. Acesso em: 05 de mai. 2016.
- SOARES-FILHO, B.S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, B.; CERQUEIRA, V.; DIAZ, M. D. C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E.. Simulating the Response of Deforestation and Forest Regrowth to Road Paving and Governance Scenarios Along a Major Amazon Highway: The case of the Santarém-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology*, 10(5): 745-764. 2004. Disponível em: . Acesso em 03 mai. 2016.
- SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; LELLES, W. Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO. Belo Horizonte, Editora UFMG, 115p. 2009.
- SUAREZ, A. F.; SOARES-FILHO, B. S. Estudo da mudança de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Formiga – MG. *Revista Brasileira de Cartografia*, 65(3): 417-429. 2013. Disponível em: . Acesso em: 15 jan. 2016.
- STEYAERT, L. 1993. A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: Goodchild, M. F., Parks, B.O. & Steyaert, L.T. (Ed.). Environmental Modeling with GIS. Oxford, Oxford University Press, p. 16-30.
- VILLA-VIALANEIX, N.; FOLLADOR, M.; RATTO, M. LEIP, A. A comparison of eight metamodeling techniques for the simulation of N₂O fluxes and N leaching from corn crops. *Environmental Modelling & Software*, 34: 51-66. 2012. Disponível em: . Acesso em: 05 jan. 2016.
- ZHANG, Y.; DEGROOTE, J.; WOLTER, C.; SUGUMARAN, R. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. *Land degradation and development*, 20(1): 84-91. 2009. Disponível em: . Acesso em: 16 jan. 2016.