

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

Marcelo Elias Delaneze¹
Paulina Setti Riedel¹
Mara Lúcia Marques¹
Mateus Vidotti Ferreira¹
Cristina Maria Bentz²

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP/Rio Claro
Caixa Postal 178 - 13506-795 – Rio Claro - SP, Brasil
{mdelaneze; psriedel}@rc.unesp.br; maralucia.marques@hotmail.com;
mateusvidotti@yahoo.com.br

² Centro de Pesquisa da Petrobras - CENPES
Ilha do Fundão CEP 21941-598 RJ
cris@petrobras.com.br

Abstract. Accurate and reliable information about conditions of pipeline network represents a major role in the operation of pipelines, not only in order to maintain operational efficiency, but also to minimize the risks associated with possible accidents. The area selected for this study includes portions of the municipalities of Nova Iguaçu, Belford Roxo and Duque de Caxias, located in the metropolitan region of Rio de Janeiro. The aim of this study was to generate a land use forecast for the year 2010 using the software Dinamica-EGO comparing the results with the actual land use obtained from a Landsat 5 classified image. Modeling was conducted for the period 1987-1998, considering the following classes: urban, non-urban and vegetation. The transition matrix for the period shows that the vegetation has decreased at a rate of 2.87% per year, urban has grown at a rate of 0.12% per year and the vegetation has grown 0.47% per year. The “Weights of Evidence” method was used to categorize continuous variables and Cramer Test and Uncertainty Information Continuing Test were used to estimate the independence between the variables. The results showed that the simulated maps were similar to the recent land use map and also demonstrated that better results could be obtained if the modeling is carried out covering the total area of the municipalities.

Palavras-chave: land use, remote sensing, dynamic modeling, uso da terra, sensoriamento remoto, modelagem dinâmica.

1. Introdução

A faixa de dutos Rio Belo Horizonte inclui os dutos ORBEL (ORBEL 1 e 2) e GASBEL (gasoduto Rio de Janeiro – Belo Horizonte) em todo seu percurso e ainda compartilha a faixa com o OSRIO (oleoduto São Paulo – Rio de Janeiro) e o GASPAL (gasoduto Rio de Janeiro – São Paulo) no município de Duque de Caxias. O oleoduto ORBEL 1 e começou a operar em 1968, interligando a Refinaria Duque de Caxias (REDUC) no estado do Rio de Janeiro à refinaria Gabriel Passos (REGAP) na cidade de Betim em Minas Gerais. Estes dutos transportam derivados claros de petróleo (gasolina, óleo diesel, MTBE, nafta) com capacidade de 6000m³/dia. Possui diâmetro de 18 polegadas e aproximadamente 362 Km de extensão atravessando um total de 24 municípios. Em 2000, segundo IBGE (2004) a população total destes municípios era de 2.969.585 habitantes, sendo a maioria no estado de Minas Gerais.

A obtenção de informação precisa e confiável sobre as condições da rede dutoviária representa papel primordial na operação dos dutos, não só com o propósito de manter a eficiência operacional, mas também, para a minimização dos riscos associados a possíveis acidentes, como rompimento devido a deslizamentos de massa ou desmoronamentos de blocos, causando danos ao homem e ao meio ambiente.

Neste contexto, segundo Câmara e Monteiro (2003), o emprego de modelos matemáticos em estudos ambientais gera importantes contribuições científicas ao planejamento ordenado de uma área, uma vez que ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e a prever alterações futuras nos ecossistemas.

Apesar das falhas no passado na modelagem urbana (Lee, 1994), houve um renascimento da modelagem espacial nas últimas duas décadas, principalmente devido ao aumento da capacidade computacional, a maior disponibilidade de dados espaciais, e a necessidade de ferramentas de planejamento inovadoras para ajudar no apoio a tomada de decisões (Brail e Klosterman, 2001). Estes modelos incluem o desenvolvimento de novos métodos computacionais baseados em agentes e autômatos celulares (ACs), que mostram o potencial de representar e simular a complexidade dos processos envolvidos na dinâmica espacial e na mudança do uso da terra.

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

O modelo de simulação de dinâmicas do uso da terra empregado neste trabalho foi o existente no Dinamica-EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. O Dinamica é um modelo de simulação explicitamente espacial da dinâmica da paisagem, que se baseia em um algoritmo de autômato celular. Ele reúne funções de transição baseada na vizinhança multi-escala, conceito de fases utilizando um processo estocástico de simulação em múltiplas etapas, retroalimentação espacial a partir de cálculos de variáveis dinâmicas, um componente que direciona a expansão da malha viária, e pesos de evidência (Fearnside et al. 2009).

Como regras locais do AC, o Dinamica permite um ajuste preciso dos parâmetros de tamanho médio e variância das manchas de forma diferenciada para os dois algoritmos de transição, denominados *Expander* (função de expansão e contração de manchas) e *Patcher* (função formadora de manchas).

O objetivo deste trabalho foi simular a dinâmica espacial de uso da terra para a área de estudo, gerando prognósticos para comparações entre os mapas simulados e o mapa real de uso da terra obtido através da interpretação visual da imagem de sensoriamento remoto para o ano de 2010.

2. Área de Estudo

A área de estudo selecionada possui aproximadamente 97 Km² englobando porções dos municípios de Nova Iguaçu, Belford Roxo e Duque de Caxias, localizados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Figura 1). Nesta região a faixa de dutos inicia-se na refinaria REDUC e atravessa áreas urbanas ainda pouco consolidadas, seguindo em direção às escarpas da Serra do Mar. A proximidade de grandes centros urbanos e a construção do arco metropolitano do Rio de Janeiro gera uma dinâmica acelerada de mudanças de uso da terra, sendo, portanto, de extrema relevância o estudo das pressões sobre a faixa.

A área apresenta uma grande heterogeneidade no relevo, com as encostas da Serra do Mar ao norte, as colinas, e planícies da baixada, com áreas de baixa altitude em relação ao nível do mar marcadas por espaços vazios no município de Duque de Caxias.

Os principais bairros abrangidos são Tinguá, Cidade Jardim, Parque Estoril em Nova Iguaçu; Parque São Lucas e Lote XV em Belford Roxo e Parque Barão do Amapá, Pilar, Figueira e Cidade dos Meninos em Duque de Caxias. Este último constitui uma Zona de Interesse Ambiental (ZIA) marcada pela desativação de uma fábrica de pesticidas em 1961 onde não ocorreu a remoção dos produtos tóxicos e houve a contaminação da área. Mais

informações sobre a contaminação na Cidade dos Meninos pode ser obtida em Brilhante e Franco (2006).

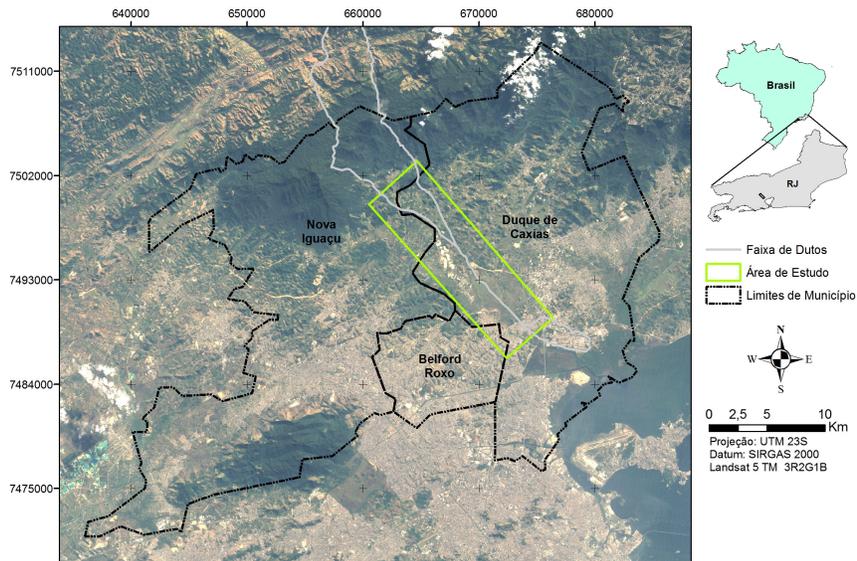


Figura 1 – Localização da área de estudo.

3. Metodologia de Trabalho

Os mapas de uso da terra foram obtidos através da classificação de imagens de sensoriamento remoto orbital. As imagens utilizadas correspondem a série temporal referente a três cenários de uso da terra para os anos de 1987, 1998 e 2010 obtidas pelo satélite Landsat 5 Thematic Mapper. Foram consideradas três classes de uso da terra: urbano, não-urbano (envolvendo toda área não urbanizada) e vegetação. A generalização das classes de uso da terra foi necessária devido à resolução das imagens utilizadas e também deve-se considerar que a complexidade do modelo tende a aumentar quanto maior for o número de atividades distintas consideradas.

O MDE (Modelo Digital de Elevação) foi produzido através da digitalização de oito cartas topográficas elaboradas pelo FUNDREM (Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro), atual Fundação CIDE, do ano de 1975, escala 1:10.000, com curvas de nível de 5m de equidistância. Foram vetorizadas as curvas de nível, os pontos cotados e a drenagem.

Também foi utilizada uma imagem Ikonos II de julho de 2009, com resolução espacial de 1 m (fusão das bandas multi espectrais com a banda Pan) para extrair as principais rodovias e também para realizar os ajustes e correções necessárias na drenagem obtida através das cartas topográficas.

As variáveis espaciais utilizadas para calibração do modelo foram declividade, altitude, distância a principais rodovias, áreas protegidas (corresponde a reserva biológica do Tinguá), distância a drenagens e litologia. Estas variáveis tentam explicar as mudanças de uso da terra ocorridas no período da simulação 1987-1998.

Utilizou-se o método de pesos de evidência baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes (Bonham-Carter, 1994) para esta pesquisa. Este método utiliza o modelo de probabilidade Bayesiana, e foi originalmente desenvolvido para avaliação de potencial mineral. Para o uso do solo este método concerne a probabilidade que uma classe sofra alteração (e.g. 'uso vegetação para não-urbano'), posto que uma evidência (e.g. declividade), já ocorreu.

Nos pesos de evidência o efeito de uma variável espacial em uma transição é calculado independentemente de uma solução combinada. Os pesos de evidência representam cada

influência sobre uma variável na probabilidade espacial de uma transição $i \rightarrow j$ (Soares-Filho et al., 2003a) e são calculados conforme as equações 1 e 2.

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

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

Onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ são as chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento **D** e ocorrer **D** dado um padrão espacial **B**. W^+ é o peso de evidência de ocorrer o evento **D**, dado um padrão espacial **B** (Bonham-Carter, 1994; Soares-Filho et al., 2003).

Pesos de Evidências são aplicados no Dinamica EGO primeiramente categorizando os mapas de variáveis contínuas, aplicando os intervalos de categorização e depois são calculados os coeficientes dos pesos de evidência. Valores positivos favorecem determinada transição, enquanto valores negativos indicam baixa probabilidade de transição e valores próximos a zero não exercem efeito.

O método de pesos de evidência necessita que os mapas de entrada devam ser espacialmente independentes. Para isso um grupo de testes estatísticos é aplicado para estimar esta suposição, como o coeficiente de Cramer, a Incerteza de Informação Conjunta, medidas de entropia e o Chi-quadrado. Em valores de pares de mapas correlacionados que apresentem resultados superiores a 0,5 deve ser escolhida uma variável e eliminá-la.

Neste trabalho utilizaram-se os valores dos testes de Cramer (V) e a Incerteza da Informação Conjunta (U) para estimar a independência entre as variáveis. Estes índices possuem valores variando de zero (0) a um (1), onde quanto mais próximos de zero os valores, menor o grau de dependência das variáveis. Segundo Bonham-Carter (1994), valores menores do que 0,50 sugerem menos associação do que mais.

A execução do modelo foi realizada para o período 1987-1998. Para aproximar a paisagem simulada com a paisagem real obtida pela classificação da imagem Landsat 5 TM foram realizados vários testes nos parâmetros que controlam a transição empregados no Dinamica-EGO: *expander* e *patcher*. A função *expander* é responsável pela expansão ou contração de manchas previamente existentes de certa classe de uso da terra, enquanto a função *patcher* destina-se exclusivamente a formação de novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes, ou seja, a função *expander* executa transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado j , e a função *patcher* realiza transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de j (Soares-Filho et al. 2002).

A validação do modelo consiste em comparar o mapa simulado com o mapa real para verificar se o modelo atingiu o nível desejado. Para este propósito foram empregados os métodos de decaimento exponencial que consiste em uma adaptação do método de Hagen (2003) por Soares-Filho et al. (2005), que considera medidas de similaridade por lógica fuzzy, aplicadas em contexto de vizinhança local e o método de decaimento constante com janelas múltiplas que diferencia-se do primeiro por gerar vários tamanhos de janelas para a avaliação.

4. Resultados e Discussão

A partir dos mapas de uso inicial e final foram calculadas no Dinamica EGO as matrizes de transição. Três transições estão ocorrendo, como mostrado na tabela 1. A transição 'vegetação para não urbano' mostra que uma porcentagem significativa de vegetação diminuiu a uma taxa de 2,87% ao ano no período selecionado. A taxa de crescimento urbano é pequena se comparada com as outras mudanças ocorridas na área.

Tabela 1 – Transições anuais de uso da terra.

Período 1987-1998	
Transições	Taxa anual (%)
Vegetação para não urbano	2,87%
Não urbano para vegetação	0,47%
Não urbano para Urbano	0,12%

Os resultados do coeficiente de Cramer e da Incerteza da Informação Conjunta que relacionam pares de variáveis para verificar a dependência espacial entre elas estão demonstrados na figura 2. O único par de variáveis que apresenta valores acima de 0,5 são litologia e declividade. Portanto a única variável espacial excluída foi a variável litologia da transição ‘vegetação para não-urbano’ onde os valores de U ficaram em 0,504476 e de V em 0,622933. Os outros pares de variáveis não obtiveram valores superiores a 0,5 indicando baixa dependência espacial e, portanto as variáveis são mantidas.

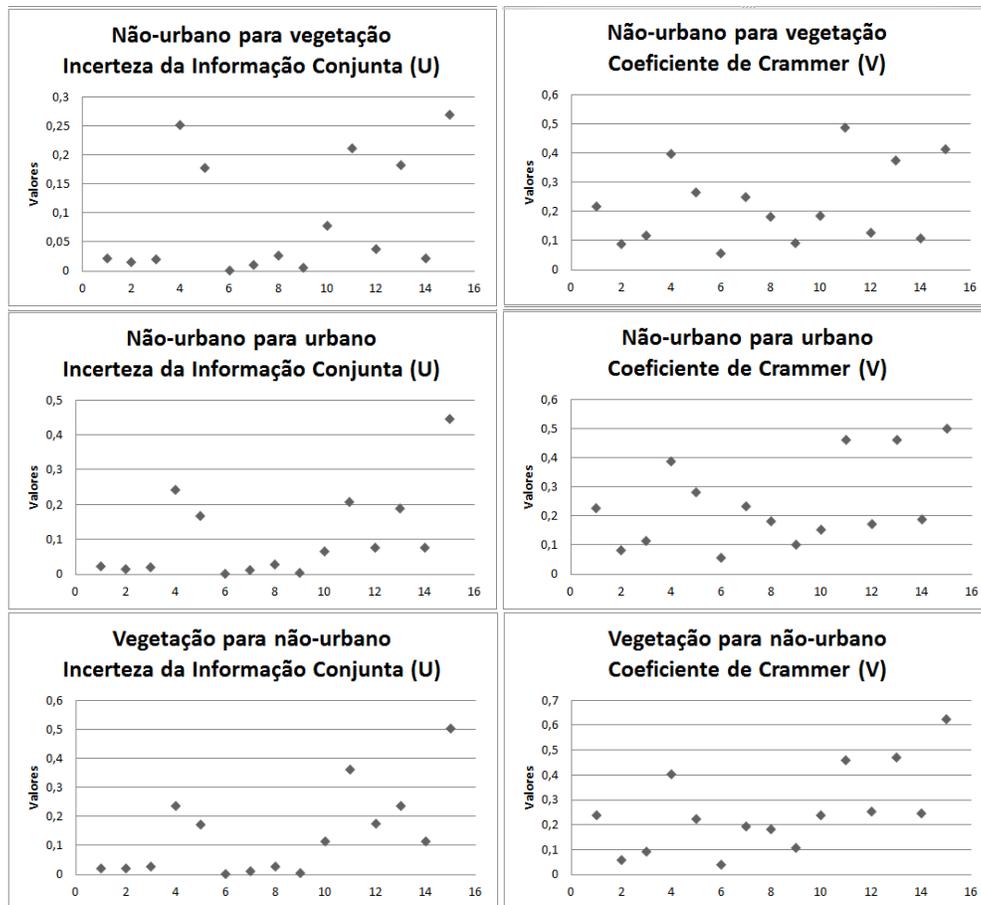


Figura 2 – Valores dos testes da Incerteza da Informação Conjunta e coeficiente de Cramer em pares de variáveis.

As probabilidades de transição nas células são calculadas baseadas nos valores dos pesos de evidência (W^+) atribuídos a cada variável. Os pesos indicam se a variável associada a cada transição de uso é ou não favorável para explicar determinada mudança no período. Pesos positivos favorecem a ocorrência da transição enquanto pesos negativos desfavorecem.

A figura 3 mostra que para a transição ‘não-urbano para vegetação’ quanto maior a altitude do terreno mais favorável é a chance de ocorrer a mudança de uso da terra. Na

transição ‘não-urbano para urbano’ a variável distância a drenagens mostra que o intervalo entre 510 e 540 m é o mais propício à ocorrência de mudança de uso da terra e no caso da transição ‘vegetação para não-urbano’ a variável declividade mostra que os menores valores de declividade são mais propensos a apresentar mudança de uso da terra.

Após a calibração do modelo iniciaram-se os testes de simulação, que foram realizados com o mapa de uso da terra inicial (1987), o conjunto de variáveis, os pesos de evidência corrigidos e a matriz de transição. Também neste passo devem ser definidos os parâmetros dos functores *patcher* e *expander* para o tamanho médio, variância e isometria das manchas a serem formadas ou expandidas/contraídas.

Como resultados, foram gerados o mapa simulado para o ano de 1998, que foi definido a partir do número de iterações do modelo, e mapas de probabilidades de transição para cada mudança de uso da terra ocorrida.

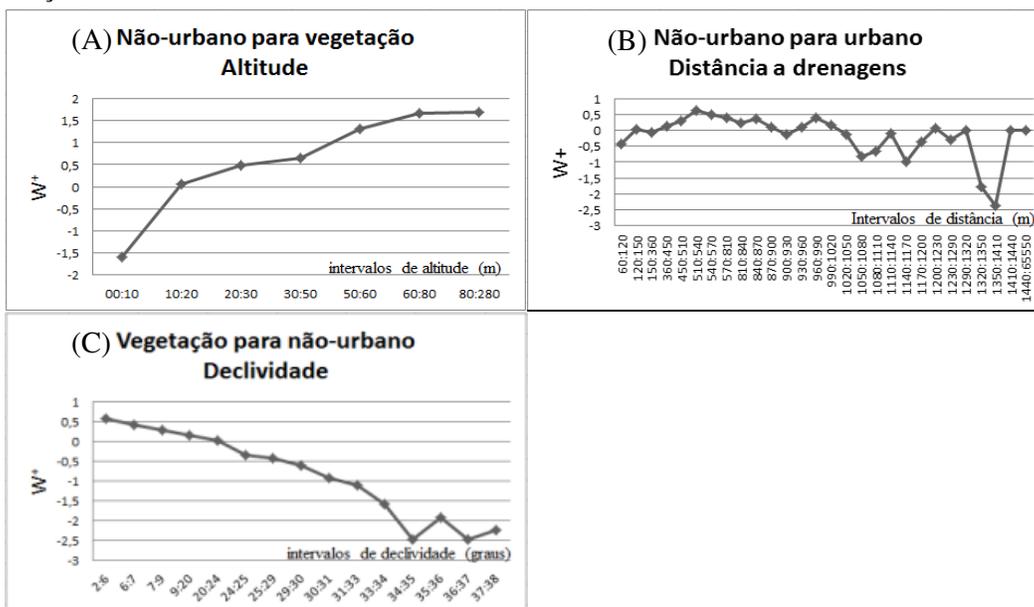


Figura 3 – Valores dos pesos de evidência (W^+) obtidos na simulação considerando: (A) a variável altitude em relação a transição ‘não-urbano para vegetação’; (B) a variável ‘distância a drenagens’ em relação a transição ‘não-urbano para urbano’; (C) a variável declividade em relação a transição ‘vegetação para não-urbano’.

A validação do modelo para o ano de 1998 ocorreu utilizando o método de decaimento constante com janelas múltiplas e o método de decaimento exponencial. Este último emprega múltiplas “janelas” de tamanhos crescentes de células sobre os mapas de uso da terra inicial e final e o mapa simulado em um sub-modelo do DINAMICA-EGO. As janelas variam a partir de uma matriz de 5x5 até 31x31 células e consideram a célula central de cada janela e os estados das células de sua vizinhança como parâmetros de comparação entre os mapas. Nessa abordagem valores acima de 50% de similaridade são considerados satisfatórios para a validação do modelo desde que os padrões de distribuição espacial do desmatamento entre os mapas comparados sejam similares (Barni, 2009). Desse modo foi obtido um índice de 53,7% de similaridade entre os mapas em uma janela de 7x7 células.

No método de decaimento constante com janelas múltiplas a simulação atingiu um valor de ajuste de similaridade de aproximadamente 53% em uma resolução espacial de 150 metros.

Com o modelo validado foram gerados três cenários de uso da terra para o ano de 2010. Os mapas simulados e o mapa de uso real obtido através da interpretação da imagem Landsat podem ser vistos na figura 4.

Através da análise visual das simulações geradas e o mapa de uso real para o ano de 2010 conclui-se que os mapas simulados aproximaram-se do mapa de uso real. O tamanho reduzido da área de estudo é um fator que deve ser levado em consideração na modelagem, já que resultados melhores poderão ser obtidos se extrapolar o modelo para a área total dos municípios, podendo assim considerar um número maior de variáveis.

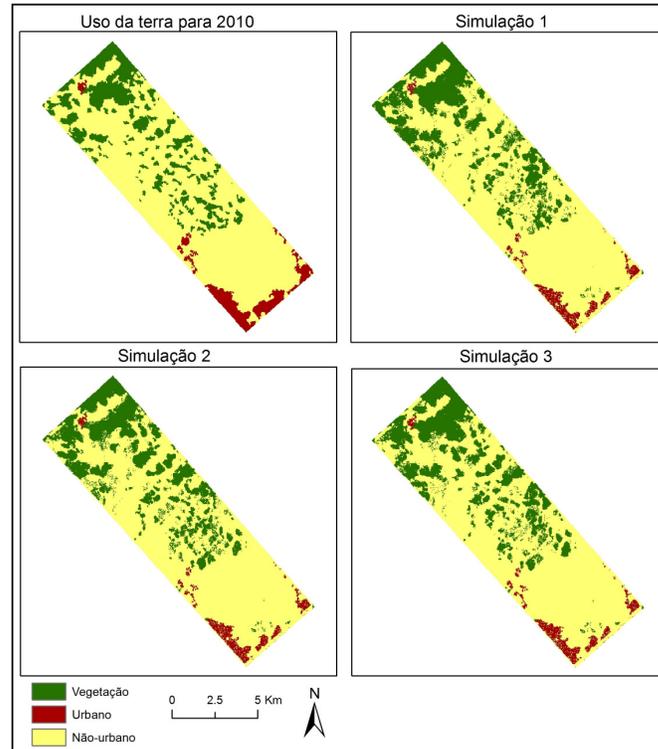


Figura 4 – Mapa de uso da terra para o ano de 2010 e mapas simulados obtidos através da modelagem.

5. Conclusões

A diminuição significativa da vegetação na área pode ser entendida pelos ciclos agrícolas históricos, e também devido à proximidade de áreas alagadas, já que era retirado material das áreas mais elevadas para aterrar brejos e manguezais durante meados do século XX para criação de terras emersas e obras de saneamento. A taxa obtida para a transição ‘não-urbano para vegetação’ também pode ser entendida por este processo já que a diminuição da vegetação natural dificulta a dispersão de sementes por aves e conseqüentemente o crescimento da vegetação natural estará comprometido.

Os bairros próximos a REDUC e a faixa de dutos ainda apresentam-se pouco urbanizados com vazios que possibilitam um maior adensamento urbano. O crescimento destes bairros apresenta limites para a expansão como a ZIA da cidade dos meninos.

Embora o nível alcançado na simulação seja considerado satisfatório, resultados melhores poderão ser obtidos se a modelagem for realizada abrangendo a área total dos municípios, aumentando assim o número de variáveis do modelo e também a representação da realidade.

O crescimento urbano é um fator que deve ser levado em consideração para a operação do duto, sugere-se para trabalhos futuros a modelagem a curto e médio prazo para a área estudada a fim de ajudar no planejamento e tomada de decisões por órgãos responsáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro dado pelo Cenpes/Petrobras.

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), Brasil. 2003. 321 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- Barni, P. E. **Reconstrução e asfaltamento da rodovia BR-319:** efeito “dominó” pode elevar as taxas de desmatamento no sul do estado de Roraima. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 136p. 2009.
- Batty, M.; Xie, Y.; Sun, Z. Modelling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, 23, p. 205-233, 1999.
- Bonham-Carter, G. **Geographic information systems for geo-scientists:** modeling with GIS. NewYork, Pergamon, 1994.
- Brail, R. K., & Klosterman, R. E. **Planning support systems:** integrating Geographic Information Systems, models, and visualization tools. Redlands: ESRI Press, 2001.
- Brilhante, O. M.; Franco, R. Exposure pathways to HCH and DDT in Cidade dos Meninos and its surrounding districts of Amapá, Figueiras and Pilar, metropolitan regions of Rio de Janeiro, Brazil. **International Journal of Environmental Health Research**, 16: 3, p. 205-217, 2006.
- Câmara, G.; Monteiro, A.M.V. 2003. Introdução à modelagem dinâmica espacial. In: **SBSR, Simp. Bras. Sens. Remoto**. Belo Horizonte, *Tutorial*.
- Fearnside, P. M.; Graça, P. M. L. A.; Keizer, E. W. H.; Maldonato, F. D.; Barbosa, R. I.; Nogueira, E. M. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). **Rev. bras. meteorol.** 2009, vol.24, n.2, pp. 208-233.
- Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, 17, 235-249, 2003.
- Lee, D. B. Retrospective on large-scale urban models. **Journal of the American Planning Association**, 60, 35–40, 1994.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística . **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Rio de Janeiro, 2004. v. 24, 27 p.
- Soares-Filho, B. S.; Pennachin, C. L.; Cerqueira, G. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, 154, 217-235, 2002.
- Soares-Filho, B. S.; Corradi, L.; Cerqueira, Araújo, W. Simulating the spatial patterns of change through the use of the dinamica model. In **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 11, 2003, BH, INPE, 721-728, 2003.
- Soares-Filho, B. S.; Cerqueira, G. C. Araújo, W. 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. D. Valeriano, D. (Org.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. Belém: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi 1 ed., v.1, 2003a. p. 100.
- Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.C.; Curran, L.; Cerqueira, G.C.; Garcia, R.A.; Ramos, C.A.; Voll, E.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P. & Mcgrath, D. 2005. Cenários de desmatamentos para a Amazônia. **Estudos Avançados**, 19 (54): 137-152.