

MARCELO ELIAS DELANEZE

MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL APLICADA NA AVALIAÇÃO
DAS MUDANÇAS DA COBERTURA DA TERRA NO ENTORNO
DE DUTOS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES
– ESTUDO DE CASO DUTO ORBEL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientadora: Dra. Paulina Setti Riedel

Rio Claro – SP
2011

MARCELO ELIAS DELANEZE

MODELAGEM DINÂMICA ESPACIAL APLICADA NA AVALIAÇÃO
DAS MUDANÇAS DA COBERTURA DA TERRA NO ENTORNO
DE DUTOS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES
– ESTUDO DE CASO DUTO ORBEL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Resultado: **APROVADO**

Comissão Examinadora

Dra. Paulina Setti Riedel
(UNESP)

Dra. Cláudia Maria de Almeida
(INPE)

Dra. Mara Lúcia Marques
(UNESP)

Rio Claro, 14 de outubro de 2011

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Dra. Paulina Setti Riedel, pela confiança, e amizade em mim depositados.

Aos meus, pais Jair e Lourdes, por todo apoio que sempre me deram.

À Marina, por existir em minha vida, pelo amor, companheirismo, apoio e alegria que sempre me proporciona. Sem você, tudo seria mais difícil.

Aos amigos do laboratório de Geoprocessamento: Mateus, Rodrigo (*Dandan*), Silvia (*Silveta*), Darlene, Cristina e Camila. Obrigado pela amizade e trocas de conhecimento, além de permitir um ambiente de trabalho muito agradável!

À Dra. Cláudia Maria de Almeida e a Dra. Mara Lúcia Marques, pelas dúvidas esclarecidas e importantes contribuições dadas ao trabalho.

À equipe do Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG, pelos cursos oferecidos.

Ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas pela possibilidade de desenvolver o trabalho.

Ao apoio financeiro concedido pelo Cenpes/Petrobras.

“...pois a virtude dos mapas é essa, exibem a redutível disponibilidade do espaço, previnem que tudo pode acontecer nele. E acontece.”

José Saramago

RESUMO

A obtenção de informação 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, tanto decorrentes dos processos naturais quanto de causas antrópicas relacionadas ao uso e cobertura da terra. Neste sentido, 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. A área de estudo compreende porções dos municípios de Duque de Caxias, Belford Roxo e Nova Iguaçu e tem por objetivo realizar experimentos de mudanças da cobertura da terra em médio prazo (10 anos) para a faixa de dutos ORBEL. A modelagem realizada neste trabalho foi desenvolvida no *software* Dinamica-EGO, utilizando como entrada mapas classificados de cobertura da terra, obtidos através de imagens do satélite Landsat 5/TM, e variáveis espaciais para explicar as mudanças ocorridas na cobertura da terra. Para a calibração do modelo, utilizou-se o método de pesos de evidência, disponível no Dinamica-EGO, primeiramente categorizando-se os mapas de variáveis contínuas e, posteriormente, calculando-se os pesos de evidência. Valores positivos favorecem determinada transição, enquanto valores negativos indicam baixa probabilidade de transição, e valores próximos a zero não exercem efeito. A validação do modelo se deu pelo método de similaridade *fuzzy*, com decaimento exponencial. Os resultados mostram que, para os dois períodos analisados (1987-1998 e 1998-2010), a taxa de mudança para a transição “vegetação arbórea para outros” é bem maior do que para as outras transições observadas nos mesmos períodos. Foram gerados dois cenários anuais de cobertura da terra para o ano de 2020. Os cenários apontam para o crescimento dos bairros periféricos próximos ao Arco Metropolitano do Rio de Janeiro, principalmente o bairro Parque Barão do Amapá e o adensamento urbano no bairro Chácaras Rio-Petrópolis em Duque de Caxias.

ABSTRACT

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 such as rupture of the ducts due to landslides or mudslides mass block, causing damage to humans and the environment. The use of mathematical models in environmental studies allows significant scientific contributions to the physical planning of an area, since they help to understand the impact of changes in land use and land cover and predict future trends of changes in ecosystems. The study area includes portions of the municipalities of Duque de Caxias, Nova Iguaçu, and Belford Roxo and aims to carry out experiments in land-cover changes in the medium-term (10 years) within the catchment area of ORBEL pipelines. The modeling performed in this work was developed using the software Dinamica-EGO, using as input classified land cover maps obtained from Landsat 5/TM satellite images as well as spatial variables to explain the observed changes in land cover. For the model calibration, we used the method of weights of evidence that is available at Dinamica-EGO. Initially, the maps of continuous variables were categorized according to discrete ranges, which were then employed for the calculation of the respective positive weights of evidence. Positive values foster certain transitions, while negative values indicate low probability of transition, and values close to zero have no effect on changes. Model validation was executed by means of the fuzzy similarity method using exponential decay. The results show that for the two study periods (1987-1998 and 1998-2010) the rate of change for the transition 'others to woody vegetation' is much higher than for the other transitions observed in the same periods. Two annual land cover scenarios were generated for the year 2020. The scenarios indicate the growth of suburbs near the ring road around Rio de Janeiro, especially of the neighborhood Parque Barão do Amapá and also of a denser urban neighborhood known as Chácaras Rio-Petrópolis, located in Duque de Caxias.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das formas das células para um sistema de autômatos celulares.	21
Figura 2 – Representação unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D) de um sistema de autômatos celulares.	21
Figura 3 – Vizinhança de Moore e Vizinhança de Von Neumann.	22
Figura 4 – Evolução de um CA baseado na vizinhança de Moore.	24
Figura 5 – Regras aplicadas para validação do modelo utilizando decaimento exponencial.	39
Figura 6 – Método de comparação <i>fuzzy</i> usando o mapa de diferenças em uma função de decaimento exponencial.	40
Figura 7 – Localização da área de estudo.	41
Figura 8 – Localização dos principais bairros na área de estudo.	42
Figura 9 – Mapa de Unidades litológicas.	43
Figura 10 – Mapa de sistemas de relevo.	45
Figura 11 – Mapa altimétrico e isoietas.	46
Figura 12 – Mapa indicativo de uso e ocupação da terra.	47
Figura 13 – Mapa de vegetação natural.	48
Figura 14 – Mapa de Unidades Geoambientais.	50
Figura 15 – Segmento C do Arco Metropolitano do Rio de Janeiro.	55
Figura 16 – Arquitetura básica do Dinamica-EGO.	56
Figura 17 – Fluxograma ilustrando as principais etapas de trabalho.	58
Figura 18 – Variáveis utilizadas para calibração do modelo no período 1987-1998.	62
Figura 19 – Variáveis adicionadas no segundo período de simulação (1998-2010).	63
Figura 20 – Comportamento dos pesos de evidência para a variável “altitude” na transição vegetação arbórea para outros.	69
Figura 21 – Comportamento dos pesos de evidência para a variável “declividade” na transição “outros para vegetação arbórea”.	70
Figura 22 – Mapas de probabilidade de transição de mudanças de cobertura da terra para o período 1987-1998.	72
Figura 23 – Paisagem simulada para o ano de 1998.	74
Figura 24 – Índice de similaridade <i>fuzzy</i> baseado em tamanhos múltiplos de janelas para a simulação da paisagem em 1998.	75

Figura 25 – Mapas de probabilidade de transição de mudanças de cobertura da terra para o período 1998-2010.....	78
Figura 26 – Paisagem simulada para o ano de 2010.....	79
Figura 27 – Índice de similaridade <i>fuzzy</i> baseado em tamanhos múltiplos de janelas para a simulação da paisagem em 2010.....	80
Figura 28 – Prognósticos anuais de cobertura da terra gerados para o cenário “projetivo”.....	82
Figura 29 – Prognósticos anuais de cobertura da terra gerados para o cenário “prospectivo”.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados populacionais para a área de estudo.	51
Tabela 2 – Dados econômicos dos municípios.	51
Tabela 3 – População residente no período de 1940 a 2000.	51
Tabela 4 – Taxa média geométrica anual de crescimento da população no período de 1940 a 2000.	52
Tabela 5 – Imagens Landsat 5/TM utilizadas.	59
Tabela 6 – Cartas topográficas FUNDREM utilizadas para obter o MDE.	60
Tabela 7 – Área total por classe de cobertura da terra.	67
Tabela 8 – Transições anuais de cobertura da terra.	67
Tabela 9 – Valores entre pares de variáveis para a transição “vegetação arbórea para outros”.	68
Tabela 10 – Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para vegetação arbórea”.	68
Tabela 11 – Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para área construída”.	68
Tabela 12 – Variável altitude para a transição “vegetação arbórea para outros”.	69
Tabela 13 – Variável declividade para a transição “outros para vegetação arbórea”.	70
Tabela 14 – Parâmetros utilizados no <i>expander</i> para gerar a paisagem simulada para o período de 1987-1998.	71
Tabela 15 – Valores entre pares de variáveis para a transição “vegetação arbórea para outros”.	76
Tabela 16 – Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para vegetação arbórea”.	76
Tabela 17 – Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para área construída”.	76
Tabela 18 – Parâmetros utilizados no <i>expander</i> para gerar a paisagem simulada para o período de 1998 – 2010.	77
Tabela 19 – Área total anual por classe de cobertura da terra para o cenário projetivo.	84
Tabela 20 – Área total anual por classe de cobertura da terra para o cenário prospectivo.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos sistemas de relevo	44
Quadro 2 – Descrição das unidades geoambientais.....	49
Quadro 3 – Variáveis selecionadas para as transições de cobertura da terra no período 1987 – 1998.....	64
Quadro 4 – Variáveis selecionadas para as transições de cobertura da terra no período 1998 – 2010.....	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	30
Equação 2.....	31
Equação 3.....	32
Equação 4.....	32
Equação 5.....	32
Equação 6.....	32
Equação 7.....	32
Equação 8.....	33
Equação 9.....	33
Equação 10.....	35
Equação 11.....	35
Equação 12.....	35
Equação 13.....	36
Equação 14.....	36
Equação 15.....	36
Equação 16.....	36
Equação 17.....	38
Equação 18.....	38

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AII	Área de Influência Indireta
AMRJ	Arco Metropolitano do Rio de Janeiro
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BDG	Banco de Dados Geográfico
CA	Cellular Automata (Autômato Celular)
CIDE	Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro
COMPERJ	Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSA	Companhia Siderúrgica do Atlântico
CSR	Centro de Sensoriamento Remoto
DRM	Departamento de Recursos Minerais
EGO	Environment for Geoprocessing Objects (Ambiente para Objetos Geoprocessáveis)
ENVI	Environment for Visualizing Images (Ambiente para Visualização de Imagens)
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
FUNDREM	Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro
GASBEL	Gasoduto Rio de Janeiro – Belo Horizonte
GASJAP	Gasoduto Japeri – Duque de Caxias
GASPAL	Gasoduto Rio de Janeiro – São Paulo
GASVOL	Gasoduto Duque de Caxias – Volta Redonda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IHS	Intensity, Hue, Saturation (Intensidade, Matiz, Saturação)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Landsat	Land Remote Sensing Satellite (Satélite de Detecção Remota da Terra)
LCO	Light Cycle Oil (Óleo Leve de Reciclo)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente

ORBEL	Oleoduto Rio de Janeiro – Belo Horizonte
ORBIG	Oleoduto Rio – Baía de Ilha Grande
OSRIO	Oleoduto São Paulo – Rio de Janeiro
OSVOL	Oleoduto Duque de Caxias – Japeri
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
REBIO	Reserva Biológica
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SOC	Self-Organized Criticality (Criticalidade Auto-Organizável)
TIN	Triangular Irregular Network (Rede Irregular de Triângulos)
TM	Thematic Mapper (Mapeador Temático)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UTM	Universal Transversal de Mercator
U	Incerteza da Informação Conjunta (Joint Information Uncertainty)
V	Coeficiente de Cramer
W ⁺	Peso de Evidência Positivo
W ⁻	Peso de Evidência Negativo
WGS	World Geodetic System (Sistema Geodésico Global)
ZIA	Zona de Interesse Ambiental

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1 AUTÔMATO CELULAR CLÁSSICO	20
3.1.1 O Jogo da Vida de John Conway.....	23
3.2 MODELOS ESPACIAIS	24
3.3 MODELOS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES	27
3.4 MODELAGEM COM PESOS DE EVIDÊNCIA.....	30
3.4.1 Cálculo das Taxas de Transição.....	30
3.4.2 Calibração do Modelo	31
3.4.3 Teste da Independência Condicional.....	34
3.4.4 Funções de Transição	36
3.4.5 Testes de Validação	37
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
4.1 LOCALIZAÇÃO.....	41
4.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA.....	42
4.3 CLIMA.....	45
4.4 MAPA DE VEGETAÇÃO NATURAL E DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA ..	47
4.5 CONTEXTO GEOAMBIENTAL	48
4.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS	51
4.7 ARCO METROPOLITANO DO RIO DE JANEIRO.....	53
5 MATERIAL E MÉTODOS	56
5.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS.....	59
5.2 CÁLCULO DAS TAXAS DE TRANSIÇÃO	64
5.3 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	64
5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO	65
5.5 TESTES DE VALIDAÇÃO.....	65
5.6 GERAÇÃO DE CENÁRIOS.....	65
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
6.1 TAXAS DE TRANSIÇÃO	67
6.2 PERÍODO DE SIMULAÇÃO 1987 – 1998.....	67
6.3 PERÍODO DE SIMULAÇÃO 1998 – 2010.....	76

6.4 GERAÇÃO DE CENÁRIOS.....	80
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE.....	98

1 INTRODUÇÃO

A faixa de dutos Rio de Janeiro - 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 os dutos OSRIO (oleoduto São Paulo – Rio de Janeiro), GASJAP (gasoduto Japeri – Duque de Caxias), OSVOL (oleoduto Duque de Caxias – Japeri), GASVOL (gasoduto Duque de Caxias – Volta Redonda) e o GASPAL (gasoduto Rio de Janeiro – São Paulo), no município de Duque de Caxias. O oleoduto ORBEL 1 começou a operar em 1968, interligando o Terminal Campos Elíseos ou a Refinaria Duque de Caxias (REDUC), no estado do Rio de Janeiro, à refinaria Gabriel Passos (REGAP), na cidade de Betim em Minas Gerais. Este duto transporta derivados claros de petróleo (gasolina, óleo diesel, nafta petroquímica, nafta craqueada e óleo leve de reciclo – LCO) com capacidade de 6.000 m³/dia. O oleoduto ORBEL 1 possui diâmetro de 18 polegadas e aproximadamente 362 km de extensão, atravessando um total de 24 municípios. Em 2010, segundo o IBGE (2010) a população total destes municípios era de 3.006.866 habitantes, sendo 55,8% no estado do Rio de Janeiro e 44,2% em Minas Gerais.

Em 2009, a infraestrutura dutoviária nacional era composta de 569 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos. Esses dutos somavam 16,9 mil km de extensão, divididos em 12,4 mil km para transporte e 4,5 mil km para transferência. Com extensão de 9,8 mil km, 98 dutos se destinavam à movimentação de gás natural. Para os derivados, havia 402 dutos, totalizando 5 mil km. Outros 32 dutos, com 2 mil km, se destinavam à movimentação de petróleo. E os 76 km restantes, compostos por 37 dutos, eram reservados à movimentação dos demais produtos, tais como etanol e solventes (ANP, 2010).

Esses dutos são essenciais ao abastecimento energético do Brasil e fazem ligações vitais entre infraestruturas, como refinarias, usinas e centros de distribuição.

Dutos são um meio eficiente e seguro para o transporte de substâncias voláteis ou inflamáveis com potencial para causar danos às populações vizinhas e ao meio ambiente. A variedade de terrenos que a rede dutoviária atravessa, como áreas densamente povoadas, regiões serranas e travessia de rios, fazem com que fiquem mais vulneráveis a acidentes, e portanto, a obtenção de informação 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 do duto devido a deslizamentos de massa ou desmoronamentos de blocos, causando danos ao homem e ao meio ambiente. Além dos riscos associados ao meio físico, que podem induzir ao rompimento dos dutos, existe também o risco associado ao uso e ocupação humana, tanto decorrente do uso urbano, quanto rural, que implicam em construções, arruamentos, trânsito de pessoas e máquinas nos entornos destas instalações.

Apesar de dutos serem citados na literatura como um dos mais seguros meios de transporte para substâncias perigosas (PAPADAKIS, 2000), com frequência mais baixa de acidentes do que aqueles associados ao transporte rodoviário ou ferroviário, falhas em dutos podem acontecer e, por vezes, geram conseqüências catastróficas, portanto, a elaboração de estudos para a prevenção de acidentes torna-se cada vez mais necessária.

A demanda crescente por energia e o crescimento de regiões metropolitanas resultam em mais pessoas vivendo próximas às faixas de dutos. Assim, a segurança pública em áreas atravessadas por dutos é um problema, e é possível que se torne mais recorrente com o crescimento da população e com a ampliação da malha dutoviária no país, que é ainda pouco expressiva, levando-se em consideração a dimensão do território nacional.

Neste contexto, a modelagem matemática tem importantes contribuições a dar no estudo das mudanças ocorridas nos entornos de dutos, que podem gerar relevantes pressões sobre os mesmos. 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 na modelagem espacial no passado (LEE, 1973), nas décadas recentes, o aumento da capacidade computacional, a maior disponibilidade de dados espaciais e a necessidade de ferramentas de planejamento inovadoras para ajudar no apoio à tomada de decisões fizeram com que houvesse uma retomada da aplicação deste tipo de modelagem (BRAIL e KLOSTERMAN, 2001; GEERTMAN e STILLWELL, 2002). Estes modelos incluem o desenvolvimento de

novos métodos computacionais, incluindo a micro-simulação, baseada, por exemplo, em agentes e autômatos celulares (Cellular Automata – CA), que mostra o potencial de representar e simular a complexidade dos processos envolvidos na dinâmica espacial e na mudança do uso e cobertura da terra.

Autômatos Celulares (CA) 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 com base no estado das suas vizinhas para um novo estado da mesma no instante de tempo seguinte (ALMEIDA, 2003).

O modelo de simulação de dinâmicas da cobertura da terra empregado neste trabalho foi o implementado no Dinamica-EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG). O Dinamica é um modelo de simulação explicitamente espacial da dinâmica da paisagem, que se baseia no paradigma de autômatos celulares. 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 aplicação de regressão logística (SOARES-FILHO, ASSUNÇÃO e PANTUZZO, 2001; SOARES-FILHO, PENNACHIN e CERQUEIRA, 2002) ou pesos de evidência (ALMEIDA et al., 2005), para calcular os mapas de probabilidades de transição usando as informações armazenadas em um SIG (Sistema de Informação Geográfica) (SOARES-FILHO et al., 2003).

2 OBJETIVOS

Principal

- Contribuir no monitoramento de dutos quanto às pressões antrópicas às quais estão submetidos, através de técnicas de sensoriamento remoto, aliadas às técnicas de modelagem da dinâmica espacial, utilizando como exemplo de caso um trecho da faixa de dutos ORBEL, localizado no estado do Rio de Janeiro.

Específicos

- Identificar, por meio de análises multitemporais, os processos de mudanças de cobertura da terra observados na faixa de dutos.
- Realizar experimentos de mudanças de cobertura da terra e gerar cenários prospectivos anuais de mudanças para o período de 10 anos para a faixa selecionada de dutos ORBEL, utilizando um modelo de autômatos celulares, alimentado por informações espaciais extraídas de sensores orbitais e de mapas digitais de cobertura da terra.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 AUTÔMATO CELULAR CLÁSSICO

Existem muitas definições de CA. Embora a ênfase nas definições possa ser diferente, o conceito principal é geralmente o mesmo. Wolfram (1983) descreve CA da seguinte forma:

“[...] idealizações matemáticas de sistemas físicos, nas quais o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme (ou `campo matricial’), comumente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (`célula’). O estado de um autômato celular é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula. Um autômato celular evolui em passos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontrados no passo de tempo anterior. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente (`sincronicamente’), baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto predefinido de `regras locais” (WOLFRAM, 1983, p. 603).

As primeiras pesquisas envolvendo autômatos celulares são do final da década de 1940, desenvolvidas pelo matemático John von Neumann. Von Neumann desenvolveu uma análise para descrever um sistema capaz de suportar duas características principais: sistemas complexos e sistemas com capacidade de auto-reprodução, ou seja, sistemas que se reproduzem fazendo cópias de si mesmo, tais como plantas (MARTINS, 2010). O desenvolvimento dessa nova teoria também foi influenciada por Stanislaw Ulam, propondo a Neumann implementar sua nova teoria em um espaço celular discreto.

Com o objetivo de dar uma prova matemática da possibilidade de auto-reprodução, Neumann projetou o primeiro CA documentado na literatura, composto por 200.000 células, onde cada célula podia apresentar até 29 estados. Além disso, regras complexas foram construídas para se tentar simular componentes eletrônicos de um computador, bem como vários outros dispositivos mecânicos (WOLFRAM, 2002).

Mas foi somente a partir do final da década de 1960, com as pesquisas de novas regras para CA bidimensionais do matemático John Horton Conway, que se iniciou um movimento intenso de estudos acerca do potencial de tal modelo. Conway

criou um conjunto de regras, denominadas de “O Jogo da Vida”, o qual foi originalmente apresentado como um jogo matemático e cuja popularização se deu em grande parte devido à sua publicação na revista *Scientific American* (DEWDNEY, 1989, 1990).

A partir da década de 1980, os trabalhos sobre CA, principalmente devido aos trabalhos de Wolfram, passaram a considerar tal abordagem como modelos de sistemas complexos, no sentido de que regras bastante simples poderiam originar padrões extremamente complexos. A simplicidade matemática na descrição de um CA era vista como uma vantagem bastante significativa para modelagem, ao invés de se usar sistemas de equações diferenciais.

Segundo Straatman et al. (2001), as partes de um CA podem ser descritas da seguinte forma:

Grade: A geometria de um CA é dada por uma grade de células. A geometria bidimensional de quadrados é a mais comum, embora exista também CA nas geometrias triangulares e hexagonais (Figura 1), e em uma, duas, ou três dimensões (Figura 2).

Figura 1 - Representação das formas das células para um sistema de autômatos celulares.

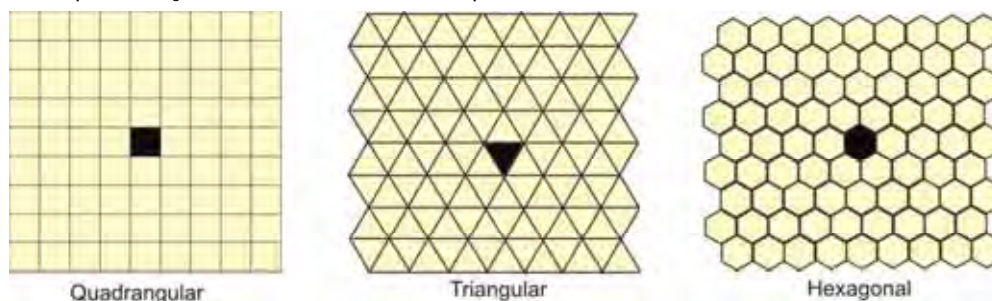
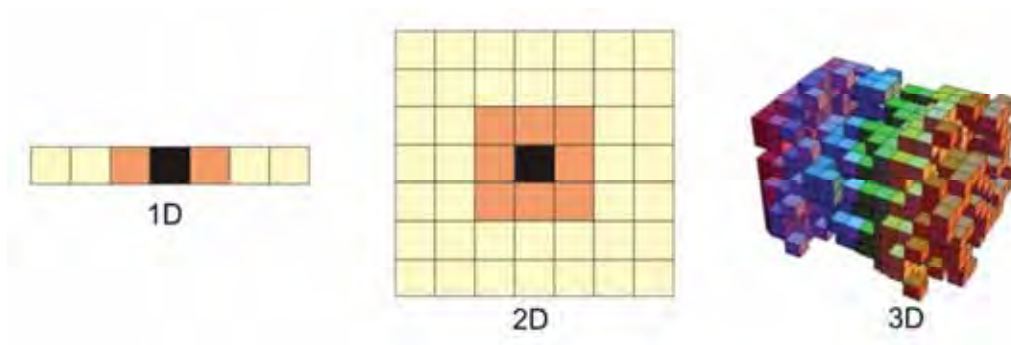
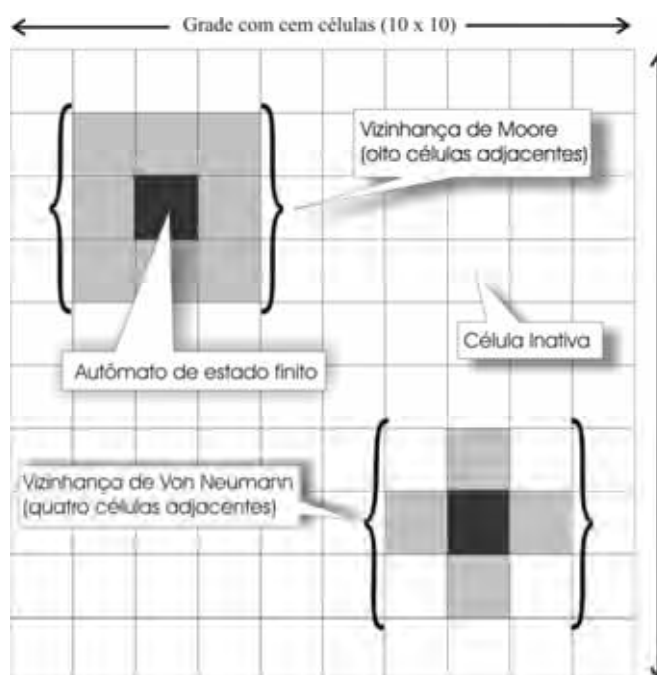


Figura 2 - Representação unidimensional (1D), bidimensional (2D) e tridimensional (3D) de um sistema de autômatos celulares.



Vizinhança: CA são baseados na interação local. Isso significa que o estado de uma célula no passo de tempo seguinte depende do estado atual das células vizinhas no passo atual. A vizinhança é determinada pela localização das células adjacentes em relação à célula central. Duas vizinhanças muito utilizadas em malhas ortogonais são a vizinhança de Moore e a vizinhança de Von Neumann. A vizinhança de Von Neumann é constituída por quatro células diretamente adjacentes. A vizinhança de Moore é composta por oito células adjacentes por aresta e vértice (Figura 3).

Figura 3 - Vizinhança de Moore e Vizinhança de Von Neumann.



Fonte: Adaptado de geosimulation.org (2011).

Estados: As células assumem a cada instante de tempo um atributo ou estado específico existente em um conjunto finito de possibilidades de estados. O conjunto de estados pode ser numérico, mas é principalmente nominal. Geralmente, as células são visualizadas através das cores diferentes para cada estado. Em modelos utilizando CA para mudanças de uso ou cobertura da terra, os estados da célula representam as classes de uso ou cobertura.

Regras de transição: Regras de transição, ou regras locais, são função dos estados das células vizinhas e determinam o estado de cada célula no próximo passo de tempo.

Passos de tempo discretos: O CA evolui como resultado das repetidas e simultâneas atualizações das células. Assim, CA são, em princípio, sistemas dinâmicos.

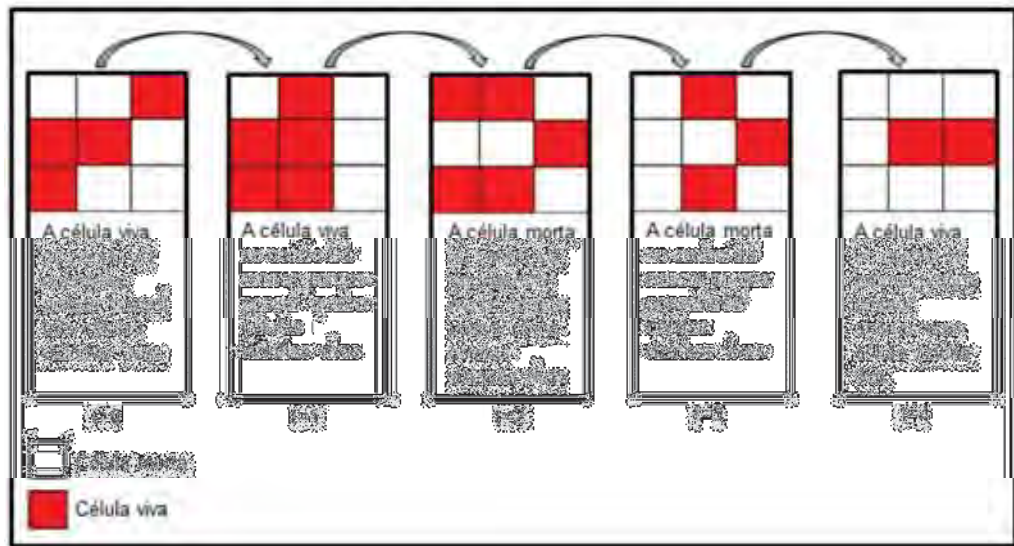
3.1.1 O Jogo da Vida de John Conway

O “Jogo da Vida” (*Game of Life*) ou simplesmente *Life*, é talvez o mais conhecido exemplo de CA e foi criado pelo matemático John Horton Conway em 1970 (GARDNER, 1970). O Jogo da Vida evolui em uma grade de células com formato quadrado, bidimensionais, utilizando a vizinhança de Moore. Neste jogo, a célula pode ter apenas dois estados: viva ou morta. O destino de cada célula depende do seu estado atual e do estado das células vizinhas. As regras que determinam o nascimento, a sobrevivência ou a morte de cada célula são chamadas de leis genéticas de Conway, que são:

- 1- Se no instante $t=0$ uma célula estiver morta e se existirem exatamente três células vizinhas vivas, então, no instante $t=1$, a célula nascerá.
- 2- Se no instante $t=0$ uma célula estiver viva e se existirem quatro ou mais células vizinhas vivas, então, no instante $t=1$, a célula morrerá (excesso de população).
- 3- Se no instante $t=0$ uma célula estiver viva, e se não existir pelo menos duas células vizinhas vivas, então, no instante $t=1$, a célula morrerá (isolamento).
- 4- Se no instante $t=0$ uma célula estiver viva e se existirem somente duas ou três células vizinhas vivas, então, no instante $t=1$, a célula permanecerá viva (sobrevivência).

Essas regras são aplicadas simultaneamente a todas as células. A Figura 4 ilustra as regras de transição aplicadas na vizinhança de Moore.

Figura 4 - Evolução de um CA baseado na vizinhança de Moore.



Fonte: Adaptado de Straatman et al. (2001).

Segundo Jordan (2003), durante o processo de evolução, uma população pode manifestar um dos seguintes comportamentos:

- Estabilidade: uma população que não muda com o tempo (estatisticamente estável);
- Oscilação: entre dois ou mais estados estáveis (dinamicamente estável);
- Crescimento: aumento da população;
- Decadência: redução da população até a sua total aniquilação (pode ocorrer, por exemplo, quando o estado inicial consiste em células colocadas de forma muito dispersa);
- Migração: população dinamicamente estável;
- Replicação: população com características repetidas.

3.2 MODELOS ESPACIAIS

Modelos podem ser definidos de várias maneiras. Para Novaes (1981), pode-se entender o termo modelo como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica etc., e segundo uma ou mais teorias.

Segundo Wilson (1974), os modelos podem ser considerados como a representação formal de alguma teoria de um sistema de interesse.

E de acordo com Rumbaugh (1991), modelo é uma representação do contexto de um problema a ser resolvido, construído com foco nas variáveis de interesse e abstraindo as variáveis que não sejam relevantes para a solução do problema.

O termo “simulação” aparece frequentemente associado à modelagem e pode ser descrito, de acordo com Shannon (1975), como o processo de elaboração de um modelo de um sistema real (ou hipotético) e a condução de experimentos com a finalidade de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação.

É interessante destacar também algumas definições apresentadas por Chiwft e Medina (2006), descrevendo o que não é simulação:

- Não é uma bola de cristal: A simulação não pode prever o futuro, o que pode ser previsto (com certo nível de confiança) é o comportamento de um sistema baseado em dados de entrada específicos e respeitando um conjunto de premissas.
- Não é uma ferramenta estritamente de otimização: A simulação é uma ferramenta de análise de cenários; ela pode ser combinada com algoritmos de otimização, mas por si só ela não é capaz de identificar uma solução ótima.
- Não é substitutiva do pensamento inteligente: A simulação não pode substituir o pensamento humano no processo de tomada de decisão, mas pode auxiliá-lo.

Frequentemente, os modelos são usados para prever panoramas futuros de padrões de cobertura da terra sob diferentes cenários biofísicos e mudanças socioeconômicas. São úteis para ajudar na tomada de decisões por órgãos públicos e podem ser usados para descrever as relações espaciais e temporais entre as forças que controlam os padrões resultantes da utilização da terra e suas alterações.

Chorley e Haggett (1974) citam como a característica mais fundamental dos modelos o fato de serem altamente seletivos em relação às informações. Esta atitude seletiva elimina os aspectos menos importantes do sistema e permite aos aspectos mais fundamentais, relevantes ou interessantes do mundo real aparecerem de alguma forma generalizada.

Os modelos espaciais têm sido usados em diversas áreas e com diferentes propósitos, como para a favorabilidade a ocorrências minerais (BONHAM-CARTER,

1989; AGTERBERG, 1989; FRANCA-ROCHA, BONHAM-CARTER e MISI, 2000; PORWAL e HALE, 2000), dinâmica de pastagens (LI e REYNOLDS, 1997), perdas de solo (VALENTIN, 2008), competição entre espécies de plantas (SILVERTOWN et al., 1992), desmatamento (VERBURG et al., 2006; MAEDA et al., 2011; SOARES-FILHO et al., 2006; AGUIAR, CAMARA e ESCADA, 2007), mudanças de uso da terra devido às alterações climáticas (ALCAMO, 1994), propagação de fogo em áreas florestadas (KARAFYLLIDIS e THANAILAKIS, 1997; SILVESTRINI, 2008), entre várias outras aplicações.

O desenvolvimento da pesquisa nesse campo foi dificultado por falhas ocorridas no passado, que levaram a um período de estagnação durante a década de 1970, tendo sido retomada nas décadas de 1980 e 1990, com a chegada de novos métodos de simulação, advindos de outras disciplinas.

Lee (1973) aponta sete erros ocorridos na modelagem urbana no passado:

1. Excessivamente abrangentes (*Hypercomprehensiveness*): tentaram replicar sistemas em modelos muito complexos que serviam a muitos propósitos de uma só vez.
2. Modelos com gigantismo (*Grossness*): os modelos necessitavam de dados muito detalhados. Isto deixou os modelos computacionalmente muito caros e difíceis de serem aplicados em ampla escala.
3. Necessidade de muitos dados (*Hungriness*): necessitavam de muitas informações para que os modelos pudessem reproduzir de forma realista uma determinada cidade.
4. Modelos equivocados (*Wrongheadedness*): foram criados modelos em que as equações que o conduziam almejavam ser representações da realidade, quando, na verdade, parecem ter distorcido o sistema por causa da má compreensão das variáveis e dos aspectos fundamentais do sistema.
5. Modelos complicados (*Complicatedness*): as iterações dentro do modelo eram muito complicadas, conectando, às vezes, centenas de fatores.
6. Modelos mecânicos (*Mechanicalness*): os computadores não tinham a mesma capacidade que têm atualmente. A execução de modelos em um computador era uma tarefa altamente especializada e também exigia muitos recursos computacionais.

7. Elevado custo (*Expensiveness*): o custo elevado era uma grande limitação ao desenvolvimento de modelos urbanos em larga escala. O tempo necessário para coletar dados, desenvolver e executar um modelo era muito longo. Hoje, a *internet* nos permite facilmente efetuar o *download* de dados geográficos para utilizá-los como entrada em um modelo e gerar resultados em questão de dias, senão, de horas.

Nos últimos anos, houve um crescimento nas pesquisas envolvendo os modelos conexionistas (modelos baseados em redes neurais artificiais, autômatos celulares e álgebra booleana). Grande parte da pesquisa nesta área tem por objetivo descobrir os princípios gerais para a organização e evolução de sistemas dinâmicos (WHITE e ENGELEN, 1994).

3.3 MODELOS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES

Os modelos baseados em CA tiveram a sua origem na Geografia Quantitativa, devido em grande parte ao trabalho de Waldo Tobler que, durante os anos de 1970, atuava na Universidade de Michigan, onde Arthur Burks e o seu Grupo de Lógica da Computação procuravam aplicar as teorias sobre auto-reprodutibilidade das máquinas, propostas durante as décadas de 1920 e 1930 por precursores da computação digital, Alan Turing e John von Neumann, sendo este último ex-professor e colega de Burks. O próprio Tobler propôs modelos de espaço celular para o desenvolvimento da cidade de Detroit, mas, em 1979, ele começou a efetivamente explorar a aplicabilidade de modelos de autômatos propriamente ditos em sistemas geográficos, o que culminou com o seu famoso artigo "*Cellular Geography*". Nos anos de 1980, em Santa Barbara, Couclelis, influenciada por Tobler, continuou essas especulações até o final da década, quando então as aplicações de autômatos começaram a se consolidar e passaram a ser dotadas de aprimoramentos conceituais, como as noções de fractais, caos, entropia, criticalidade auto-organizável (*Self-Organized Criticality* – SOC) etc. (BATTY, COUCLELIS e EICHEN, 1997; ALMEIDA, MONTEIRO e CAMARA, 2007).

Para esclarecer alguns termos mencionados acima, podemos definir fractais, de acordo com Goodchild (1980), como um conjunto geométrico, constituído de pontos, linhas, áreas e volumes, cujo comportamento morfológico ocorre de maneira irregular, e esta irregularidade se propaga geometricamente através de muitas

escalas. Caos é definido por Stewart (1991) como um comportamento estocástico (aleatório) que ocorre num sistema determinístico (governado por uma lei exata). E, criticalidade auto-organizável refere-se a sistemas onde os componentes individuais seguem sua própria dinâmica local até um estado crítico, no qual as dinâmicas emergentes são globais, e a comunicação flui livremente através de todo o sistema. Complexidade é a consequência da criticalidade auto-organizável (BAK, CHEN e CREUTZ, 1989 apud ALMEIDA et al., 2007).

Atualmente, modelos envolvendo autômatos celulares são utilizados para várias aplicações, a exemplo de alguns trabalhos envolvendo autômatos celulares citados e comentados a seguir.

Di Gregorio, Serra e Villani (1999) utilizaram um modelo de CA para simulação macroscópica da biorremediação de solos contaminados. O modelo foi testado em uma planta piloto com contaminação por fenol. O modelo mostrou-se capaz de descrever os resultados experimentais em uma ampla gama de condições.

O modelo desenvolvido por White, Engelen e Uljee (WHITE e ENGELEN, 1993, 1994; ENGELEN et al., 1995) envolveu a primeira tentativa de investigar as possibilidades de aplicação do CA para modelar e simular os padrões de crescimento urbano futuro com precisão.

Demirel e Cetin (2010) utilizaram autômatos celulares para estudar a dinâmica de uso da terra e o crescimento urbano da porção europeia de Istambul, utilizando imagens Landsat e fotografias aéreas, com o objetivo de realizar simulações para o ano de 2017.

Oguz (2004) realizou simulações para o ano de 2030 para a cidade de Houston utilizando o *software* SLEUTH (*Slope, Land use map, Excluded area, Urban area, Transportation map, Hillside area*), desenvolvido por Keith Clarke da Universidade da Califórnia em Santa Barbara (CLARKE; HOPPEN e GAYDOS, 1997). Seus resultados mostraram que Houston poderá perder 2000 Km² de floresta, cerca de 600 km² de terras agrícolas e 400 km² de áreas úmidas.

Pan et al. (2010) estudaram o impacto da variação da escala sobre o comportamento de um autômato celular usado para modelagem de mudanças de uso da terra. A variação da escala foi representada pela variação na dimensão espacial das imagens utilizadas, o tamanho das células e na configuração da

vizinhança, incluindo o tamanho e a forma. Os resultados mostraram que as variações influenciaram o comportamento do modelo de diferentes maneiras.

Verburg et al. (2002) conceberam o modelo CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*), desenvolvido especificamente para a análise do uso da terra em pequenas regiões, com uma resolução espacial mais apurada. A estrutura do modelo é baseada na teoria dos sistemas, que permite a análise integrada do uso da terra em relação aos fatores socioeconômicos e biofísicos. Duas aplicações, nas Filipinas e Malásia, são mostradas para ilustrar o funcionamento do modelo e sua validação.

Vicari et al. (2007) obtiveram resultados satisfatórios utilizando um modelo de autômatos celulares para simulação de fluxos de lava, na erupção do vulcão Etna, em 2001.

D'Ambrosio et al. (2001) desenvolveram o modelo SCAVATU (*Simulation by Cellular Automata for the Erosion of Vast Territorial Units*), para estudar a erosão do solo pela água. O modelo utiliza dados de altitude, profundidade da água subterrânea, densidade de vegetação, infiltração, transporte de sedimentos e deposição. As primeiras simulações aplicadas à microbacia do Fiumara Armaconi, Calábria, sul da Itália, deram resultados promissores, mesmo o modelo sendo passível de melhoras.

Zhao (2011) utilizou CA para desenvolver um modelo para simulação da propagação do fogo em áreas urbanas densamente urbanizadas. Ele utilizou dois padrões de propagação do fogo, um com o fogo em desenvolvimento em um único prédio e outro através da propagação do incêndio para outros edifícios. Para validar o modelo ele comparou os resultados simulados com os dados reais obtidos através de um terremoto na cidade de Kobe, no Japão, em 1995, utilizando uma ferramenta envolvendo SIG-CA-fogo. Os resultados mostraram que as características de propagação do fogo obtidas pela modelagem são semelhantes com as observadas in loco. Com base nos resultados da simulação, um modelo de avaliação de perdas pode ser formulado para calcular as perdas econômicas e de vidas após a propagação do fogo.

Aguiar, Camara e Escada (2007) estudaram as diferenças intraregionais de uso da terra na Amazônia brasileira. Eles avaliaram os fatores que são determinantes para o desflorestamento, a pastagem, a agricultura temporária e

permanente, utilizando dados obtidos de sensoriamento remoto e censitários. Os resultados mostraram que o padrão de ocupação heterogêneo da Amazônia só pode ser explicado quando se combinam vários fatores relacionados à organização dos sistemas produtivos, tais como condições ambientais favoráveis e acesso aos mercados locais e nacionais. A estrutura agrária e análise do uso da terra reforçaram esta conclusão, indicando a heterogeneidade dos sistemas de uso da terra por tipo de ator, e a influência da estrutura agrária nos padrões de uso da terra na região.

3.4 MODELAGEM COM PESOS DE EVIDÊNCIA

3.4.1 Cálculo das Taxas de Transição

Para a determinação das taxas globais de mudanças de cobertura da terra, isto é, para todo o período de simulação, foi realizada uma tabulação cruzada, cuja saída é chamada no Dinamica-EGO de matriz de transição unitária. A matriz de transição, que corresponde a própria cadeia de Markov, descreve um sistema que muda em intervalos discretos de tempo, nos quais o valor de qualquer variável em um dado período de tempo é a soma das porcentagens fixas dos valores de todas as variáveis do passo de tempo precedente (JRC e ESA, 1994). Desde que os elementos da matriz não sejam negativos, e a soma dos elementos em cada linha seja igual a 1, cada elemento da matriz é chamado de vetor de probabilidade, e a matriz P é uma matriz estocástica ou de probabilidade, conforme a Equação 1 (JUDGE e SWANSON, 1962).

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1\cdot} & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & P_{2\cdot} & P_{2j} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{3j} \\ P_{j1} & P_{j2} & P_{j\cdot} & P_{jj} \end{bmatrix}^v * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad (1)$$

Esta idéia pode ser transferida para o caso de um espaço subdividido em um número de células, onde cada uma pode ser ocupada por um determinado tipo de cobertura da terra em um determinado momento. As probabilidades de transição são então calculadas com base nos dados observados entre os períodos de tempo, que mostram a probabilidade que uma célula mude de um tipo de cobertura da terra para

outro, projetadas para um mesmo intervalo de tempo no futuro. Essa probabilidade depende apenas do estado em que uma célula está em qualquer ponto no tempo - ou seja, seu tipo de cobertura atual da terra - e não sobre os tipos de cobertura da terra que ocorreram no passado. Obviamente, a plausibilidade e aceitabilidade desta hipótese dependem do intervalo de tempo considerado (BRIASSOULIS, 2000).

A partir dos mapas de cobertura inicial e final de cada período, foram calculadas no Dinamica-EGO as matrizes de transição global e anual, sendo que para a geração desta última, é utilizado o método proposto por Bell e Hinojosa (1977), baseado nos auto-valores e auto-vetores da matriz global, conforme a Equação 2.

$$MT_{anual} = H.V^{\frac{1}{n}}.H^{-1} \quad (2)$$

Em que MT_{anual} é a matriz anual de transições de cobertura da terra. H são os auto-vetores da matriz global de transições, V são os auto-valores da matriz global de transições, n é o número de passos anuais dentro do período total analisado, H^{-1} é a matriz inversa de auto-vetores da matriz global de transições.

3.4.2 Calibração do Modelo

A calibração do modelo visa à seleção do melhor conjunto de variáveis que tentam explicar as mudanças de cobertura da terra ocorridas em determinado período. Para este propósito, 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 mudanças de cobertura da terra, este método avalia a probabilidade de que um evento ocorra, a exemplo da alteração de uma classe (p. ex. cobertura de “vegetação arbórea para outros”), posto que uma evidência (p. ex. 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 de uma variável na probabilidade espacial de uma

transição $i \Rightarrow j$ (SOARES-FILHO et al., 2009) e são calculados conforme as Equações 3 e 4.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}}, \quad (3)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+, \quad (4)$$

Em que $O\{D\}$ 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 positivo de evidência de ocorrer o evento D , dado um padrão espacial B (BONHAM-CARTER, 1994; SOARES-FILHO et al., 2003). A probabilidade a posteriori de uma transição $i \Rightarrow j$, dado um conjunto de dados espaciais (B, C, D, \dots, N), é expressa conforme a Equação 5.

$$P\{i \Rightarrow j | B \cap C \cap D \dots \cap N\} = \frac{O_{ij} e^{\sum W_{N^+}}}{1 + O_{ij} e^{\sum W_{N^+}}} \quad (5)$$

Enquanto o peso negativo de evidência (W) é calculado conforme as Equações 6 e 7.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{\bar{B}/D\}}{P\{\bar{B}/\bar{D}\}} \quad (6)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^- \quad (7)$$

Para testar a significância da associação entre a ocorrência das transições, referentes às mudanças de cobertura da terra, a cada um dos intervalos definidos para as variáveis, utilizou-se a medida de contraste entre os valores positivos e

negativos dos pesos de evidência calculados pelo Dinamica, cuja fórmula é dada por:

$$C = W^+ - W^- \quad (8)$$

Esta medida é considerada estatisticamente significativa, com um intervalo de confiança de 95% se $|C| > 1,96 s(C)$, sendo que a variância do contraste, $S^2(C)$, é determinada por (GOODACRE et al., 1993):

$$S^2(C) = \frac{1}{\text{area}(B \cap D)} + \frac{1}{\text{area}(B \cap \bar{D})} + \frac{1}{\text{area}(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{\text{area}(\bar{B} \cap \bar{D})} \quad (9)$$

Pesos de evidência são aplicados no Dinamica-EGO após a categorização dos mapas de variáveis contínuas. Neste processo, a preservação da estrutura dos dados é essencial. Para esta finalidade, o Dinamica-EGO usa um método adaptado de Agterberg e Bonham-Carter (1990) e Goodacre et al., (1993), no qual os intervalos são calculados de acordo com a estrutura dos dados. Depois, são aplicados os intervalos de categorização para o cálculo dos pesos de evidência. Valores positivos são obtidos para variáveis que favorecem determinada transição, enquanto valores negativos indicam baixa probabilidade de transição, e valores próximos a zero são obtidos para variáveis que não exercem efeito sobre a transição.

Entre as vantagens em se utilizar o método de pesos de evidência, Bonham-Carter (1994) destaca:

1. Não é restringido pelas suposições dos métodos estatísticos paramétricos, os quais são frequentemente violados pelos dados espaciais.
2. É um método objetivo e simples de ser calculado, pois usa somente o resultado da tabulação cruzada entre o mapa de mudanças – produto do cruzamento de mapas multitemporais – e os mapas das variáveis proximais, para alimentar fórmulas implementadas em planilhas eletrônicas.

3. O efeito de cada variável pode ser calculado independentemente de uma solução conjunta, tendo como premissa apenas que as variáveis de entrada sejam espacialmente independentes.

E a principal desvantagem deste método é que ele assume que os mapas de entrada são condicionalmente independentes entre eles.

3.4.3 Teste da Independência Condicional

O método de pesos de evidência necessita que os mapas de entrada sejam espacialmente independentes. Para isso, um grupo de testes estatísticos é aplicado para estimar esta suposição, como o índice de Cramer (V), de Incerteza de Informação Conjunta (*Joint Information Uncertainty – U*), medidas de entropia e o qui-quadrado. Segundo Bonham-Carter (1994), valores menores do que 0,50 sugerem menos associação do que mais. Em valores de pares de mapas correlacionados que apresentem resultados superiores a 0,50, deve ser escolhida uma variável e eliminá-la, considerando (BONHAM-CARTER, 1994):

- 1) A variável a ser eliminada deve ser aquela que apresenta menor potencial explicativo para o fenômeno de mudança de cobertura da terra, isto é, aquela que é menos correlacionada com o evento.
- 2) Quando ambas as variáveis são importantes para modelar o fenômeno, ambas podem ser combinadas em um único *layer*, através de uma operação booleana. Assim, não há perda de informação.

Neste trabalho, utilizaram-se os valores dos testes de Cramer e a Incerteza da Informação Conjunta para estimar a independência entre as variáveis. Estes índices possuem valores variando de zero (0) a um (1), sendo que quanto mais próximos de zero os valores, menor o grau de dependência entre as variáveis.

Em ambos os casos, é necessário que se obtenham valores de áreas de uma tabulação cruzada entre pares de mapas de variáveis sob análise. Chamando-se a tabela de áreas entre os mapas A e B como matriz T , com elementos T_{ij} , $i = 1, 2, \dots, n$ classes do mapa B (linhas da tabela), e $j = 1, 2, \dots, m$ classes do mapa A (colunas da tabela). Os totais marginais de T são definidos como T_i para a soma da i -ésima linha, T_j para a soma da j -ésima coluna, e $T_{..}$ para o grande somatório de linhas e colunas. Se os dois mapas são independentes um do outro, sem qualquer correlação entre eles, então a área esperada em cada categoria de sobreposição é

dada pelo produto entre os totais marginais, dividido pelo somatório total. Portanto, a área esperada T_{ij}^* para a i -ésima linha e j -ésima coluna é:

$$T_{ij}^* = \frac{T_{i.} T_{.j}}{T_{..}} \quad (10)$$

Assim, a estatística chi-quadrado é definida como:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{..}} \quad (11)$$

A expressão $(\text{observado} - \text{esperado})^2/\text{esperado}$ possui um limite inferior igual a 0 (zero) quando as áreas observadas coincidem exatamente com as áreas esperadas, e os dois mapas são completamente independentes. Quando as áreas observadas tornam-se cada vez mais diferentes das esperadas, o qui-quadrado cresce e possui limites superiores variáveis. O Índice de Cramer (V) é então definido por Bonham-Carter (1994) como:

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{T_{..} M}} \quad (12)$$

Em que X^2 é a estatística do qui-quadrado da tabela de contingência relacionando duas variáveis; $T_{..}$ corresponde à soma total dos valores da tabela de contingência; M é o mínimo de $(n-1, m-1)$, sendo n o número de linhas, e m , o número de colunas.

A Incerteza de Informação Conjunta (U) pertence à classe de medidas de entropia, as quais também são baseadas na matriz de tabulação cruzada, mas também pode ser utilizada para a medição de associações. Supondo-se que os valores T_{ij} sejam transformados em proporções de área, p , dividindo-se cada elemento de área pelo somatório total $T_{..}$. Portanto, $p_{ij} = T_{ij}/T_{..}$, e as proporções marginais são definidas como $p_i = T_{i.}/T_{..}$ e como $p_j = T_{.j}/T_{..}$. Medidas de entropia, ou

“estatísticas da informação”, são definidas usando-se as proporções de área como estimativas de probabilidades. Proporções não possuem dimensão, o que faz com que índices de entropia possuam vantagem sobre os de qui-quadrado, por não serem afetados por unidades de medida (BONHAM-CARTER, 1994).

Assumindo-se que uma matriz de proporções de área para os mapas A e B tenha sido determinada a partir de T , então a *entropia* de A e de B são definidas como:

$$H(A) = -\sum_{j=1}^m p_{.j} \ln p_{.j} \quad (13)$$

$$H(B) = -\sum_{i=1}^n p_{i.} \ln p_{i.} \quad (14)$$

em que \ln é o logaritmo natural. A entropia conjunta da combinação, $H(A,B)$, é:

$$H(A,B) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (15)$$

Assim, a “Incerteza de Informação Conjunta” de A e B, $U(A,B)$, pode ser usada como uma medida de associação e é definida por:

$$U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right], \quad (16)$$

a qual varia entre 0 (zero) e 1 (um). Quando os dois mapas são completamente independentes, então $H(A,B) = H(A) + H(B)$ e $U(A,B)$ é 0, e quando os dois mapas são completamente dependentes, $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$, e $U(A,B)$ é 1.

3.4.4 Funções de Transição

O Dinamica divide a função de transição nas células vizinhas em dois processos, denominados *expander* e *patcher*.

A função *expander* é responsável pela expansão ou contração de manchas previamente existentes de certa classe de cobertura da terra, enquanto a função

patcher destina-se exclusivamente à 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, CERQUEIRA e PENNACHIN, 2002).

Estes processos necessitam que sejam definidos os parâmetros referentes ao tamanho médio das manchas a serem criadas, variância do tamanho e a isometria.

A isometria corresponde a um índice de agregação das manchas, cuja variação permanece entre zero (0) e dois (2). Caso seja zero, as manchas geradas serão totalmente desagregadas; igual a um, o grau de agregação será determinado pelas probabilidades, e, se for dois, as manchas serão bastante agregadas. O valor definido para a isometria irá multiplicar as probabilidades da janela de vizinhança durante a execução dos algoritmos de transição (TRENTIN, 2008).

3.4.5 Testes de Validação

Testes de validação podem ser entendidos como procedimentos para se verificar se os modelos refletem ou não a realidade no grau desejado (BATTY, 1976). Mesmo mapas que não se assemelham exatamente célula-a-célula podem ainda apresentar padrões similares e, igualmente, concordância espacial nas proximidades de uma célula. Para lidar com essa questão, muitos métodos de comparação baseados em proximidade têm sido desenvolvidos. Por exemplo, Costanza (1989) introduziu procedimento de ajuste de resoluções múltiplas que compara o ajuste de um mapa em tamanhos crescentes de janelas. Pontius (2002) apresentou um método similar ao de Costanza (1989) que diferencia erros devidos à localização e à quantidade. Power, Simms e White (2001) forneceram um método de comparação baseado em casamento de padrão *fuzzy* hierárquico. Por sua vez, Hagen (2003) desenvolveu novas métricas, incluindo o *Kfuzzy*, considerado como equivalente à estatística Kappa, e a similaridade *fuzzy* que leva em consideração a incerteza da localização de uma categoria dentro da vizinhança de uma célula (SOARES-FILHO et al., 2009).

O Dinamica apresenta dois métodos de validação: utilizando decaimento constante ou decaimento exponencial. O método de decaimento exponencial

consiste em uma adaptação do método de Hagen (2003) por Soares-Filho et al. (2005) e baseia-se no conceito de “*fuzziness of location*” (dubiedade de localização), no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma, e, em menor proporção, pelas células vizinhas. Sem levar em conta a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança “*fuzzy neighborhood*” pode representar a dubiedade de localização.

Esse método de avaliação é considerado como de concordância flexível, pois não se baseia no ajuste *pixel a pixel*, mas sim no ajuste por múltiplas resoluções, no qual os valores tendem a serem superiores quando comparados aos índices de concordância rígida. O índice tende a ser maior quanto maiores forem as janelas de amostragem. Assim sendo, a partir de certa resolução (em geral, acima de 11 ou 13 pixels) é comum ocorrer a saturação, conferindo ineficiência ao mesmo para avaliar o ajuste entre o mapa real e o mapa simulado (COSTANZA, 1989).

No método de validação por decaimento exponencial um vetor *fuzzy* é associado a cada célula no mapa. Esse vetor possui tantos elementos quantos forem as categorias (classes de cobertura da terra) dos mapas, adotando 1 para a categoria = i , e $2^{-d/2}$ para categorias diferentes de i , em que (d) é a distância unitária entre células. Quando a classe não for encontrada na janela de vizinhança, adota-se o valor 0 (zero). O vetor de vizinhança fuzzy (V_{nbhood}) para cada célula é dado por:

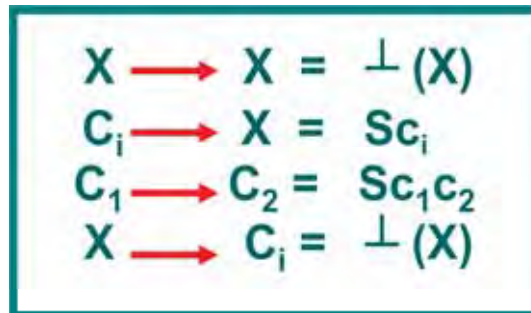
$$V_{nbhood} = \begin{pmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \mu_{nbhoodC} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\mu_{nbhood\ i} = \left| \mu_{nbhood\ i,1} * m_1, \mu_{crisp\ i,2} * m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,N} * m_N \right|_{Max} \quad (18)$$

Em que μ_{nbhood_i} representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de R células (normalmente $R=n^2$); $\mu_{crisp_{ij}}$ é a pertinência da categoria i para a célula vizinha j , assumindo-se no vetor $crisp$ 1 para i , e 0 para categorias diferentes de i ($i \in C$); m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , em que m refere-se a uma função de decaimento da distância, por exemplo, um decaimento exponencial ($m = 2^{-d/2}$), sendo d a distância unitária entre células, medida de centróide a centróide.

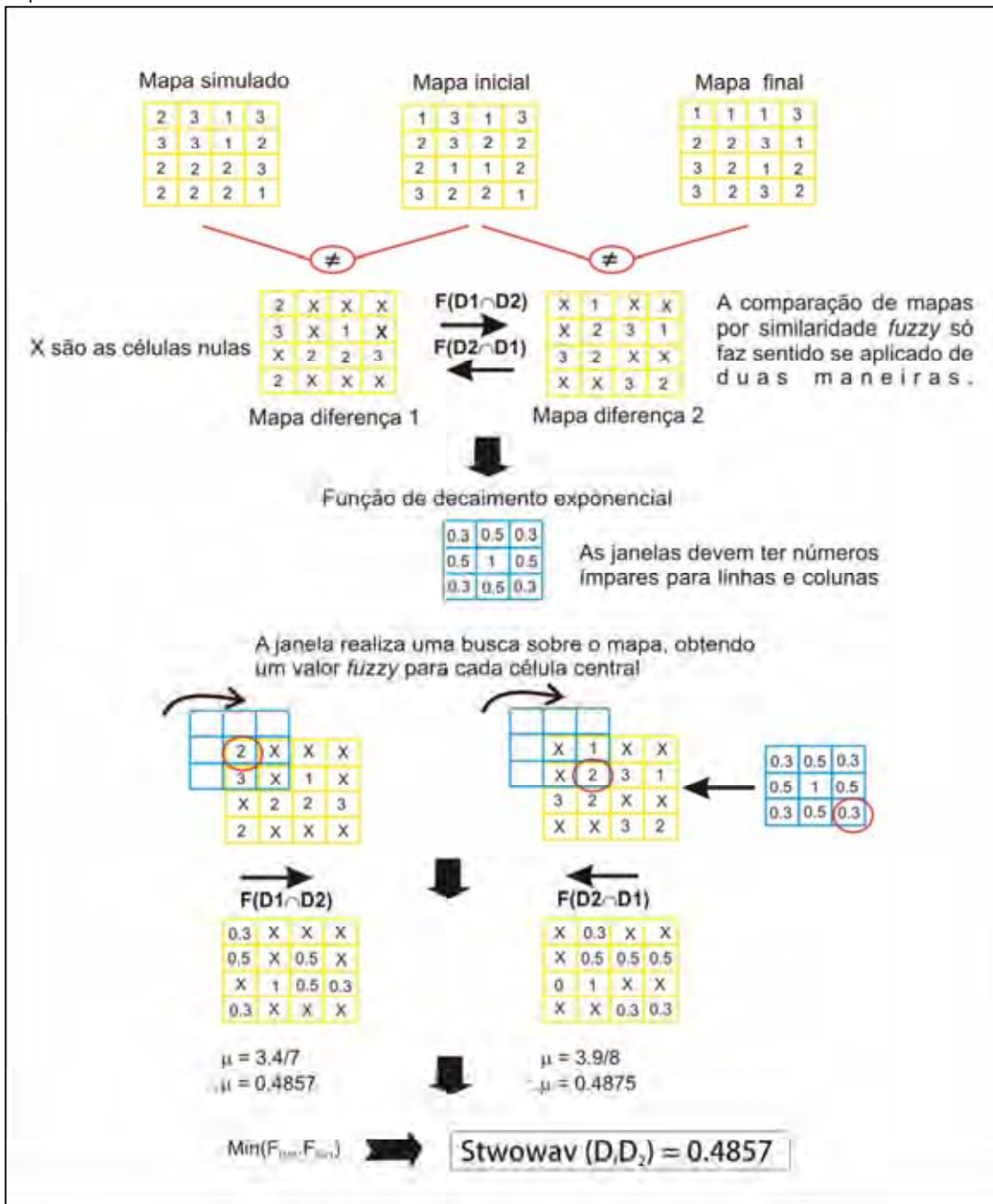
A escolha da função de decaimento mais apropriada e do tamanho da janela de amostragem depende da incerteza dos dados e do limiar de tolerância do erro espacial. Embora não haja consenso sobre qual ajuste definiria um limiar de aceitação ou rejeição do modelo, aceita-se que um modelo apresenta bons resultados quando seu ajuste é superior ao obtido a partir de uma comparação entre os mapas final e inicial (HAGEN, 2003). A Figura 5 mostra as regras aplicadas para a validação do modelo utilizando decaimento exponencial e a Figura 6 ilustra o método de comparação *fuzzy* em uma função de decaimento exponencial.

Figura 5 - Regras aplicadas para validação do modelo utilizando decaimento exponencial.



Fonte: Soares-Filho et al. (2009).

Figura 6 – Método de comparação *fuzzy* usando o mapa de diferenças em uma função de decaimento exponencial.



Fonte: Adaptado de Soares-Filho et al. (2009).

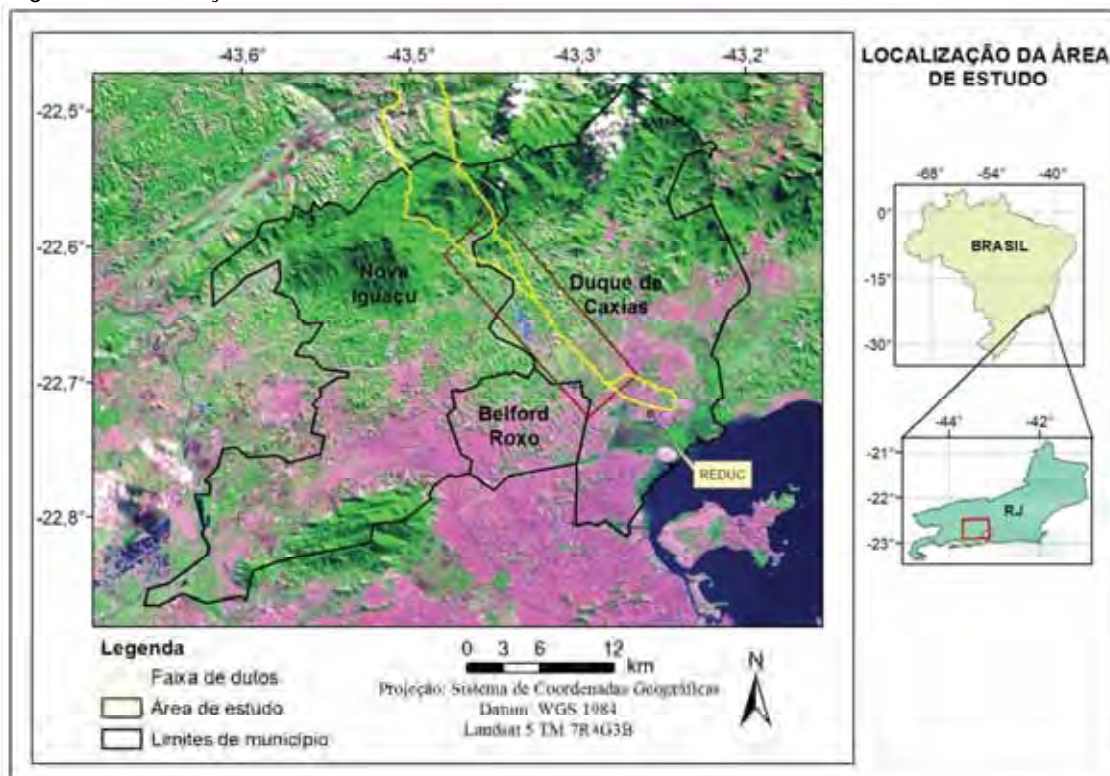
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo selecionada possui 9712 ha ($\sim 97 \text{ km}^2$), englobando porções dos municípios de Nova Iguaçu, Belford Roxo e Duque de Caxias, localizados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Figura 7), fazendo limite com os municípios de Magé, Petrópolis, Miguel Pereira, Japeri, Queimados, Seropédica, Rio de Janeiro, Mesquita e São João de Meriti.

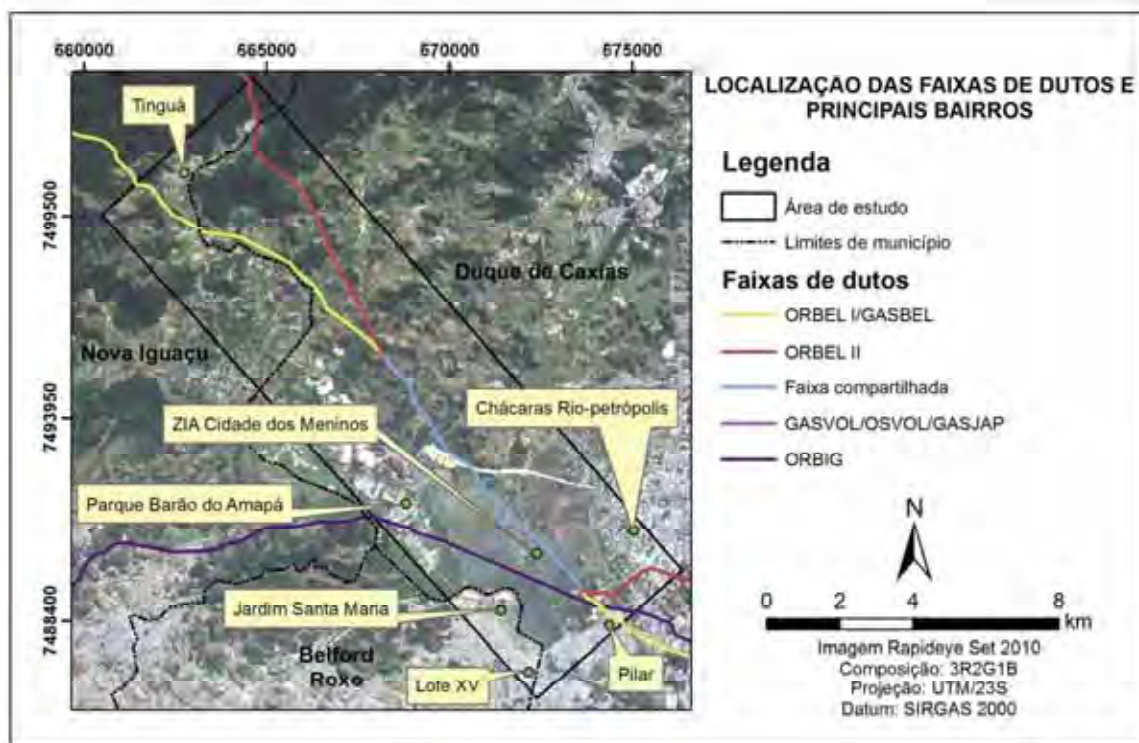
Os principais bairros abrangidos são: Tinguá, em Nova Iguaçu; Jardim Santa Maria e Lote XV, em Belford Roxo; e Parque Barão do Amapá, Pilar, Chácara Rio-Petrópolis e Cidade dos Meninos, em Duque de Caxias. Este último constitui uma Zona de Interesse Ambiental (ZIA), marcada pela desativação de uma fábrica 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 7 - Localização da área de estudo.



A localização dos principais bairros e das faixas de dutos que atravessam a área de estudo está demonstrada na Figura 8.

Figura 8 - Localização dos principais bairros na área de estudo.



A escolha da área foi baseada na facilidade de acesso e nos aspectos geológicos, geomorfológicos e de ocupação da terra, de forma a enriquecer a modelagem.

O município de Belford Roxo, embora não seja atravessado pela faixa de dutos, também foi considerado neste trabalho devido à Área de Influência Indireta (All). A Área de Influência Indireta é aquela real ou potencialmente sujeita aos impactos indiretos da operação do duto. A All considerada compreende uma faixa de 10 km, sendo 5 km para cada lado do duto.

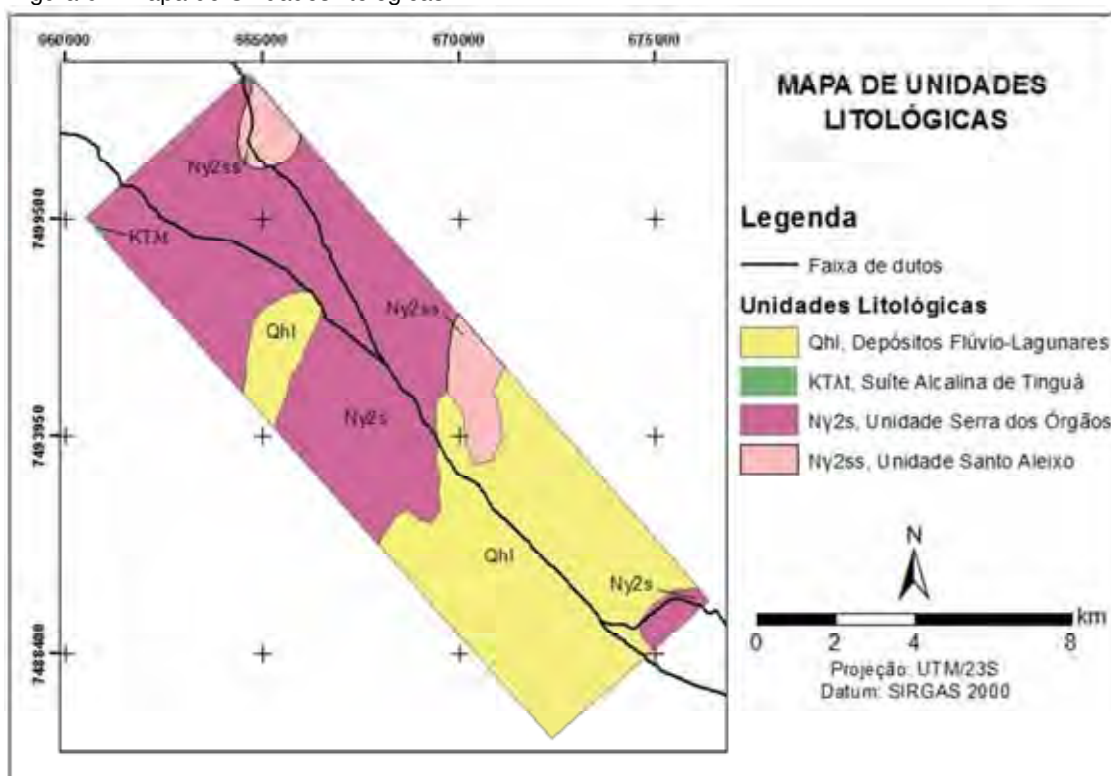
4.2 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

O estado do Rio de Janeiro, contido geotectonicamente na Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1981), pode ser dividido estruturalmente em três

grandes blocos crustais de direção NE-SW: Cabo Frio; Serra dos Órgãos e das Zonas de Cisalhamento (FONSECA et al., 1998).

Em termos litológicos, ocorrem na área de estudo Depósitos Flúvio-Lagunares, rochas alcalinas cretácicas/terciárias da Suíte Alcalina de Tinguá e granitóides da Unidade Serra dos Órgãos e da Unidade Santo Aleixo. Os depósitos flúvio-lagunares são compostos de argila, rica em matéria orgânica, e concentrações localizadas de diatomita, turfas, localmente portadoras de depósitos conchíferos (QhI). A Suíte Alcalina de Tinguá ocupa uma pequena porção da área e é composta por sienitos, nefelina sienitos, foyaitos, fonolitos, traquitos, tinguaitos, pulaskitos umptequititos e fenitos (KTAt). Os granitóides da Serra dos Órgãos são constituídos de hornblenda-biotita granitóides de granulação grossa (Ny2s). Os granitóides Santo Aleixo, por sua vez, são compostos por granada-hornblenda-biotita granodioritos, ricos em xenólitos de paragnaisse (Ny2ss) (DRM, 1980; CPRM, 2000 e 2004). A distribuição espacial das diferentes litologias está ilustrada na Figura 9.

Figura 9 – Mapa de Unidades litológicas.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000) por Ferreira (2009).

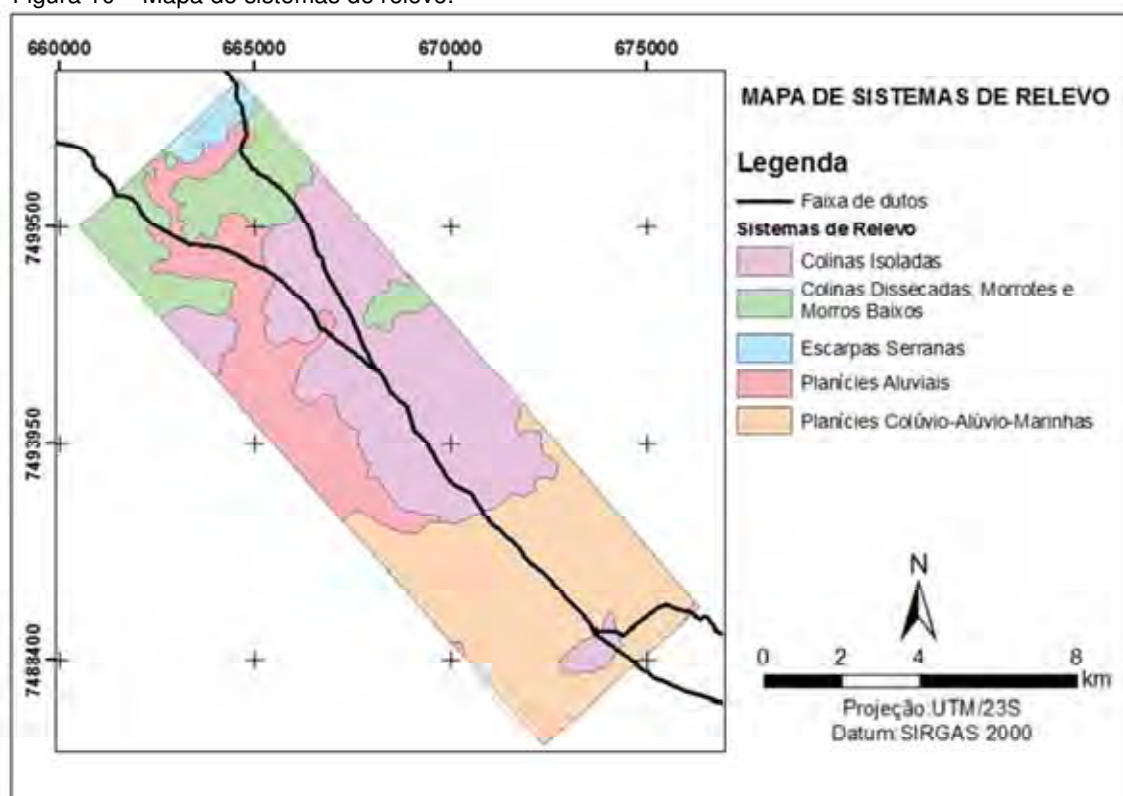
Os sistemas de relevo presentes na área estão descritos no quadro 1 e distribuídos conforme ilustrado na Figura 10.

Quadro 1 – Descrição dos sistemas de relevo.

Sistemas de Relevo	Descrição
Planícies Aluviais	Constituído de planícies aluviais de inundação, terraços fluviais e leques alúvio-colúviais. Apresenta superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos canais-tronco.
Planícies Colúvio-Alúvio-Marinhas	Apresenta superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes à linha de costa, de interface com os sistemas deposicionais continentais (processos fluviais e de encosta) e marinhos. Os terrenos são mal drenados, com padrão de canais meandrante. Existe a presença de superfícies de aplainamento e pequenas colinas ajustadas ao nível de base das baixadas.
Colinas Isoladas	Ocorre em maior concentração na zona de transição entre os domínios baixada e escarpas serranas e é constituído de formas de relevo residuais das rochas do embasamento pré-cambriano, com vertentes convexas e topos arredondados ou alongados, com sedimentação de colúvios, remanescentes do afogamento generalizado do relevo produzido pela sedimentação flúvio-marinha que caracteriza as baixadas litorâneas. Apresenta densidade de drenagem muito baixa com padrão dendrítico, drenagem imperfeita nos fundos de vales afogados e predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 100 m e gradientes suaves.
Colinas Dissecadas, Morrotes e Morros Baixos	Este sistema de relevo é constituído por colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados e/ou alongados e de morrotes e morros dissecados, com vertentes retilíneas e côncavas e topos aguçados ou alinhados, com sedimentação de colúvios e alúvios. Apresenta densidade de drenagem média a alta com padrão variável, de dendrítico a treliça ou retangular e o predomínio de amplitudes topográficas entre 100 e 200 m e gradientes suaves a médios.
Escarpas Serranas	As escarpas serranas são constituídas de relevos montanhosos, extremamente acidentados, transicional entre dois sistemas de relevo. As vertentes são predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Apresentam densidade de drenagem muito alta com padrão variável, de paralelo a dendrítico, ou treliça a retangular, com predomínio de amplitudes topográficas superiores a 500 m e gradientes muito elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus.

Fonte: CPRM (2000).

Figura 10 – Mapa de sistemas de relevo.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000) por Ferreira (2009).

4.3 CLIMA

Na área de estudo, predomina o clima tropical semiúmido, com chuvas abundantes no verão e invernos secos. Durante o verão, as frentes frias que se originam na região antártica cruzam o Oceano Atlântico sul e se deparam com as massas tropicais de ar quente. Esse encontro gera uma instabilidade atmosférica que, associada ao relevo escarpado, forma uma barreira natural para as correntes de ar e tem como consequência chuvas torrenciais (GUIDICINI e IWASA, 1976).

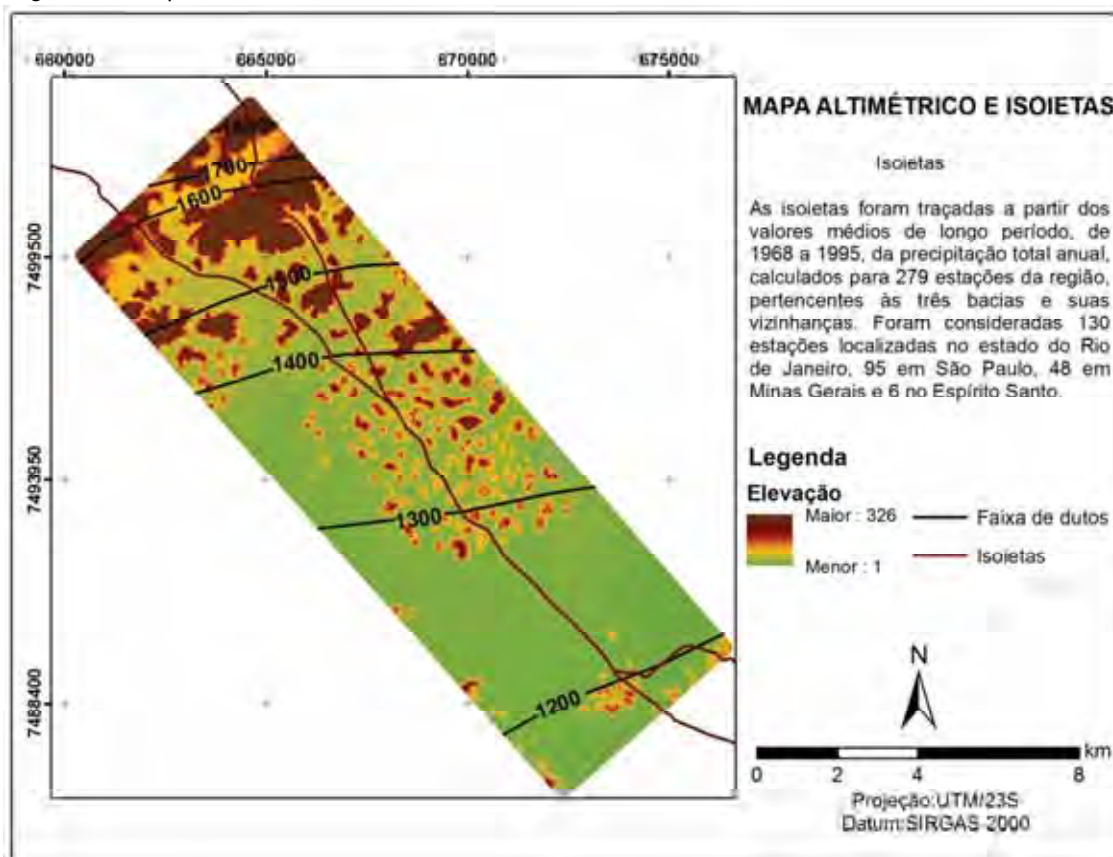
Os índices pluviométricos mais elevados do estado são registrados na Serra do Mar, de 2.000 mm a 4.500 mm, pois a maior parte das precipitações está relacionada a instabilidades frontais e pós-frontais, sendo assim, a Serra do Mar é sempre a primeira a ser atingida pelas correntes de origem subpolar. Em função desta dinâmica, a Serra da Mantiqueira registra pluviosidade um pouco menor, em média de 2.000 a 2.500 mm de chuva durante o ano (CPRM, 2000).

O verão estende-se de dezembro a março, com temperaturas variando entre 25° C e 40° C. No inverno, de junho a agosto, a temperatura cai para uma média de 20° C durante o dia e cerca de 16° C durante a noite.

Na região, os ventos de norte a leste são observados nos meses de janeiro a março, com uma intensidade maior no mês de janeiro (verão=2,2 m/s). No período de abril a junho, a predominância ainda é dos ventos de nordeste, mas com ocorrência de ventos de sul (outono e inverno=1,2 m/s). Para o período de julho a dezembro (primavera=2,4 m/s), predominam os ventos de leste e nordeste ao longo de todos os meses e com menor ocorrência dos ventos de sul.

Especificamente nos municípios selecionados, de acordo com o Mapa de Isoietas Totais Anuais elaborado pela CPRM (2000), a pluviosidade média anual varia de 1.200 mm a 1.800 mm. Através das isoietas de médias anuais e do mapa altimétrico, ilustrados na Figura 11, é possível notar a relação direta da pluviosidade com a variação da altitude.

Figura 11 - Mapa altimétrico e isoietas.



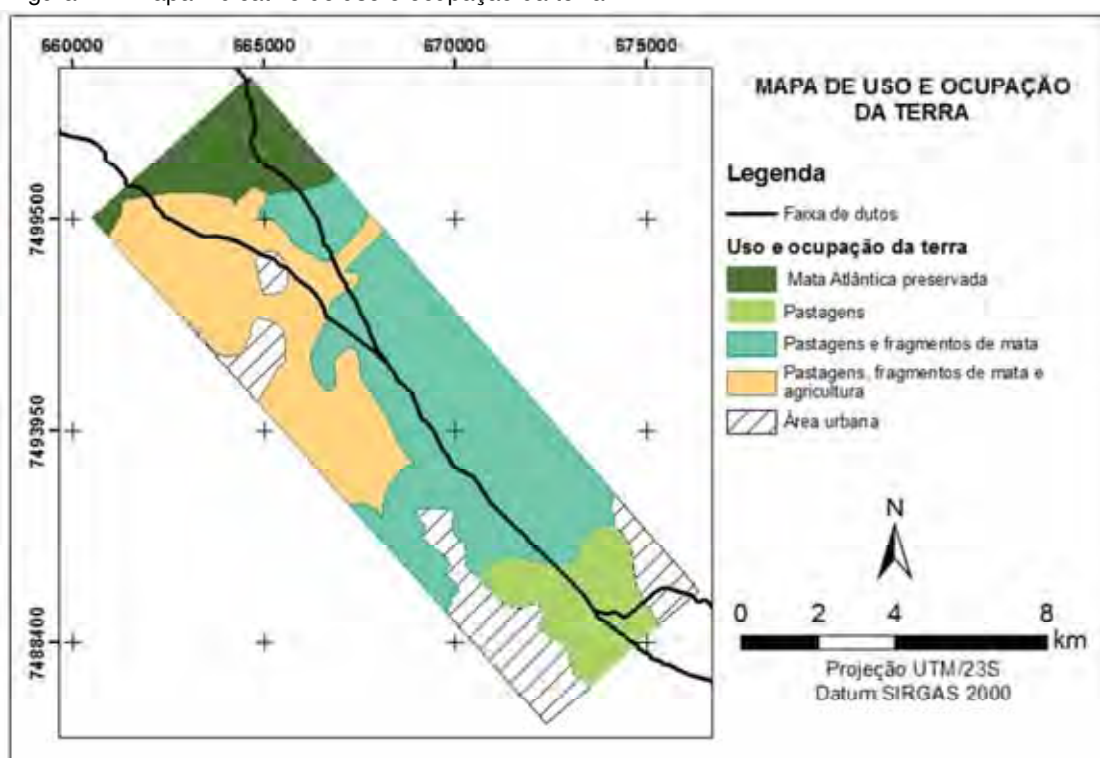
Fonte: Adaptado de CPRM (2000) e Miranda (2005) por Ferreira (2009).

4.4 MAPA DE VEGETAÇÃO NATURAL E DE USO E OCUPAÇÃO DA TERRA

De acordo com as informações referentes à vegetação natural e uso e ocupação, pode-se reclassificar o mapa geoambiental e obter um mapa indicativo do uso e ocupação da terra (Figura 12), além de um mapa da vegetação natural (Figura 13).

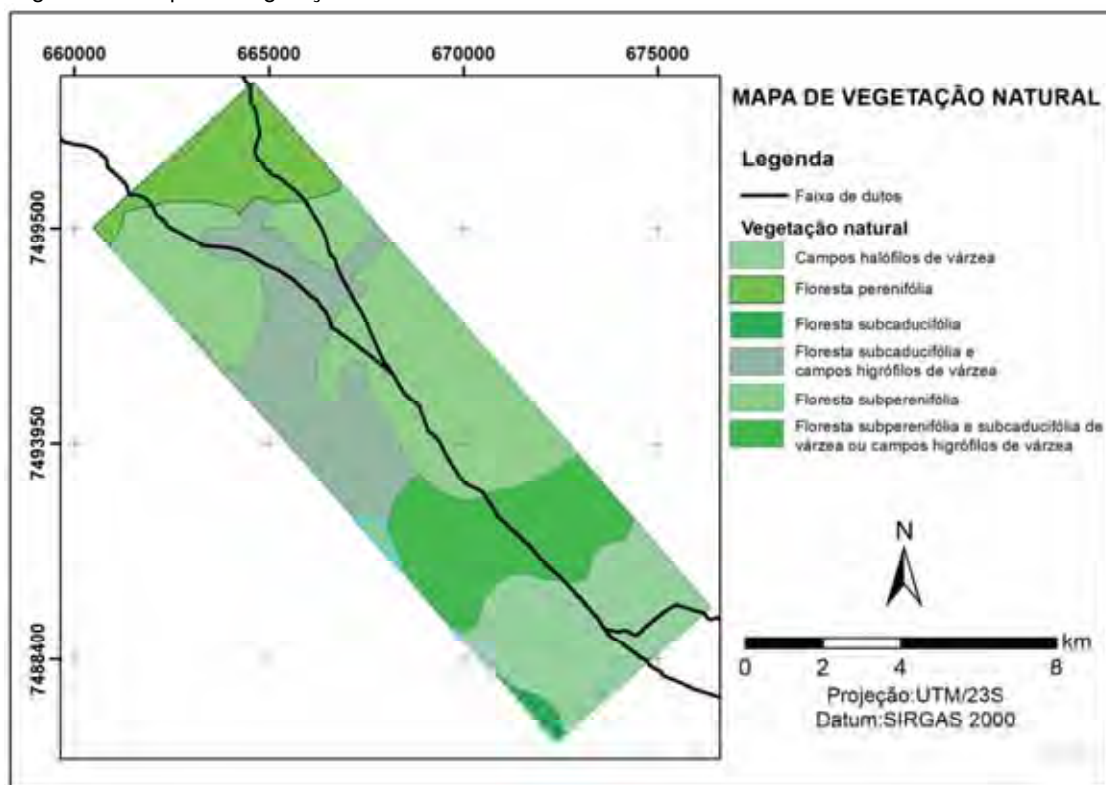
A Figura 12 foi considerada um mapa indicativo, pois algumas das classes representam mais de um uso, não sendo possível determinar qual é o uso exato da área. De acordo com as Figuras 13 e 14, é possível observar que os maiores núcleos urbanos ocuparam as áreas de planícies fluviais, marinhas e lagunares, seguido pelas áreas de colinas e morros baixos, enquanto que a vegetação natural encontra-se melhor preservada em regiões das escarpas serranas e de maciços alcalinos (FERREIRA, 2009).

Figura 12 - Mapa indicativo de uso e ocupação da terra.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000) por Ferreira (2009).

Figura 13 - Mapa de vegetação natural.



Fonte: Adaptado de CPRM (2000) por Ferreira (2009).

4.5 CONTEXTO GEOAMBIENTAL

Em termos geoambientais, a área de estudo está localizada, segundo o IBGE (2004), no bioma da Mata Atlântica. De acordo com o projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1983), a área está inserida no domínio vegetacional denominado de Floresta Ombrófila Densa, caracterizada pelos índices pluviométricos mais elevados da região litorânea, com precipitação bem distribuída durante todo o ano, determinando um clima sem período seco.

Para caracterizar a vegetação natural e o uso e ocupação atual foi utilizado o mapa geoambiental obtido do Projeto Rio (CPRM, 2000), baseado em aspectos de geologia, geomorfologia, da morfologia do terreno, solo, vegetação original, uso da terra e precipitação para a delimitação de domínios geoambientais.

No quadro 2 estão descritas as unidades geoambientais inseridas na área na área. A Figura 14 apresenta o mapa das unidades geoambientais.

Quadro 2 – Descrição das unidades geoambientais.

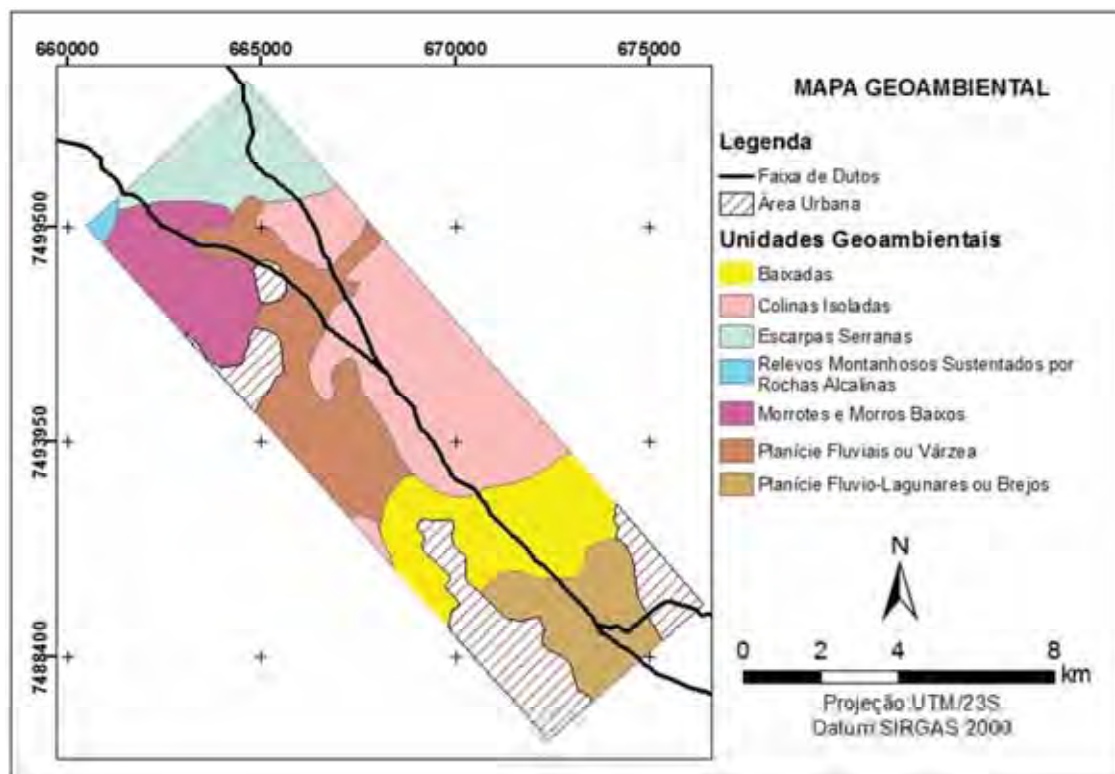
Unidades Geoambientais	Descrição
Planícies Flúvio-Lagunares ou Brejos	Constituídas por sedimentos quaternários, argilo-arenosos ou argilosos ricos em matéria orgânica. Concentram-se próximos aos mangues da Baía da Guanabara; a vegetação original é constituída de campos halófilos de várzea, que atualmente se encontram, em sua maior parte, ocupados por pastagens.
Baixadas	Representadas pelas planícies constituídas por sedimentos quaternários, argilo-arenosos e/ou areno-argilosos. A vegetação original é composta por florestas subperenifólia e subcaducifólia de várzea ou campos higrófilos de várzea. A área está atualmente ocupada por pastagens e sofre uma constante expansão da malha urbano-industrial, restando apenas pequenos fragmentos de mata nativa.
Planícies Fluviais ou Várzea	As planícies fluviais são constituídas por sedimentos quaternários, arenosos e/ou areno-argilosos, localizadas no sopé da escarpa da Serra do Mar, a vegetação original é composta por floresta subcaducifólia e campos higrófilos de várzea. Atualmente, estão ocupadas por pastagens e agricultura e, subordinadamente, por pequenos núcleos urbanos e fragmentos de mata.
Colinas Isoladas	Correspondem a colinas residuais sustentadas por ortognaisses, paragnaisses, granitóides e granodioritos, situados no <i>graben</i> da Baía da Guanabara, e estão isoladas pela sedimentação fluvial nos baixos cursos dos principais rios. A vegetação original é composta por floresta subperenifólia, junto aos contrafortes da Serra do Mar, desde o recôncavo da Baía de Guanabara até o Rio do Imbé; e floresta subcaducifólia, nas bacias dos rios Guandu, Caceribu e Bacaxá. Esta área está ocupada por pastagens e pequenos fragmentos de mata, sendo densamente urbanizada pela Região Metropolitana.
Morrotes e Morros Baixos	Sustentados por ortognaisses, paragnaisses, granitos e granitóides. O relevo é bastante dissecado, apresentando morros com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados ou alongados ou morrotes com vertentes côncavas e topos alinhados. Amplitudes topográficas entre 100 m e 200 m. A vegetação original era composta por floresta subperenifólia. Atualmente, esta unidade está ocupada principalmente por pastagens, seguidas de pequenos fragmentos de mata.

Quadro 2 – Descrição das unidades geoambientais (cont.).

Unidades Geoambientais	Descrição
<p align="center">Relevos Montanhosos Sustentados por Rochas Alcalinas</p>	<p>Os relevos montanhosos sustentados por rochas alcalinas apresentam vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, com amplitudes topográficas superiores a 400 m. A vegetação original é composta de floresta perenifólia, restrita ao maciço do Tinguá, e floresta subperenifólia e, subordinadamente, subcaducifólia, restrita ao maciço do Medanha. Ambos os maciços preservam a Mata Atlântica original.</p>
<p align="center">Escarpas Serranas</p>	<p>As escarpas serranas são sustentadas por granitóides, paragnaisses, ortognaisses migmatíticos, granulitos e charnockitos e apresentam vertentes retilíneas a côncava, com amplitudes topográficas superiores a 300 m. A vegetação original era composta por floresta perenifólia, que abrangiam vastas áreas das escarpas da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira, e floresta subperenifólia. Atualmente, são ocupadas por vegetação da Mata Atlântica preservada e por extensos fragmentos de mata e pastagens.</p>

Fonte: CPRM (2000).

Figura 14 - Mapa de Unidades Geoambientais.



Fonte: CPRM (2000). Organizado por Ferreira (2009).

4.6 ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

Os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias e Nova Iguaçu estão entre os mais populosos do Brasil e apresentam uma dinâmica socioeconômica acelerada pela presença de grandes parques industriais e pela proximidade da capital.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os dados populacionais e econômicos dos municípios estudados.

Tabela 1 - Dados populacionais para a área de estudo.

Município	População total (2010)	População urbana (2010)	População rural (2010)	Densidade demográfica hab/km ² (2010)	Crescimento de 1996 a 2007	IDHM ¹ 2000
Belford Roxo	469.332	100%	0%	6.031,38	20,46%	0,742
Duque de Caxias	855.048	99,66%	0,34%	1.828,51	18,33%	0,753
Nova Iguaçu	796.257	100%	0%	1.527,60	0,73%	0,777

¹ IDHM Índice de desenvolvimento humano de municípios.

Fonte: PNUD (2000); IBGE (2010).

Tabela 2 - Dados econômicos dos municípios.

Município	PIB total 2006	Serviços e comércio	Indústria	Agropecuária	PIB per capita (em reais)
Belford Roxo	2.923.280,92	76,92%	23,02%	0,06%	5.978
Duque de Caxias	22.565.282,17	58,8%	41,17%	0,03%	26.392
Nova Iguaçu	6.264.735,93	85,49%	14,37%	0,14%	7.418

Fonte: IBGE 2008.

Na Tabela 3, observa-se a evolução da população nos municípios de 1940 a 2000, de acordo com CIDE (2009).

Tabela 3 - População residente no período de 1940 a 2000.

MUNICÍPIO	1940	1950	1960	1970	1980	1991	1996	2000
BELFORD ROXO	6.149	23.750	73.178	173.272	282.428	360.714	399.319	434.474
DUQUE DE CAXIAS	29.613	92.459	243.619	431.397	575.814	667.821	715.089	775.456
NOVA IGUAÇU	38.960	103.125	240.275	455.017	661.789	772.442	826.188	920.599

Fonte: (CIDE, 2009).

Entre 2000 e 2010, a população de Nova Iguaçu reduziu em 13,62%. Essa redução se deve à emancipação de Mesquita, a qual ainda pertencia à Nova Iguaçu em 2000.

A Tabela 4 apresenta as taxas de crescimento anuais de 1940 a 2000.

Tabela 4 - Taxa média geométrica anual de crescimento da população no período de 1940 a 2000.

Município	1940/50	1950/60	1960/70	1970/80	1980/91	1991/96	1996/00	1991/00
Belford Roxo	14,47	11,91	9,00	5,01	2,25	2,05	2,05	2,05
Duque de Caxias	12,06	10,17	5,88	2,93	1,36	1,38	1,90	1,61
Nova Iguaçu	10,22	8,83	6,59	3,82	1,42	1,35	2,60	1,90

Fonte: (IBGE, 1997).

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro ocupa uma área de 5.384 km². O município-sede do Rio de Janeiro situa-se na sua porção central; ao norte, os municípios de Nilópolis, São João de Meriti, Duque de Caxias e Nova Iguaçu, compondo a sub-região da Baixada Fluminense; ao fundo da Baía de Guanabara, os municípios de Magé; Niterói, São Gonçalo, Itaboraí e Maricá, na divisa oeste da região, os municípios de Seropédica, Itaguaí e Mangaratiba, na Baía de Sepetiba; e Paracambi, a noroeste. Além desses, temos também os municípios emancipados a partir da década de 1990: Japeri, Queimados e Belford Roxo, desmembrados de Nova Iguaçu, Seropédica desmembrado de Itaguaí e Guapimirim, antigo distrito de Magé (DIAS, 2005).

As estimativas referentes ao ano de 2004 indicam para a Baixada Fluminense uma população de 3.565.084 habitantes, o que corresponde a 23,7% da população do estado. Duque de Caxias e Nova Iguaçu constituem os dois maiores polos demográficos e econômicos da Baixada e juntos concentram aproximadamente metade da população que reside na região. Em sua maioria, os municípios da região apresentam elevadas taxas de densidade demográfica, especialmente aqueles que se localizam mais próximos à cidade do Rio de Janeiro, como é o caso de São João de Meriti, Nilópolis, Mesquita e Belford Roxo. Inversamente, os municípios que se encontram mais distantes tendem a apresentar as menores densidades, como é o

caso de Itaguaí, Paracambi, Guapimirim e Seropédica, sendo que estes dois últimos também apresentam taxas de urbanização expressivamente menores que aquelas observadas para os demais municípios (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL E COMBATE À FOME, 2005).

Segundo o Ministério das Cidades, o município de Duque de Caxias apresenta o seguinte panorama, no que se refere aos indicadores urbanos:

- Quanto ao abastecimento de água, o município tem 69% dos domicílios com acesso à rede de distribuição; 27,9% com acesso a água através de poço ou nascente, e 2,7% têm outra forma de acesso. O total distribuído alcança 90.000m³ por dia, dos quais 74% passam por tratamento convencional, e o restante, por simples cloração.
- No tocante à rede coletora de esgoto sanitário, somente 57,1% dos domicílios têm este serviço, pois 20,9% têm fossa séptica, 4,3% utilizam fossa rudimentar; 13,2% estão ligados a uma vala, e 3,5% são lançados diretamente em um corpo receptor (rio, lagoa e mar).
- Em relação à coleta regular de lixo, registra-se que 88,9% dos domicílios usufruem do serviço, pois 3,6% têm o lixo jogado em terrenos baldios ou em logradouros públicos, e 6,8% ateam fogo aos resíduos sólidos. A produção de resíduos diários no município chega à soma de 730 ton/dia.

4.7 ARCO METROPOLITANO DO RIO DE JANEIRO

O Arco Metropolitano do Rio de Janeiro (AMRJ) é uma obra dos governos federal e estadual, dentro do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). É composto por trechos de rodovias perpendiculares aos grandes eixos rodoviários que convergem para o município do Rio de Janeiro e atravessam a Baixada Fluminense – notadamente a BR-101/RJ Sul, BR-116/RJ Sul, BR-040/RJ, BR-116/RJ Norte e BR-101/RJ Norte, conforme mostrado na Figura 15. A proposta do AMRJ apoia-se em três funções básicas: a integração do Porto de Itaguaí à malha rodoviária nacional; ligação entre os cinco eixos rodoviários beneficiados pelo projeto sem a necessidade de conexão via Avenida Brasil e Ponte Presidente Costa e Silva, desviando assim o fluxo de tráfego das principais vias de acesso à capital; e aumento de acessibilidade aos municípios próximos ao AMRJ e que concentram

grande contingente populacional, em particular Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Nova Iguaçu e Seropédica. O AMRJ também cruzará diversos polos de desenvolvimento do estado - como a região de Santa Cruz, o Polo Gás Químico, o polo de tecnologia em Petrópolis – e conectará os dois maiores investimentos em andamento no Brasil – a construção do COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro) em Itaboraí e da Companhia Siderúrgica do Atlântico (CSA) em Santa Cruz (FIRJAN, 2008).

A previsão de conclusão da obra era para o ano de 2010, mas com os atrasos, os primeiros trechos devem ser inaugurados em dezembro de 2012, portanto, ainda não existem trechos operacionais e também não foram definidos quais trechos serão inaugurados primeiro. O Arco tem o potencial de se tornar um corredor de desenvolvimento, com seus reflexos positivos logísticos e socioeconômicos afetando não só o estado do Rio de Janeiro, mas também outros estados brasileiros. Os trechos do Arco podem ser divididos da seguinte forma:

- Segmento A: Trecho da Rodovia BR-493/RJ, entre a BR-101, em Manilha (Itaboraí), e o entroncamento com a BR-116, em Santa Guilhermina (Magé).
- Segmento B: Trecho da Rodovia BR-101 (Rio – Santos), entre Itacuruçá e a Avenida Brasil.
- Segmento C: RJ-109, entre as rodovias BR-040 (Rio – Petrópolis) e a BR-101/SUL.
- Segmento D: Trecho da BR-116/Norte, entre a BR-493/RJ em Santa Guilhermina e a BR- 040/RJ em Saracuruna.

A área de estudo selecionada encontra-se inserida no segmento C do AMRJ. O traçado do AMRJ cruzará alguns núcleos urbanos ao longo de sua extensão, sendo os principais: Figueira (Duque de Caxias), Fontes Limpas e Águas Limpas (Seropédica), Engenheiro Pedreira (Japeri), Santa Rita, Vila de Cava e Miguel Couto (Nova Iguaçu) e Brisa Mar (Itaguaí).

A região onde o AMRJ será implantado é considerada como zona de expansão urbana, com forte pressão de ocupação e tendências de crescimento. Para tanto, estão previstas ações de ordenamento territorial, reestruturação de acessos, realocação de população, indenizações e ações de paisagismo e ordenamento físico dos espaços atravessados.

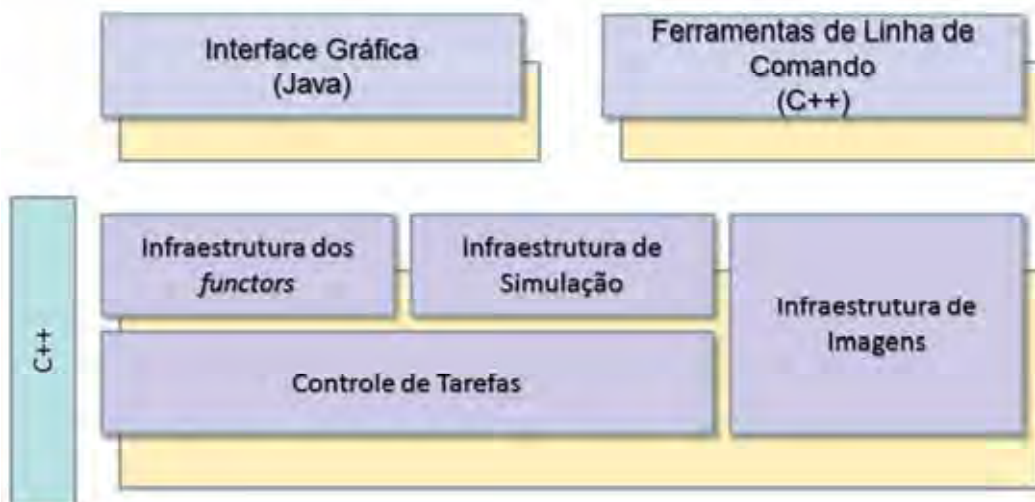
Figura 15 - Segmento C do Arco Metropolitano do Rio de Janeiro.



5 MATERIAL E MÉTODOS

A modelagem realizada neste trabalho foi desenvolvida no *software* Dinamica-EGO versão 1.6.2, com suporte às versões 32 e 64 bits do Windows. Este aplicativo é um modelo de autômatos celulares, baseado na vizinhança de Moore, desenvolvido pelo CSR da UFMG, escrito em linguagem C++. Esta linguagem define um controle de tarefas, sobre o qual funcionam todos os operadores e a infraestrutura de simulação. Isoladas, sobre a estrutura básica, é definida a interface gráfica e os utilitários de execução de linha de comando, como o *Console Launcher* (Figura 16). Os operadores responsáveis pela realização das tarefas são chamados de funtores (*functors*). 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-se de expressões lógicas e aritméticas (SOARES-FILHO et al., 2009).

Figura 16 - Arquitetura básica do Dinamica-EGO.



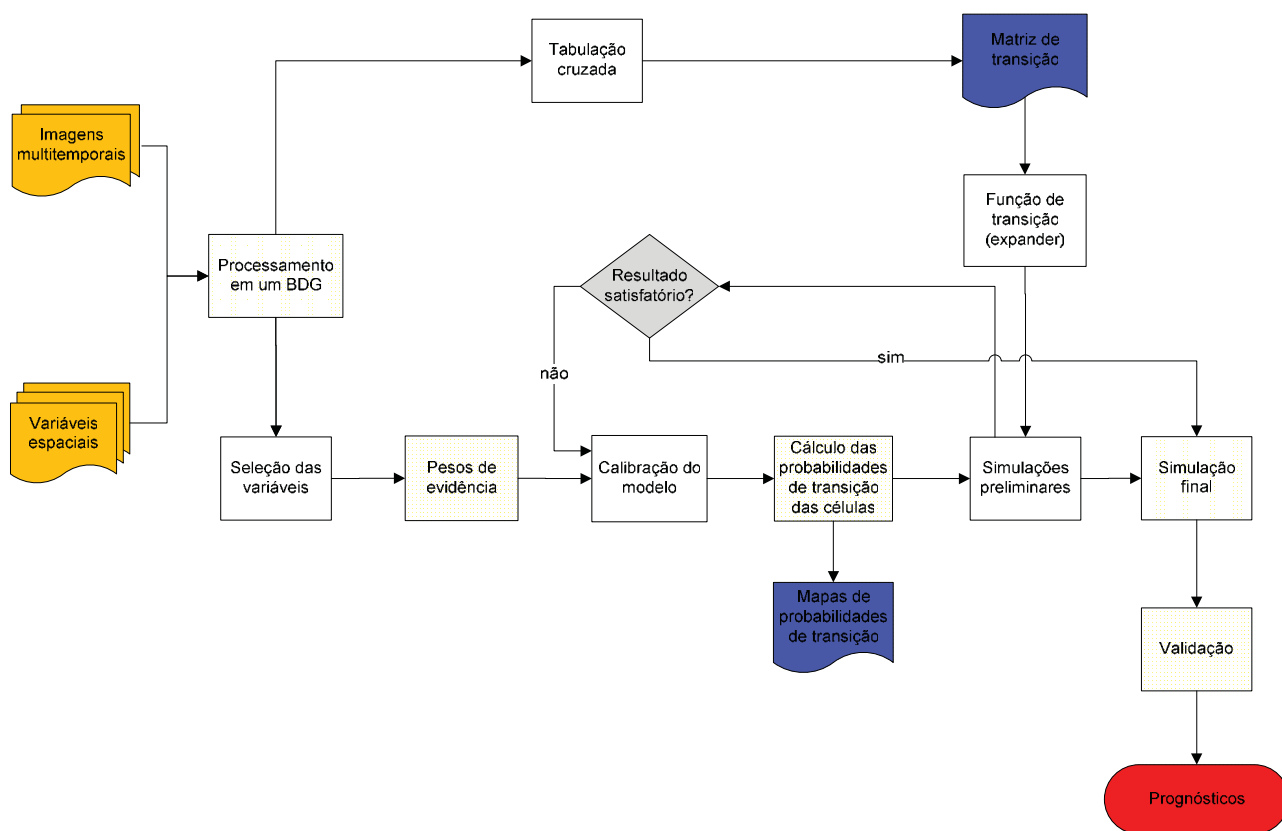
Fonte: Rodrigues (2011).

Pode-se citar como vantagens do Dinamica-EGO o uso de múltiplos processadores ou núcleos para a execução de tarefas, tornando o processamento mais rápido. Adicionalmente, enquanto outros ambientes de modelagem escrevem seus resultados em disco, desfavorecendo o desempenho, o Dinamica mantém um

fluxo contínuo de dados que são mantidos em memória somente enquanto forem necessários à execução do modelo (RODRIGUES, SOARES-FILHO e COSTA, 2007).

Na Figura 17, estão representadas as principais etapas seguidas para a concepção do modelo.

Figura 17 - Fluxograma ilustrando as principais etapas de trabalho.



5.1 PREPARAÇÃO DOS DADOS

Os mapas de cobertura da terra foram obtidos através da classificação de imagens de sensoriamento remoto orbital. As imagens utilizadas correspondem à série temporal referente a três cenários de cobertura da terra para os anos de 1987, 1998 e 2010, obtidas pelo satélite Landsat 5/TM (Tabela 5). Foram consideradas três classes de cobertura da terra: (1) vegetação arbórea, (2) área construída e (3) outros (envolvendo toda área não urbanizada, corpos d'água, solo exposto, e outras classes menos representativas). A generalização das classes de cobertura 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 (BATTY, XIE e SUN, 1999).

Tabela 5 - Imagens Landsat 5/TM utilizadas.

Satélite/Sensor	Data	Órbita/ponto	Resolução	Fonte
Landsat 5/TM	11/08/1987	217/076	30m	INPE ¹
Landsat 5/TM	08/07/1998	217/076	30m	INPE ¹
Landsat 5/TM	09/07/2010	217/076	30m	INPE ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

A interpretação das imagens para se obter os mapas de cobertura da terra foi realizada através da segmentação, realizada no *software* ENVI EX (RSI, 2009), com o módulo *Feature Extraction*.

Após a segmentação, os polígonos gerados foram exportados para o ArcGis e realizada a interpretação de forma visual. Este método é totalmente baseado na experiência do usuário, possibilitando a extração de características das imagens como textura, forma, tamanho e padrões, que não são comumente utilizadas nas outras categorias de classificação automática, por serem muito complexos para implementação computacional. A desvantagem desse método é que este consome muito tempo, tornando-se inviável para áreas extensas (FERREIRA, 2009). É

importante ressaltar que o processamento automático para a classificação de imagens nem sempre é viável em todos os casos.

Não foi possível realizar a validação da classificação devido à impossibilidade de construir um mapa de verdade de campo para as imagens dos anos de 1987 e 1998.

O MDE (Modelo Digital de Elevação) foi produzido através da digitalização das cartas topográficas elaboradas pela FUNDREM (Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Rio de Janeiro), atual Fundação CIDE (Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro), do ano de 1975, escala 1:10.000, com curvas de nível de 5 m de equidistância. Foram vetorizadas as curvas de nível, os pontos cotados e a drenagem, e realizada a interpolação através do método TIN (Triangular Irregular Network). As cartas utilizadas estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Cartas topográficas FUNDREM utilizadas para obter o MDE.

Folha	Código	Formato	Escala	Ano	Fonte
216-D	SF-23-Z-B-IV-1-NO-D	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
216-F	SF-23-Z-B-IV-1-NO-F	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
217-E	SF-23-Z-B-IV-1-NE-E	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
237-B	SF-23-Z-B-IV-1-SO-B	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
238-A	SF-23-Z-B-IV-1-SE-A	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
238-B	SF-23-Z-B-IV-1-SE-B	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
238-C	SF-23-Z-B-IV-1-SE-C	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
238-D	SF-23-Z-B-IV-1-SE-D	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE
238-E	SF-23-Z-B-IV-1-SE-E	Digital/Raster	1:10.000	1975	CIDE

Para extrair as principais rodovias, as áreas mineradas e também para realizar os ajustes e correções necessárias na drenagem obtida através das cartas topográficas, foi utilizada uma imagem Landsat 5/TM adquirida em 04/10/2001, através de uma composição IHS (*Intensity, Hue, Saturation*), utilizando as bandas 7R4G2B, o que permitiu uma boa discriminação entre áreas úmidas e secas, realizada no aplicativo ENVI 4.7.

A modelagem da dinâmica da cobertura da terra para a área de estudo foi realizada em dois períodos de simulação: 1987-1998 e 1998-2010

Para o período 1987-1998, as variáveis espaciais utilizadas para calibração do modelo foram: declividade, altitude, distância a principais rodovias, áreas protegidas (corresponde à Reserva Biológica do Tinguá), obtidas através do site do MMA, distância a drenagens e litologia (Figura 18). Os mapas correspondentes às distâncias foram obtidos através do cálculo da distância euclidiana realizado no software ArcGis 10 (ESRI, 2010). Estas variáveis tentam explicar as mudanças de cobertura da terra ocorridas no período da simulação 1987-1998. É importante destacar que todos os dados foram gerados com resolução espacial de 30 m, para que sejam compatíveis com a resolução das imagens de satélite utilizadas. O sistema de referência adotado foi WGS 1984, UTM, Zona 23S.

Para o segundo período de simulação (1998-2010), além das variáveis utilizadas para o primeiro período, também foram incluídas as variáveis: áreas mineradas e distância ao Arco Metropolitano do Rio de Janeiro (Figura 19).

As variáveis áreas mineradas e distância ao Arco Metropolitano começaram a causar impacto na área nos anos de 2001 e 2009, respectivamente. Portanto, como os dados de entrada na simulação devem corresponder ao tempo inicial em que a variável começa a causar influência na área, foi utilizado o operador *select* para inserir estas variáveis na iteração correspondente aos anos que começaram a causar os impactos, adicionando também os pesos de evidência.

Figura 18 - Variáveis utilizadas para calibração do modelo no período 1987-1998.

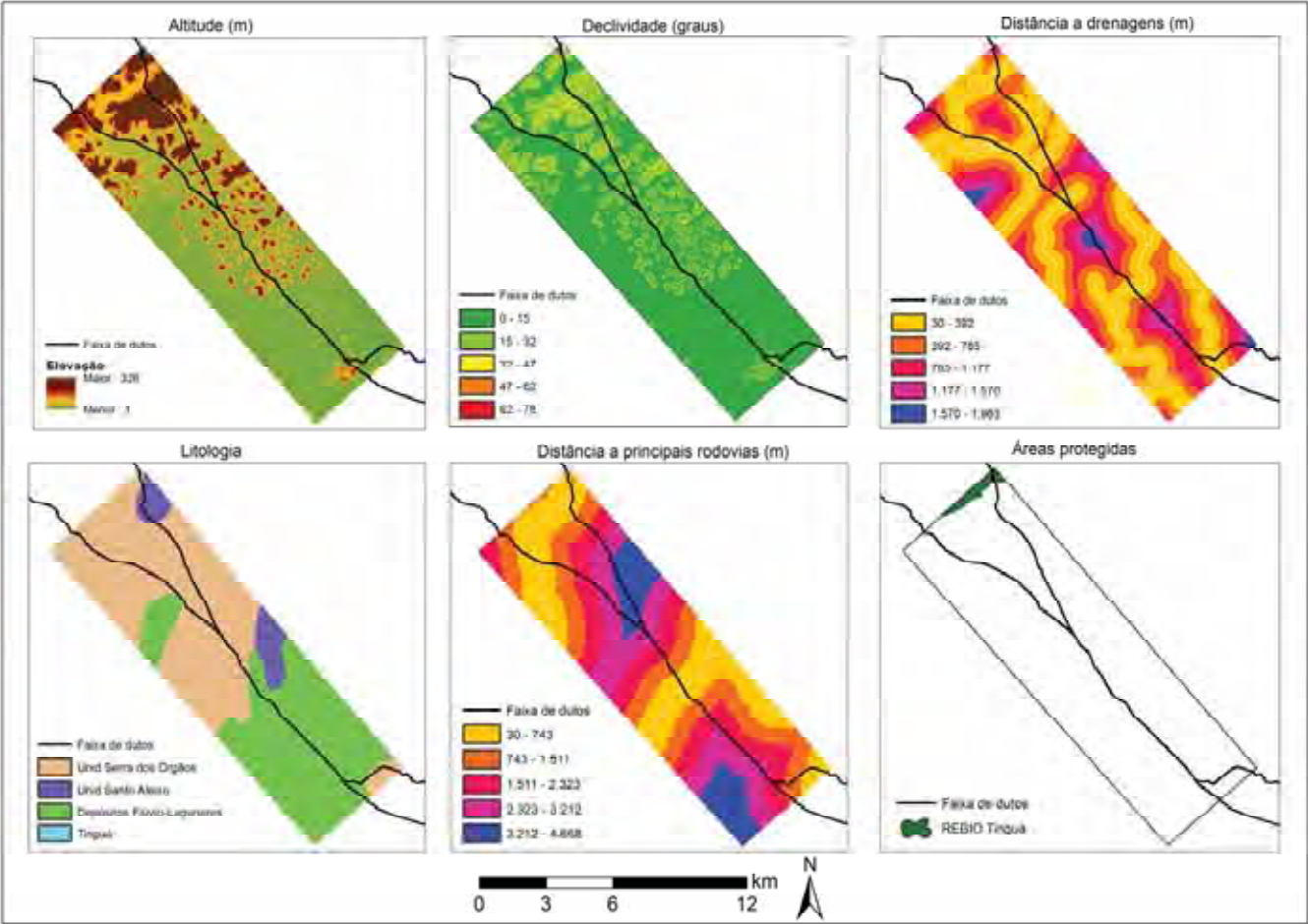
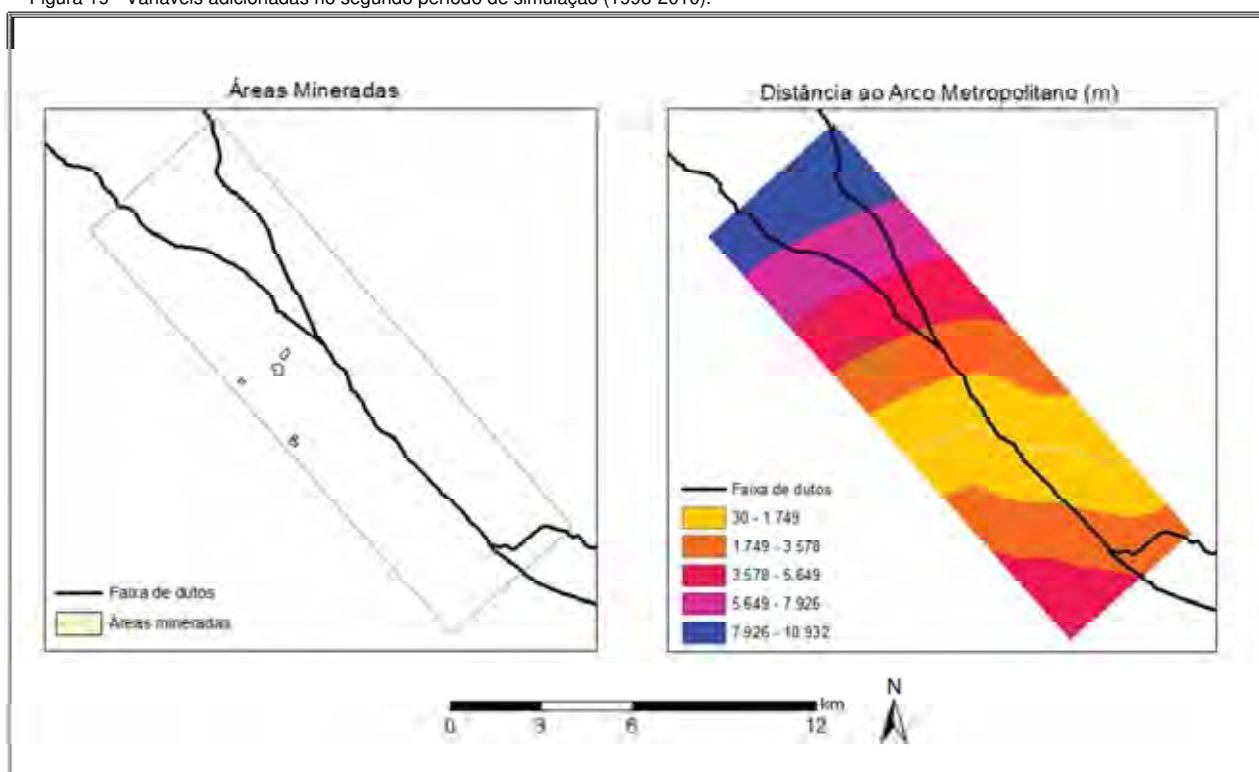


Figura 19 - Variáveis adicionadas no segundo período de simulação (1998-2010).



5.2 CÁLCULO DAS TAXAS DE TRANSIÇÃO

Para o cálculo das taxas de transição para os dois períodos selecionados, os mapas de cobertura da terra inicial e final foram convertidos em arquivos matriciais com resolução de 30 m, que é a mesma resolução das imagens.

5.3 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS

Após o cálculo das taxas de transição, é necessário calcular as probabilidades locais de transição. Para este propósito, foram utilizadas seis variáveis (Seção 5.1) que tentam explicar as transições ocorridas no período 1987-1998.

Para o processo de seleção das variáveis utilizadas em cada transição, o conhecimento do modelador da área estudada torna-se importante para poder relacioná-las de acordo com as possibilidades de influência nas transições ocorridas. O Quadro 3 mostra as variáveis selecionadas para cada transição.

Quadro 3 - Variáveis selecionadas para as transições de cobertura da terra no período 1987 - 1998.

	Vegetação arbórea para outros	Outros para vegetação arbórea	Outros para área construída
altitude	●	●	●
declividade	●	●	●
dist. est. principais	●	●	●
dist. drenagens	●	●	●
litologia			●
áreas protegidas	●	●	

Para o segundo período de simulação, foram adicionadas mais duas variáveis ao modelo, distância ao Arco Metropolitano do Rio de Janeiro (AMRJ) e a áreas mineradas. As variáveis selecionadas para cada transição estão no Quadro 4.

Quadro 4 - Variáveis selecionadas para as transições de cobertura da terra no período 1998 - 2010.

	Vegetação arbórea para outros	Outros para vegetação arbórea	Outros para área construída
altitude	●	●	●
declividade	●	●	●
dist. est. principais	●	●	●
dist. drenagens	●	●	●
litologia			●
áreas protegidas	●	●	
dist. ao AMRJ	●		●
áreas mineradas	●		

5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Neste trabalho utilizou-se somente a função *expander*, devido às mudanças ocorrerem exclusivamente por expansões ou contrações de manchas.

A execução do modelo foi realizada para os períodos 1987-1998 e 1998-2010. 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 as transições no Dinamica.

5.5 TESTES DE VALIDAÇÃO

Optou-se por utilizar o método de decaimento exponencial por ter sido adotado por outros autores com resultados satisfatórios (BENEDETTI, 2010; FERRARI, 2008; NOVAES, 2010).

5.6 GERAÇÃO DE CENÁRIOS

A construção de cenários é uma ferramenta que pode servir para compreender e antecipar as mudanças e, assim, melhorar a tomada de decisões. Os cenários não são previsões em sentido estrito, mas oferecem a visão de diferentes futuros alternativos informados, possíveis e imaginados, nos quais serão tomadas decisões (CHERMACK, 2007).

Cabe também destacar que, segundo Almeida (2003), o objetivo da modelagem não se vincula à reprodução fiel da realidade, mas somente à verificação das principais tendências e padrões que se processam no espaço, como as mudanças de cobertura da terra.

Com o modelo validado, foram gerados dois cenários anuais de cobertura da terra para o ano de 2020. O primeiro cenário foi denominado “projetivo”, por ser baseado sobre a continuação das tendências atuais para o futuro e, portanto, foi baseado na mesma matriz de transição do período 1998-2010. O segundo cenário gerado foi denominado “prospectivo”, por ser baseado em escolhas que o poder público pode fazer. Este último cenário foi gerado a partir da matriz de transição múltipla, e dos parâmetros referentes ao *expander* do primeiro período (1987-1998), para verificar o comportamento das classes. Optou-se por gerar cenários com os dados do primeiro período devido às grandes mudanças que estão ocorrendo na área, como a construção do AMRJ, o crescimento da economia brasileira e a Copa de 2014, que traz maiores investimentos ao Brasil, sendo que o primeiro período caracteriza melhor a tendência futura de crescimento, por apresentar maiores mudanças do que o segundo período analisado.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 TAXAS DE TRANSIÇÃO

Três transições ocorreram nos dois períodos de análise, como mostrado na Tabela 7. A transição “vegetação arbórea para outros” mostra que uma porcentagem significativa de vegetação diminuiu a uma taxa de 2,88% ao ano no período 1987-1998, e esta taxa diminuiu para 2,52% ao ano para o período 1998-2010. A taxa de crescimento urbano é pequena se comparada com as outras mudanças ocorridas na área. A Tabela 8 mostra a área total ocupada por cada classe em cada período.

Tabela 7 - Área total por classe de cobertura da terra.

Classes de cobertura da terra	1987 (ha)	1998 (ha)	2010 (ha)
Vegetação arbórea	2032	1801	1667
Área construída	475	570	617
Outros	7205	7342	7428

Tabela 8 - Transições anuais de cobertura da terra.

Transições de cobertura da terra	1987-1998 (%/ano)	1998-2010 (%/ano)
Vegetação arbórea para outros	2,88	2,52
Outros para vegetação arbórea	0,46	0,43
Outros para área construída	0,12	0,05

6.2 PERÍODO DE SIMULAÇÃO 1987 - 1998

Conforme discutido na Seção 3.4.3, foram utilizados neste trabalho Índices de Cramer e de Incerteza da Informação Conjunta para verificar a independência entre os pares de variáveis.

Os resultados obtidos para os testes estatísticos estão demonstrados nas Tabelas 9, 10 e 11. A variável litologia na transição “outros para área construída” apresenta valores acima de 0,5 para o coeficiente de Cramer em três pares de

variáveis. Entretanto, optou-se por manter esta variável para a respectiva transição devido ao teste da Incerteza da Informação Conjunta apresentar valores abaixo de 0,5. O teste da Incerteza da Informação Conjunta é mais robusto e também não é enviesado pela área como o Índice de Cramer, conforme exposto na Seção 3.4.3 Os outros pares de variáveis não obtiveram valores superiores a 0,5, indicando baixa dependência espacial e, portanto, nenhuma variável foi excluída.

Tabela 9 - Valores entre pares de variáveis para a transição “vegetação arbórea para outros”.

U/V	Altitude	Áreas protegidas	Dist. drenagens	Dist. est. princ	Declividade
Altitude	-	0,2370	0,0871	0,0862	0,2593
Áreas protegidas	0,0204	-	0,0341	0,1618	0,0979
Dist. drenagens	0,0170	0,0010	-	0,0946	0,1109
Dist. est. princ.	0,0249	0,0112	0,0139	-	0,3016
Declividade	0,1846	0,0067	0,0325	0,1449	-

Cramer (V)
 Incerteza da Informação Conjunta (U)

Tabela 10 - Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para vegetação arbórea”.

U/V	Altitude	Áreas protegidas	Dist. drenagens	Dist. est. princ	Declividade
Altitude	-	0,2318	0,0848	0,1017	0,2711
Áreas protegidas	0,0218	-	0,0468	0,2194	0,0920
Dist. drenagens	0,0145	0,0016	-	0,1127	0,0992
Dist. est. princ.	0,0246	0,0135	0,0162	-	0,1176
Declividade	0,1729	0,0053	0,0175	0,0288	-

Cramer (V)
 Incerteza da Informação Conjunta (U)

Tabela 11 - Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para área construída”.

U/V	Altitude	Dist. drenagens	Dist. est. princ	Litologia	Declividade
Altitude	-	0,0787	0,1115	0,3959	0,2691
Dist. drenagens	0,0171	-	0,2411	0,5581	0,2058
Dist. est. princ.	0,0230	0,0794	-	0,6238	0,2000
Litologia	0,2429	0,2334	0,2194	-	0,6065
Declividade	0,1672	0,0837	0,0891	0,4507	-

Cramer (V)
 Incerteza da Informação Conjunta (U)

As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores do W^+ para cada faixa de distância das variáveis “altitude” e “declividade”, respectivamente, e as Figuras 20 e 21 mostram graficamente como se comportam os valores de W^+ para essas variáveis explicativas.

Tabela 12 - Variável altitude para a transição “vegetação arbórea para outros”.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	Peso de Evidência (W^+)	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	573	247	0,696692	0,717807	sim
$10 \leq v < 20$	2464	1468	1,36211	1,57566	sim
$20 \leq v < 30$	2072	1042	0,985784	1,10827	sim
$30 \leq v < 40$	2213	892	0,581523	0,654943	sim
$40 \leq v < 50$	2357	664	0,038226	0,0428347	não
$50 \leq v < 60$	2009	628	0,186178	0,205645	sim
$60 \leq v < 70$	1531	362	-0,198059	-0,212084	sim
$70 \leq v < 80$	1264	256	-0,396345	-0,41805	sim
$80 \leq v < 90$	1040	169	-0,665542	-0,693066	sim
$90 \leq v < 100$	955	121	-0,956242	-0,989451	sim
$100 \leq v < 110$	861	78	-1,33222	-1,3693	sim
$110 \leq v < 120$	661	30	-2,07191	-2,10707	sim
$120 \leq v < 130$	592	35	-1,79302	-1,82256	sim
$130 \leq v < 140$	535	20	-2,27423	-2,30356	sim
$140 \leq v < 330$	2968	43	-3,24565	-3,43985	sim
Total	22095	6055			

Figura 20 - Comportamento dos pesos de evidência para a variável “altitude” na transição vegetação arbórea para outros.

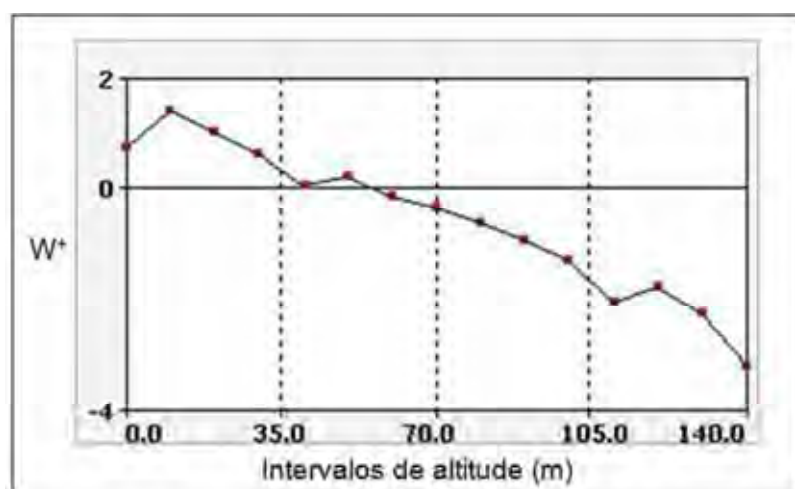
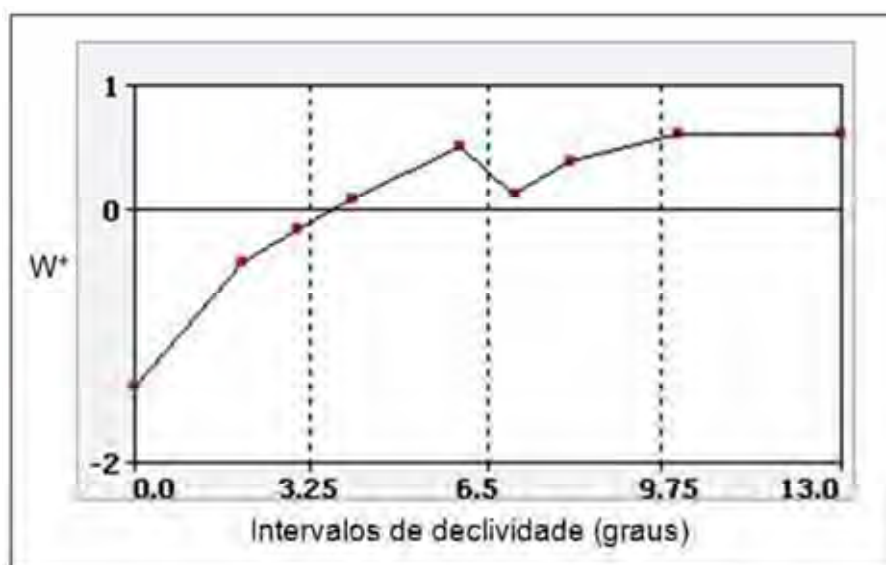


Tabela 13 - Variável declividade para a transição “outros para vegetação arbórea”.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	Peso de Evidência (W^*)	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	15762	296	-1,41516	-1,77931	sim
$2 \leq v < 3$	4020	196	-0,430055	-0,46436	sim
$3 \leq v < 4$	2190	137	-0,166194	-0,174008	não
$4 \leq v < 6$	2643	206	0,070236	0,0747143	não
$6 \leq v < 7$	1140	129	0,482	0,497348	sim
$7 \leq v < 8$	979	79	0,107936	0,110428	não
$8 \leq v < 10$	2022	206	0,364368	0,384373	sim
$10 \leq v < 13$	3112	384	0,580201	0,636199	sim
$13 \leq v < 65536$	13572	1686	0,587881	0,965579	sim
Total	45440	3319			

Figura 21 - Comportamento dos pesos de evidência para a variável “declividade” na transição “outros para vegetação arbórea”.



Os valores da Tabela 12 mostram que a variável “altitude” concentra os maiores valores nos primeiros intervalos, indicando que a transição “vegetação arbórea para outros” tende a ocorrer em faixas de até 60 m de altitude. Em contrapartida, a Tabela 13 mostra que as últimas faixas da variável “declividade” são áreas mais íngremes e conseqüentemente mais custosas a ocupação humana, e portanto, mais propensas à regeneração da vegetação arbórea. A totalidade das informações relativas aos intervalos e pesos de simulação da etapa de modelagem deste período pode ser visualizada no Apêndice A.

Os testes de simulação foram realizados com o mapa de cobertura da terra inicial (1987), o conjunto de variáveis estáticas, os pesos de evidência corrigidos e a matriz de transição. Também neste passo, devem ser definidos os parâmetros dos funtores *patcher* e *expander* para o tamanho médio, variância e isometria das manchas a serem formadas ou expandidas/contraídas. Conforme já citado, neste trabalho, foi utilizada somente a função *expander* devido às mudanças na paisagem ocorrerem exclusivamente pela expansão de manchas existentes. Os parâmetros utilizados para a geração da paisagem simulada podem ser vistos na Tabela 14.

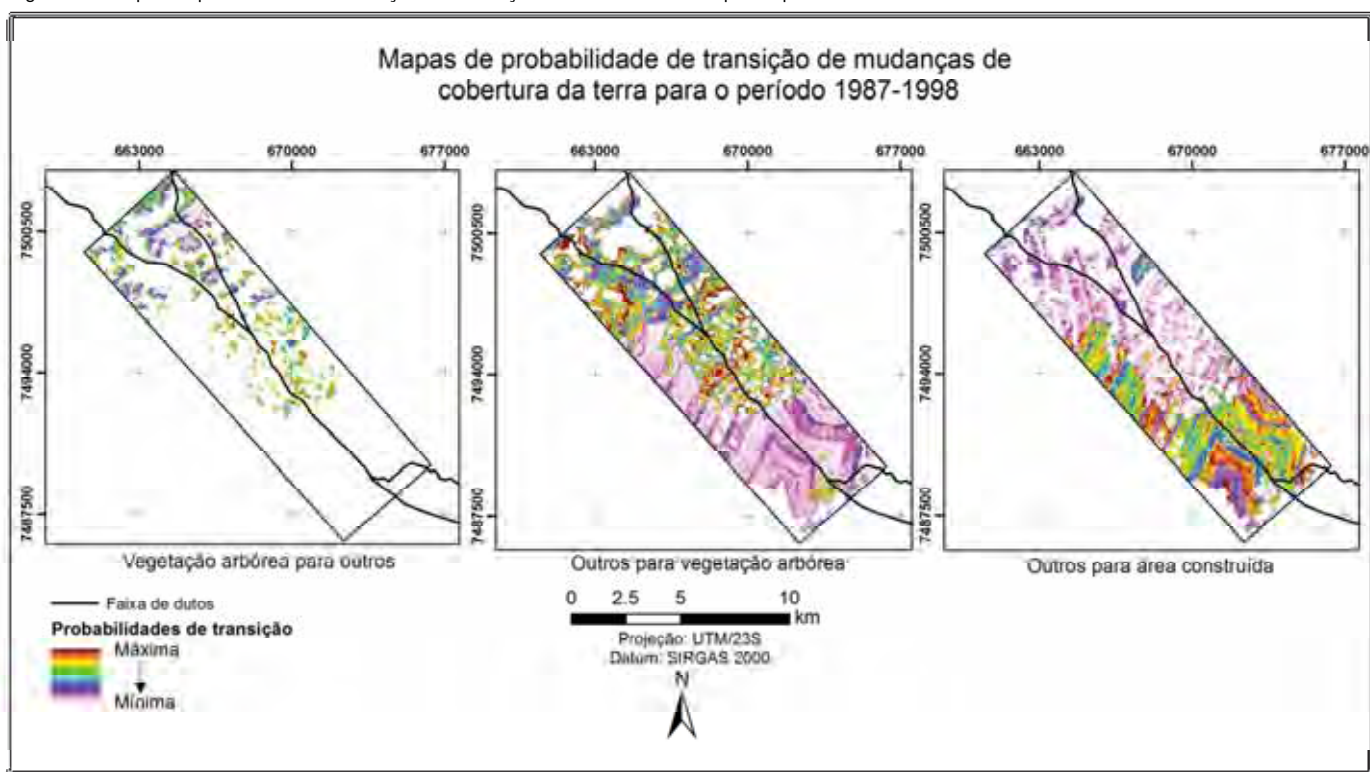
Tabela 14 - Parâmetros utilizados no *expander* para gerar a paisagem simulada para o período de 1987-1998.

	Tamanho Médio de Manchas (ha)	Variância do tamanho (ha)	Isometria
Vegetação arbórea para outros	0,5	0,5	1,0
Outros para vegetação arbórea	1,0	0,5	1,0
Outros para área construída	0,1	2	1,0

Os valores relativos ao tamanho médio e variância das manchas foram obtidos através do modelo `calc_mean_patch_sizes_and_standard_deviations.ego` disponível na versão 1.7.8 do *software*, e realizados ajustes através da análise visual do mapa final simulado comparado ao mapa final real.

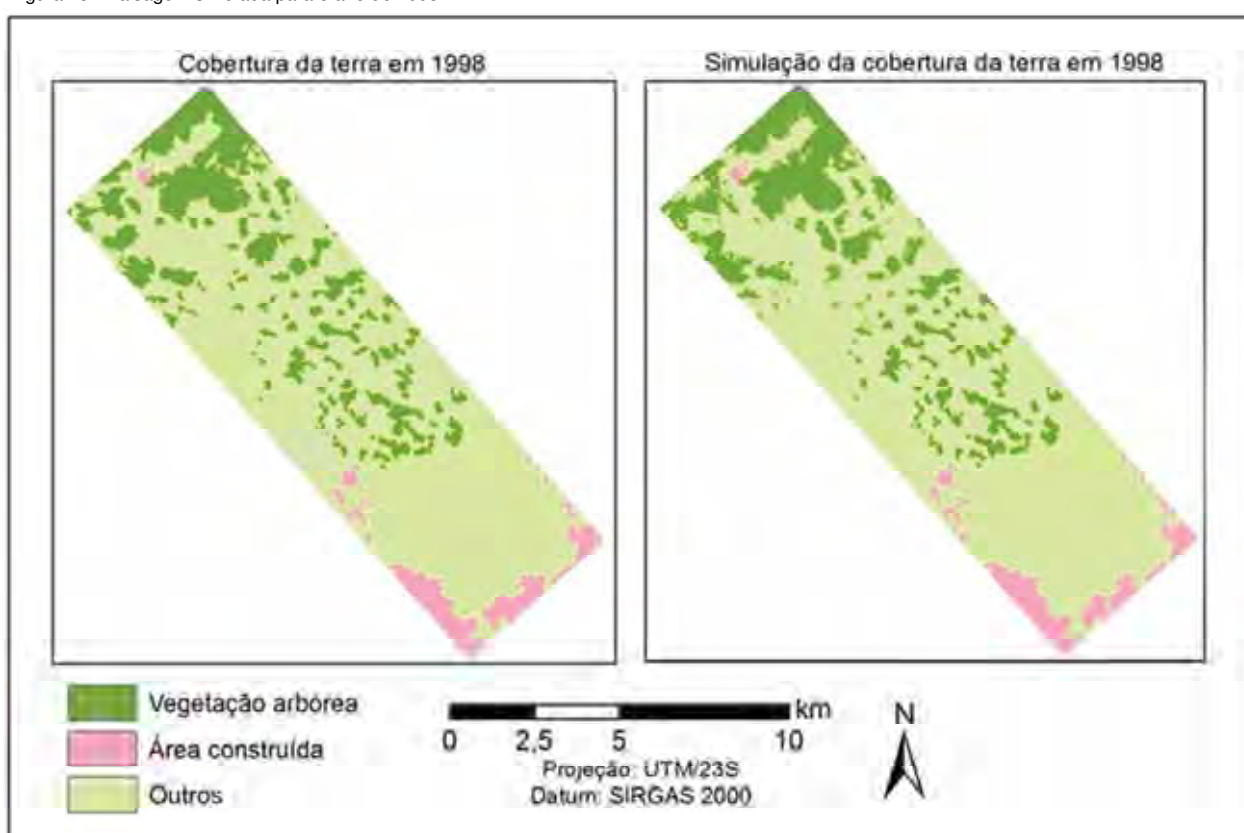
Como resultados, foram gerados os mapas de probabilidades de transição das células (Figura 22) para cada transição ocorrida e o mapa simulado para o ano de 1998 (Figura 23), que foi definido a partir do número de passos anuais do modelo (ajustado em 11).

Figura 22 – Mapas de probabilidade de transição de mudanças de cobertura da terra para o período 1987-1998.



A Figura 22 nos permite avaliar quais são as áreas mais favoráveis à ocorrência de mudanças de cobertura da terra. A fragmentação da classe vegetação arbórea favorece a redução desta classe, sendo as áreas que apresentam menor declividade e circundadas pela classe outros as que apresentam maior probabilidade de mudança.

Figura 23 - Paisagem simulada para o ano de 1998

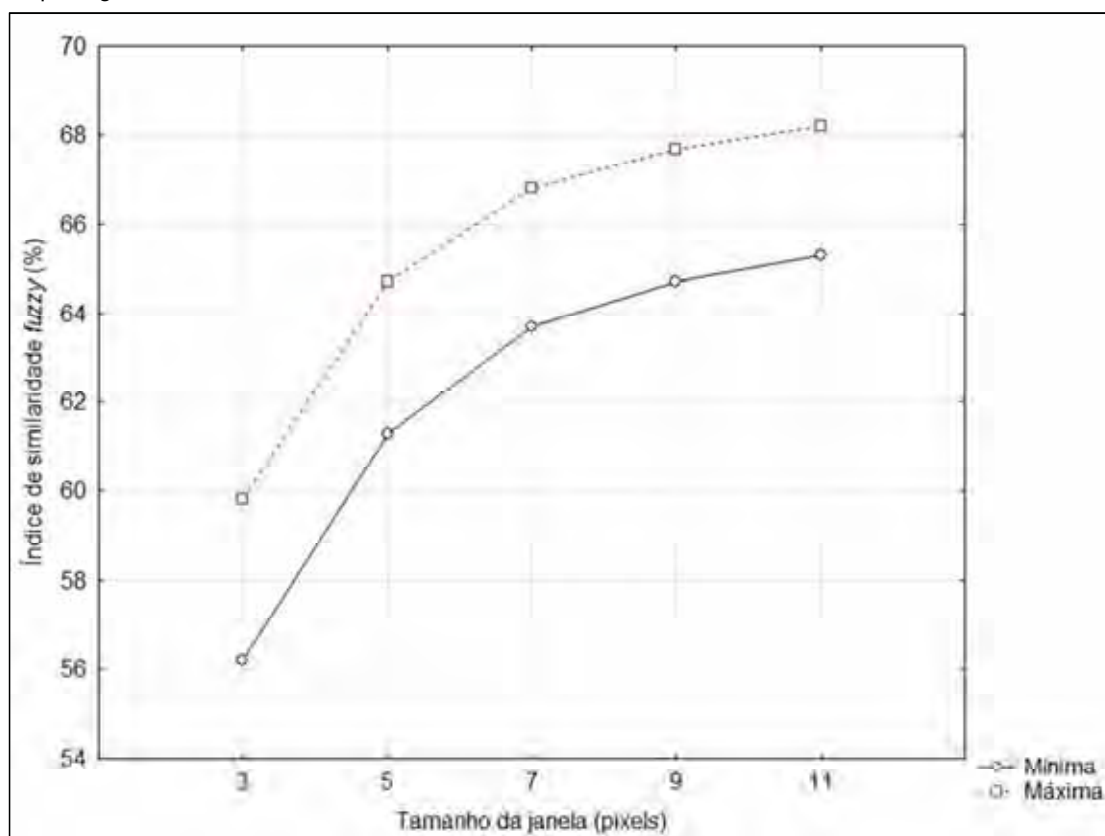


A classe vegetação arbórea apresenta muitos fragmentos isolados, o que dificultou melhores resultados para esta classe.

A validação do modelo para o ano de 1998 foi feita utilizando o método de similaridade *fuzzy* com decaimento exponencial (Seção 3.4.5).

A Figura 24 apresenta os valores obtidos na validação para o primeiro período.

Figura 24 - Índice de similaridade *fuzzy* baseado em tamanhos múltiplos de janelas para a simulação da paisagem em 1998.



6.3 PERÍODO DE SIMULAÇÃO 1998 – 2010

Em observância aos preceitos do método de pesos de evidências, verificou-se inicialmente a independência das variáveis, a qual não apresentou valores acima de 0,50 para o teste da Incerteza da Informação Conjunta e, portanto, nenhuma variável foi removida do modelo. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os valores obtidos para os testes de Cramer e Incerteza da Informação Conjunta para o período analisado.

Tabela 15 - Valores entre pares de variáveis para a transição “vegetação arbórea para outros”.

U/V	Altitude	Áreas mineradas	Áreas protegidas	Dist. drenagens	Dist. est. princ	Dist. AMRJ	Declividade
Altitude	-	0,1671	0,2360	0,0747	0,1039	0,0948	0,2708
Áreas mineradas	0,0166	-	0,0208	0,4065	0,6285	0,0834	0,0327
Áreas protegidas	0,0212	0,0040	-	0,0454	0,2126	0,0265	0,1032
Dist. drenagens	0,0194	0,2472	0,0020	-	0,2473	0,0764	0,2252
Dist. est. princ.	0,0243	0,1276	0,0140	0,1070	-	0,0955	0,1967
Dist. AMRJ	0,0110	0,0136	0,0048	0,0057	0,0176	-	0,0464
Declividade	0,1632	0,2479	0,0042	0,1250	0,0837	0,0043	-

Cramer (V)

Incerteza da Informação Conjunta (U)

Tabela 16 - Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para vegetação arbórea”.

U/V	Altitude	Áreas protegidas	Dist. drenagens	Dist. est. princ	Declividade
Altitude	-	0,2359	0,0904	0,0987	0,2706
Áreas protegidas	0,0274	-	0,0239	0,2121	0,0969
Dist. drenagens	0,0172	0,0008	-	0,0510	0,1110
Dist. est. princ.	0,0265	0,0150	0,0025	-	0,0869
Declividade	0,1634	0,0053	0,0170	0,0135	-

Cramer (V)

Incerteza da Informação Conjunta (U)

Tabela 17 - Valores entre pares de variáveis para a transição “outros para área construída”.

U/V	Altitude	Dist. drenagens	Dist est. princ	Dist. AMRJ	Declividade	Litologia
Altitude	-	0,0757	0,0908	0,2028	0,2426	0,3990
Dist. drenagens	0,0188	-	0,1236	0,0840	0,1950	0,5662
Dist. est. princ.	0,0256	0,0494	-	0,1573	0,1523	0,4812
Dist. AMRJ	0,1585	0,0215	0,0857	-	0,1029	0,3445
Declividade	0,1461	0,0955	0,0800	0,0299	-	0,5330
Litologia	0,2392	0,2170	0,2019	0,1182	0,4272	-

Cramer (V)

Incerteza da Informação Conjunta (U)

Os valores referentes aos pesos de evidência para as variáveis utilizadas neste período encontram-se no Apêndice A.

Os parâmetros utilizados para ajustar a função *expand* no período 1998-2010 estão disponíveis na Tabela 18.

Tabela 18 - Parâmetros utilizados no *expand* para gerar a paisagem simulada para o período de 1998 – 2010.

	Tamanho Médio de Manchas (ha)	Variância do Tamanho (ha)	Isometria
Vegetação arbórea para outros	0,8	0,5	1,0
Outros para vegetação arbórea	0,7	0,5	1,0
Outros para área construída	0,2	2,0	1,0

A Figura 25 apresenta os mapas de probabilidades de transição de cobertura da terra para o período analisado. A Figura 26 apresenta a paisagem real e a paisagem simulada para o ano de 2010. Como ocorrido no período anterior, verifica-se que a classe vegetação arbórea apresenta manchas demasiadamente fragmentadas.

Figura 25 - Mapas de probabilidade de transição de mudanças de cobertura da terra para o período 1998-2010.

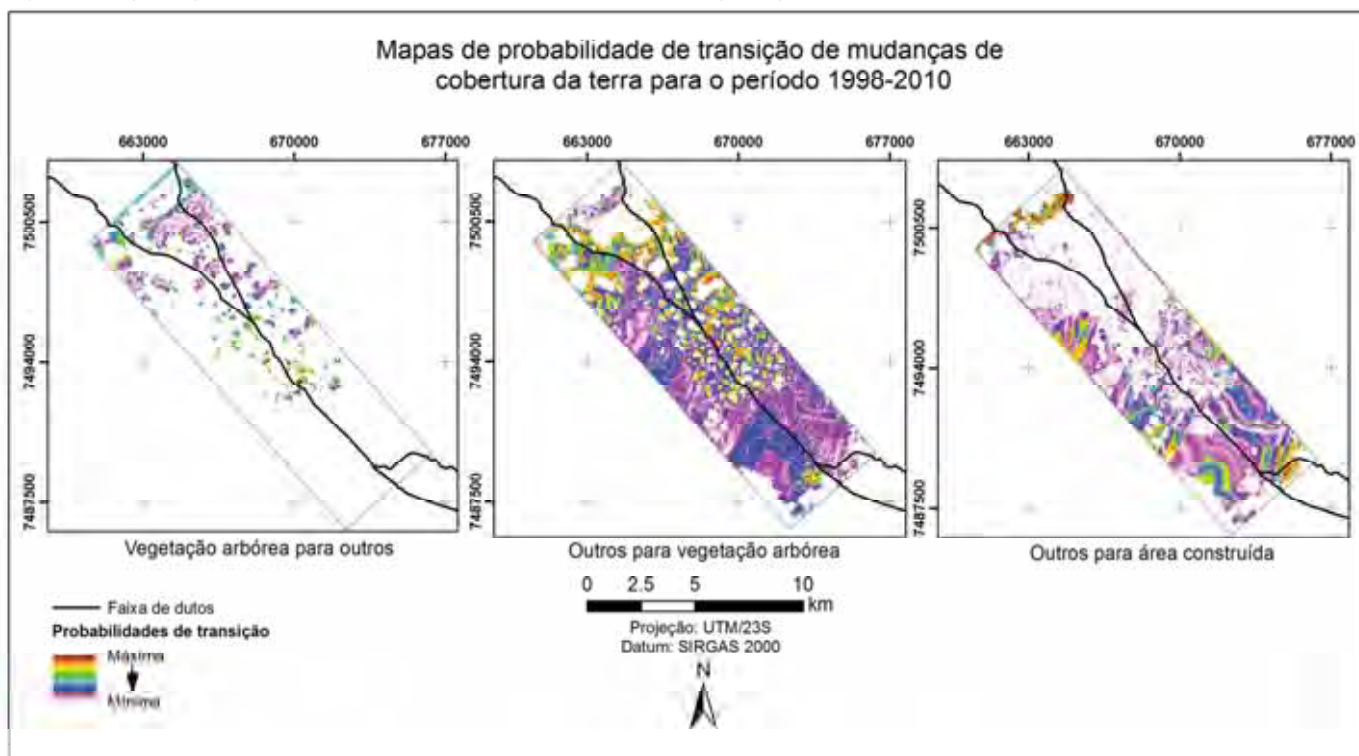
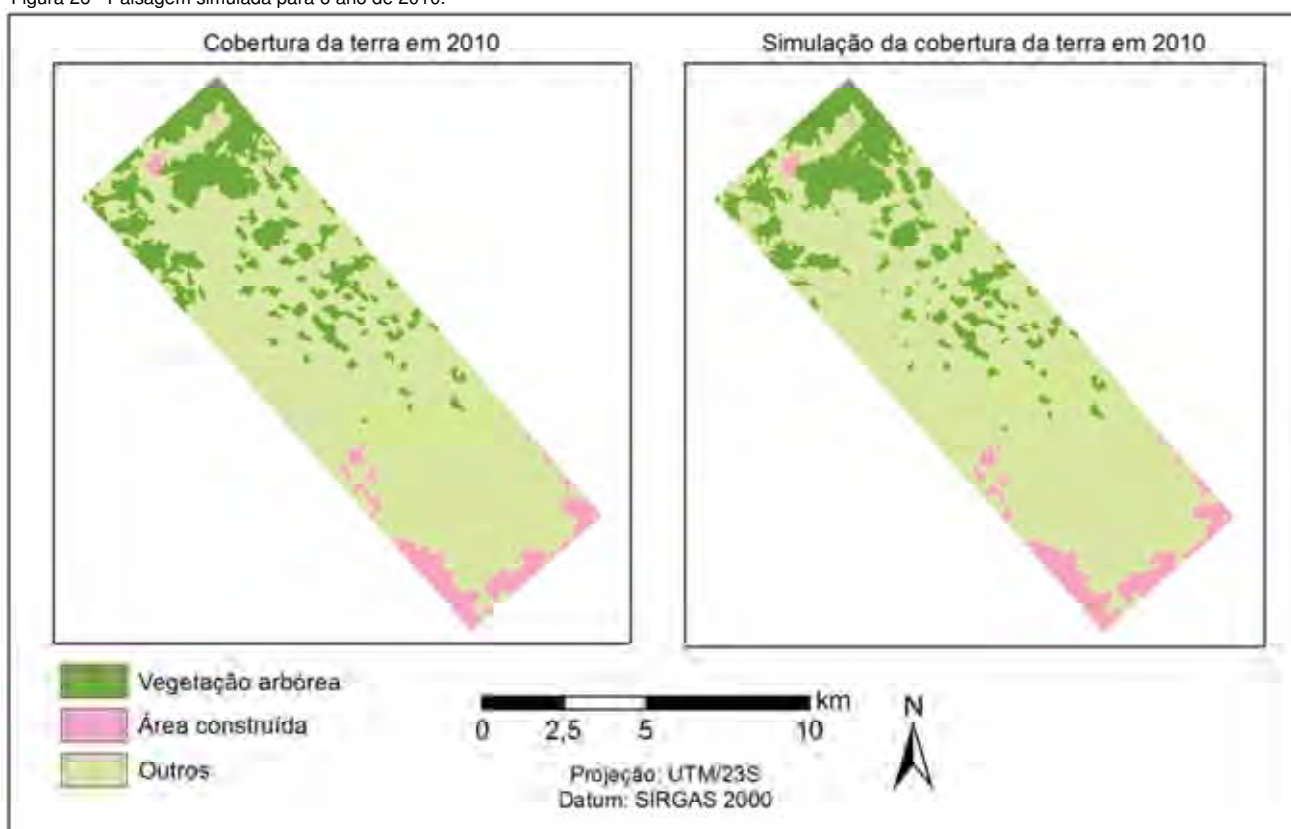
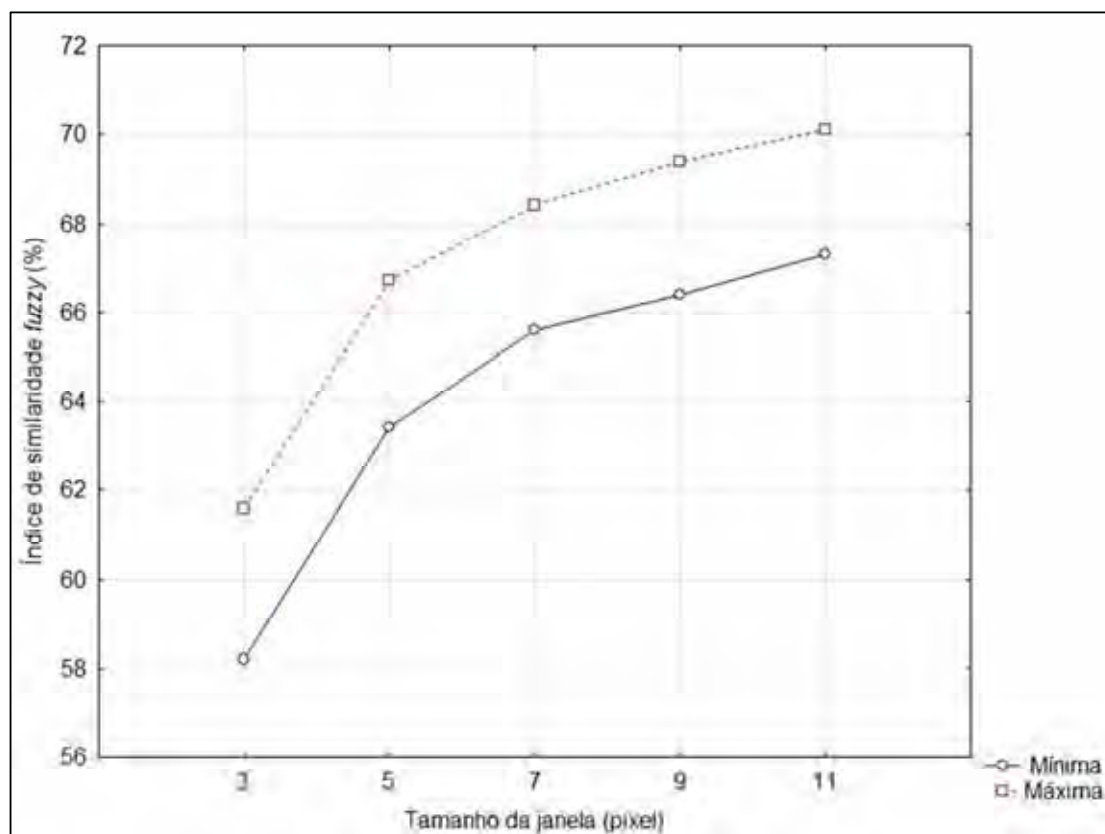


Figura 26 - Paisagem simulada para o ano de 2010.



A validação do modelo no segundo período de análise também foi realizada pelo método de similaridade *fuzzy* por decaimento exponencial. Os valores encontram-se na Figura 27.

Figura 27 - Índice de similaridade *fuzzy* baseado em tamanhos múltiplos de janelas para a simulação da paisagem em 2010.



6.4 GERAÇÃO DE CENÁRIOS

A aglomeração urbana em torno de eixos rodoviários é um fato conhecido e já estudado (HUMPHREY e SELL, 1975; LICHTER e FUGUITT, 1980; VOSS e CHI, 2006). Chein (2006) estudou a relação entre as rodovias Belém-Teresina e a pavimentação da rodovia Cuiabá-Porto Velho, com a formação de novos aglomerados urbanos a partir de fluxos migratórios.

Em estudo realizado pela FIRJAN (2008), foi feita a aplicação das estimativas dos principais efeitos do AMRJ sobre os municípios diretamente atravessados pelo Arco. Os dados referentes às rodovias Rio-Santos e da Rodovia do Café foram

utilizados para simulações ao caso do AMRJ, supondo a generalização dos efeitos, dadas as similaridades entre os eventos. Os resultados apontam para a necessidade de políticas de aumento da oferta de serviços de infraestrutura básica, de forma a acompanhar o aumento de demanda decorrente da maior aglomeração em torno da rodovia, tendo em vista as novas perspectivas econômicas por ela geradas, conforme discutido por Chein (2006). De outro lado, há indícios de que haja também mudanças na estrutura de mercado de trabalho dos municípios afetados diretamente por obras de infraestrutura rodoviária. As estimativas apontam uma piora nas condições de trabalho, com uma tendência à maior informalidade e restrição do aumento de ocupados na indústria, provavelmente em decorrência do crescimento maior da oferta de trabalhadores do que dos postos de trabalho gerados.

Os dois cenários anuais gerados estão demonstrados nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Prognósticos anuais de cobertura da terra gerados para o cenário "projetivo".

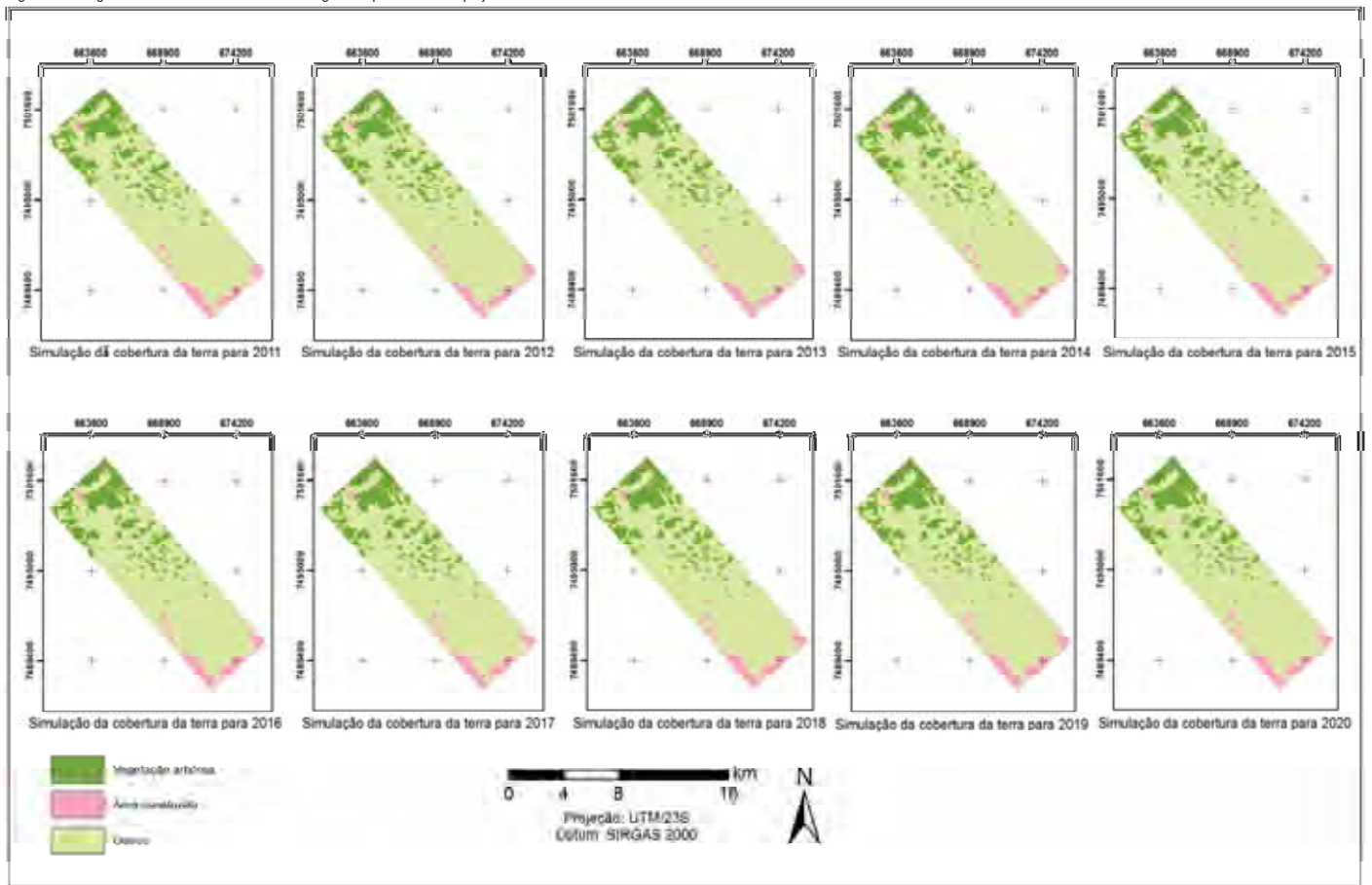
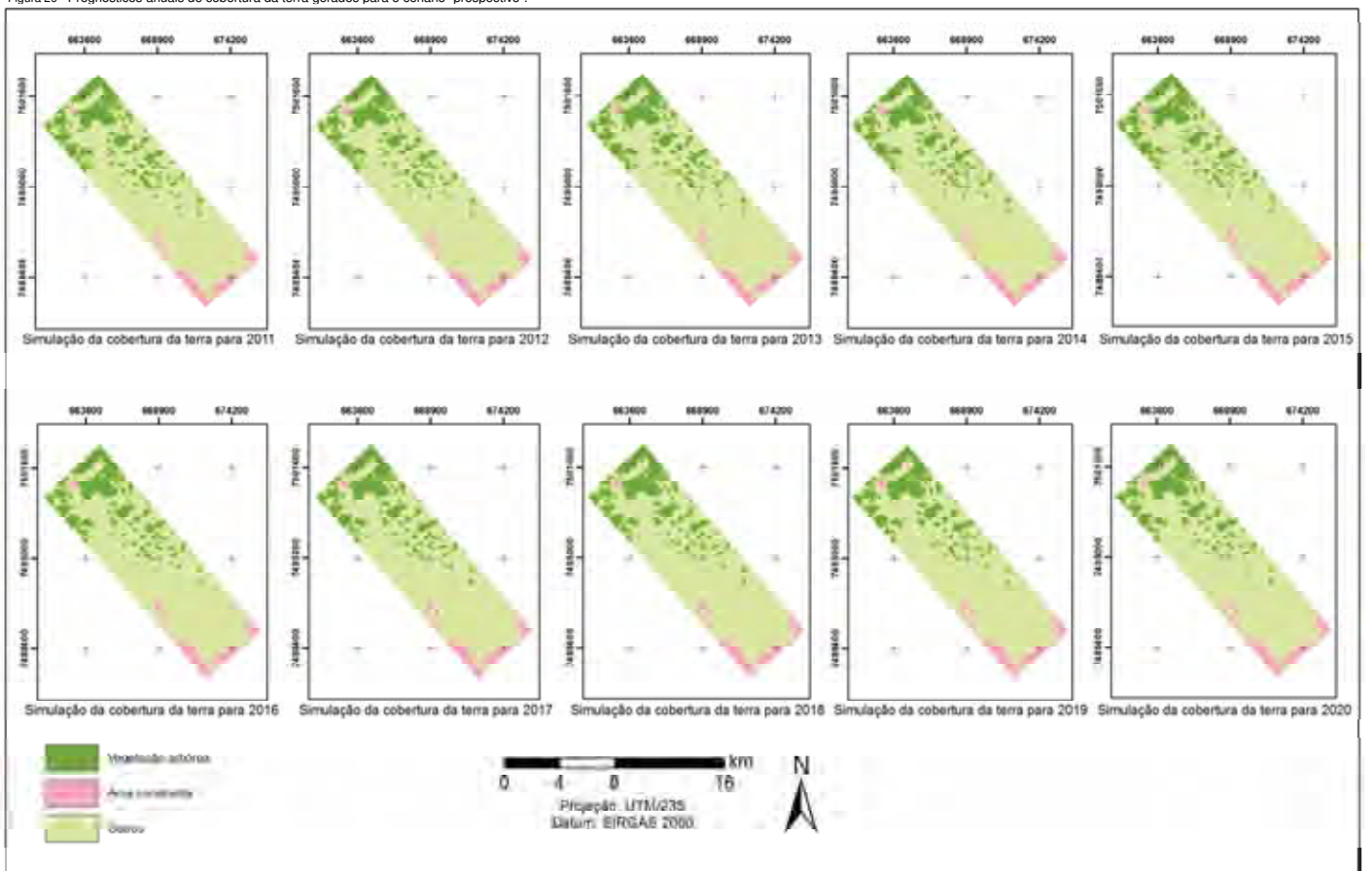


Figura 29 - Prognósticos anuais de cobertura da terra gerados para o cenário "prospectivo".



Com base nos prognósticos gerados, pode-se calcular quais foram às alterações realizadas em cada classe de cobertura da terra, conforme as Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Área total anual por classe de cobertura da terra para o cenário projetivo.

Mapas simulados “cenário projetivo”	Vegetação arbórea (ha)	Área construída (ha)	Outros (ha)
2010	1667	617	7428
2011	1654	617	7440
2012	1644	620	7446
2013	1635	625	7452
2014	1626	629	7456
2015	1618	633	7460
2016	1610	637	7464
2017	1601	642	7468
2018	1594	646	7472
2019	1586	650	7475
2020	1578	655	7478

Tabela 20 - Área total anual por classe de cobertura da terra para o cenário prospectivo.

Mapas simulados “cenário prospectivo”	Vegetação arbórea (ha)	Área construída (ha)	Outros (ha)
2010	1667	617	7428
2011	1650	621	7440
2012	1638	630	7444
2013	1626	639	7447
2014	1614	648	7450
2015	1602	657	7452
2016	1591	666	7454
2017	1580	675	7456
2018	1570	684	7458
2019	1560	693	7459
2020	1550	701	7460

As Tabelas 19 e 20 foram calculadas utilizando o mapa de cobertura real do ano de 2010, obtido através da classificação da imagem Landsat, e os mapas anuais dos dois prognósticos gerados.

A análise das Tabelas 19 e 20 permite avaliar a origem e o destino das classes de cobertura da terra. No cenário 1, denominado “projetivo”, houve um aumento de 38 ha da área construída em 10 anos, correspondente a um aumento total de 6,1%, enquanto que a vegetação arbórea reduziu 89 ha no mesmo período.

O cenário prospectivo, elaborado a partir da matriz de transição do primeiro período analisado (1987-1998), apresenta um aumento de 84 ha para a classe “área construída”, no período de 10 anos. Este aumento representa um total de 13,6%, enquanto a classe vegetação arbórea reduziu 111 ha, correspondente a um total reduzido de 6,6%.

Os resultados da modelagem apontam para o crescimento dos bairros periféricos próximos ao AMRJ, principalmente o bairro Parque Barão do Amapá em Duque de Caxias. É importante destacar que este bairro, além da proximidade com a faixa de dutos ORBEL, também é atravessado por outras faixas de dutos, contendo o OSVOL, GASVOL e GASJAP, este último um gasoduto de alta pressão, e mais ao sul, pelo ORBIG. Os bairros situados ao sul da área de estudo, pertencentes a Belford Roxo e Duque de Caxias, já sofrem com a falta de infraestrutura, relativa à falta de pavimentação das ruas, à ocupação desordenada e alagamentos durante a época das chuvas.

O cenário prospectivo simulado apresenta um maior crescimento urbano, concentrado principalmente nos bairros Parque Barão do Amapá, e com um maior adensamento urbano nas Chácaras Rio-Petrópolis, em Duque de Caxias.

De acordo com Carneiro (2008), o principal fator limitante para a expansão do perímetro urbano para as áreas situadas no interior da bacia da Baía de Guanabara é a falta de conexões viárias e de linhas regulares de transporte de massa. A construção do AMRJ poderá mudar esta situação, que deve ser monitorada pelo poder público, a fim de que este planeje a ocupação da região.

Segundo o mesmo autor, a redução da vegetação natural na área estudada, associada com a expansão urbana, impermeabilização do solo e a baixa altitude do terreno, representam um fator relevante no agravamento das enchentes e dos alagamentos. Portanto, a preservação da vegetação remanescente pelo poder

público significa uma possibilidade de ganho ambiental para a cidade. As áreas planas “vazias” e em parte brejosas localizadas nas proximidades da REDUC, eram no passado revestidas pela Floresta Ombrófila Densa. Atualmente, existem somente pequenos fragmentos do que existia dessa formação.

A travessia de áreas sazonalmente úmidas, como as localizadas próximas a Cidade dos Meninos, representa um risco maior ao duto, aumentando a possibilidade quanto à corrosão externa e também à subsidência, principalmente em áreas de travessia de veículos. De acordo com Trench (2003), a corrosão é apontada como a segunda causa mais ocorrente de acidentes em dutos, sendo a principal, danos provocados por terceiros, como escavações e atividades agrícolas.

O planejamento das linhas dutoviárias é realizado considerando a travessia, em sua maior extensão, de áreas rurais. No entanto, o crescimento populacional e econômico faz com que estas áreas antes desocupadas passem a ser utilizadas para uso urbano. Este crescimento populacional próximo à faixa de dutos aumenta o risco de danos ao duto e também à população que vive ou trabalha próxima a estas áreas.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pode-se considerar que o trabalho cumpriu os objetivos propostos, fornecendo as principais tendências de ocupação e de mudanças de cobertura da terra para a área estudada. O trabalho também contribui por fornecer diretrizes para o monitoramento e estudo de áreas atravessadas por dutos através de técnicas de modelagem dinâmica espacial.

O uso de imagens orbitais de média resolução espacial, como as do Landsat 5/TM utilizadas neste trabalho, não permitem a distinção de usos do solo intraurbano (residencial, comercial, industrial etc.). Mesmo para os usos referentes à expansão urbana, em que se utilizam duas classes para a simulação: urbano e não urbano, as imagens possuem certa ambiguidade nas áreas periféricas, onde alguns assentamentos são difíceis de serem classificados, por apresentarem características ora urbanas, ora rurais, gerando confusão espectral. Desta forma, o trabalho foi desenvolvido considerando apenas as classes de cobertura da terra.

A obtenção fotografias aéreas ou imagens de satélite com uma resolução mais apurada para as décadas passadas revelou-se uma dificuldade para o presente trabalho, visto que a disponibilidade de imagens ou fotografias aéreas antigas, com melhor resolução, permitiria um maior detalhamento das classes utilizadas.

O tamanho reduzido da área de estudo é um fator que deve ser levado em consideração na modelagem, já que resultados melhores poderiam ser obtidos, caso se extrapolasse o modelo para a área total dos municípios, podendo-se assim considerar um número maior de variáveis.

Os bairros próximos à REDUC e à faixa de dutos ainda se apresentam 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.

A modelagem desenvolvida neste trabalho ajudou a compreender os fenômenos envolvidos nas mudanças de cobertura da terra através dos resultados alcançados por meio de métodos estatísticos. O Dinamica-EGO mostrou-se uma ferramenta útil e flexível, capaz de criar diferentes modelos para a representação da realidade.

Quanto à segurança do duto e da população que vive próxima à faixa, pode-se tecer as seguintes considerações:

- O estabelecimento de normas para o uso e cobertura da terra em áreas próximas à faixa de dutos pelo poder público em conjunto com a empresa responsável pela operação do duto, através de planos de gerenciamento, pode orientar o desenvolvimento urbano próximo a estas áreas. Neste sentido, a modelagem dinâmica contribui para o planejamento das áreas próximas à faixa, fornecendo as principais tendências de ocupação.
- A criação, manutenção e disponibilização de um banco de dados através da internet, com informações referentes aos dutos em operação, produtos transportados e aos tipos de uso e cobertura da terra próximo às faixas de dutos também seria uma importante ferramenta para o gerenciamento de riscos e para tomadas de decisão em caso de acidentes.

REFERÊNCIAS

- AGTERBERG, F.P. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF COMPUTERS AND OPERATIONS RESEARCH IN THE MINERAL INDUSTRY, 21. Colorado, USA, 1989. **Proceedings...** Colorado: Society of Mining Engineers. Chapter 18. 165-178p.
- AGTERBERG, F. P.; BONHAM-CARTER, G. F. Deriving weights of evidence from geoscience contour maps for the prediction of discrete events. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM APCOM, 22., 1990, Berlim. **Proceedings...** Berlin: Technical University of Berlin, 1990. Artigos, p. 381-395. CD-ROM.
- AGUIAR, A. P. D.; CAMARA, G.; ESCADA, M. I. S. Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. **Ecological Modelling**, v. 209, n. 2-4, p. 169-188. Dec 16, 2007.
- ALCAMO, J. Image-2.0 - Integrated Modeling of Global Climate-Change - Preface. **Water Air and Soil Pollution**, v. 76, n. 1-2, p. R9-R10. Jul, 1994.
- ALMEIDA, C. **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. 351f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 351f. p. 2003.
- ALMEIDA, C. M. et al. Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, M.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. (Ed.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais.** Brasília: EMBRAPA, v.1, 2007. p. 445-496.
- ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CAMARA, G. Perspectiva histórica de modelos de dinâmicas urbanas e regionais. In: ALMEIDA, C. M.; CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual.** São Paulo: Oficina de textos, 2007. Cap.12. p. 254-285.
- ALMEIDA, C. M. et al. GIS and remote sensing as tools for the simulation of urban land-use change. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 4, p. 759-774. Feb 20, 2005.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian Structural Provinces - an Introduction. **Earth-Science Reviews**, v. 17, n. 1-2, p. 1-29. 1981.
- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2010.** Rio de Janeiro: ANP. 2010.
- BATTY, M. **Urban modelling: algorithms, calibrations, predictions.** Cambridge University Press. 1976.
- BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. Urban systems as cellular automata.

Environment and Planning B-Planning & Design, v. 24, n. 2, p. 159-164. Mar, 1997.

BATTY, M.; XIE, Y.; SUN, Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, environment and urban systems**, v. 23, n. 3, p. 205-233. 1999.

BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov Analysis of Land-Use Change - Continuous Time and Stationary Processes. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 11, n. 1, p. 13-17. 1977.

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) – Centro de Ciências Rurais, Santa Maria. 167f. 2010.

BONHAM-CARTER, G. Comparison of image analysis and Geographic Information Systems for integrating geoscientific maps. *Statistical Applications in the Earth Sciences*. **Geological Survey of Canada Paper**, p. 89-9,141. 1989.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Pergamon. 1994.

BRAIL, R.; KLOSTERMAN, R. *Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems*. **Models, and Visualization Tools (ESRI Press, Redlands, CA)**. 2001.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam. **Folhas SF 23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro. v.32. 780 p., 1983.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acessado em 25/11/2010.

BRILHANTE, O. M.; FRANCO, R. Exposure pathways to HCH and DDT in Cidade dos Meninos and its surrounding districts of Amapa, Figueiras and Pilar, metropolitan regions of Rio de Janeiro, Brazil. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 16, n. 3, p. 205-217. Jun, 2006.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à modelagem dinâmica espacial**. 2003; São José dos Campos-SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CDROM.

CARNEIRO, P. R. F. **O Arco Metropolitano e o Futuro da Baixada Fluminense**. Disponível em <http://web.observatoriodasmetropoles.net/>. Acesso em 21 de junho de 2011.

- CHEIN, F. L. **Desigualdade regional, migração e custos de transporte**: três ensaios sobre desenvolvimento. 2006. 142f. Tese (Doutorado em Economia do Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional) – CEDEPLAR/FACE/UFMG, Belo Horizonte, 142f. 2006.
- CHERMACK, T. J. Disciplined imagination: Building scenarios and building theories. **Futures**, v. 39, n. 1, p. 1-15. Feb, 2007.
- CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. **Modelos integrados em geografia**. São Paulo: Ed. Universidade de São Paulo, 1974. v.2, 222p.
- CHWIF, L; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos**: teoria e aplicações. 1. Ed. São Paulo: Bravarte, 2006. v. 1, 255p.
- CIDE - CENTRO DE INFORMAÇÕES E DADOS DO RIO DE JANEIRO. Fundação. **Anuário estatístico do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro**, 2009. Disponível em: www.cide.rj.gov.br . Acesso em: 11 nov. 2009.
- CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. **Environment and Planning B-Planning & Design**, v. 24, n. 2, p. 247-261. Mar, 1997.
- COSTANZA, R. Model Goodness of Fit - a Multiple Resolution Procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, n. 3-4, p. 199-215. Sep 15, 1989.
- CPRM. **Projeto Rio de Janeiro**. Relatórios Técnicos. Brasília, CPRM - Serviço Geológico do Brasil Departamento de Recursos Minerais - DRM – RJ, 2000.
- _____. **Carta geológica do Brasil ao milionésimo, folha SF.23 Rio de Janeiro**. Brasília: Companhia de Recursos Minerais – CPR, 2004. 1 carta geológica. Escala: 1:1.000.000
- D'AMBROSIO, D. et al. A cellular automata model for soil erosion by water. **Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, v. 26, n. 1, p. 33-39. 2001.
- DEMIREL, H.; CETIN, M. Modelling urban dynamics via cellular automata. **ISPRS Archive** Vol. XXXVIII, Part 4-8-2-W9, "Core Spatial Databases - Updating, Maintenance and Services – from Theory to Practice", Haifa, Israel, 2010.
- DEWDNEY, A. A cellular universe of debris, droplets, defects and demons. **Scientific American**, v. 261, n. 2, p. 102-105. 1989.
- _____. The cellular automata programs that create Wireworld, Rugworld and other diversions. **Scientific American**, v. 262, n. 1, p. 146-149. 1990.
- DIAS, F. A questão metropolitana. **Cadernos Metrópole**, São Paulo, n.14, p.149-174, jul/dez. 2005.
- DI GREGORIO, S.; SERRA, R.; VILLANI, M. Applying cellular automata to complex environmental problems: The simulation of the bioremediation of contaminated soils. **Theoretical Computer Science**, v.217, n.1, Mar 28, p.131-156. 1999.

DRM. **Mapa geológico do estado o Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Minerais - DRM/RJ, 1980. 1 mapa geológico baseado em imagens MSS Satélite Landsat-1. Ecala 1:400.000.

ENGELLEN, G. et al. Using Cellular-Automata for Integrated Modeling of Socio-Environmental Systems. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 34, n. 2, p. 203-214. Jan, 1995.

ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE. **ARC/INFO v.10** Redlands, 2010. Programa de computador. DVD-ROM.

FERRARI, R. **Modelagem 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.

FERREIRA, M.V. **Análise das pressões do uso e ocupação da terra sobre o trecho da faixa de dutos Rio – Belo Horizonte**. 2009.184 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

FIRJAN. **Avaliação dos impactos logísticos e socioeconômicos da implantação do arco metropolitano do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro. 2008.

FONSECA, M.J.G. et al. 1998. **Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro (Escala 1:400.000)**. Texto explicativo, DNPM, 141 p.

FRANCA-ROCHA, W. J. S., BONHAM-CARTER, G., MISI, A. Estimando a favorabilidade para recursos minerais na Bacia de Irecê pelos métodos “Lógica Nebulosa” e “Pesos da Evidências”. **Sitientibus**, n.22, p.27 – 54, 2000.

GARDNER, M. Fantastic Combinations of John Conways New Solitaire Game Life. **Scientific American**, v. 223, n. 4, p. 120-&. 1970.

GEERTMAN, S.; STILLWELL, J. C. H. **Planning support systems in practice**. Springer Verlag. 2002.

GEOSIMULATION. <http://www.geosimulation.org/geosim/cellular_automata.htm>. Acesso em 28/03/2011.

GOODACRE, A. K. et al. A Statistical-Analysis of the Spatial Association of Seismicity with Drainage Patterns and Magnetic-Anomalies in Western Quebec (Vol 217, Pg 285, 1993). **Tectonophysics**, v. 225, n. 4, p. 551-551. Oct 30, 1993.

GOODCHILD, M. F. Fractals and the Accuracy of Geographical Measures. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 12, n. 2, p. 85-98. 1980.

GUIDICINI, G.; IWASA, O.Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1976. (Publicação IPT, 1080).

HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps.

International Journal of Geographical Information Science, v. 17, n. 3, p. 235-249. Apr-May, 2003.

HESTENES, D. Toward a Modeling Theory of Physics Instruction. **American Journal of Physics**, v. 55, n. 5, p. 440-454. May, 1987.

HUMPHREY, C. R.; SELL, R. R. The impact of controlled access highways on population growth in Pennsylvania nonmetropolitan communities, 1940-1970. **Rural Sociology**, v.40, p.332-343, 1975.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem da População 1996 - Conceituação das características**. Rio de Janeiro: IBGE, 1997. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem/default.shtm>. Acesso em: Novembro de 2009.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de vegetação do Brasil**, Escala 1:5.000.000. IBGE, 2004. Rio de Janeiro.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades@**. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 10 dez. 2009.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. 2010.

JÓRDAN, G. C. **O Jogo da Vida de John Conway**. Portugal: Universidade de Aveiro, 2003. Disponível em: <http://www2.mat.ua.pt/lap/Praticas/JogoVida/JogodaVida.pdf>, acesso em 28/04/2011.

JRC - Joint Research Centre – European Commission/Institute for Remote Sensing Applications. ESA - European Space Agency/ESRIN – Earthnet Programme Office. **Modelling Deforestation Processes – A Review**. Trees Series B: Research Report n° 1. Luxembourg: ECSC-EC-EAEC, 1994.

JUDGE, G. G.; SWANSON, E. R. Markov chains: Basic concepts and suggested uses in agricultural economics. **Australian Journal of Agricultural Economics**, vol. 06, n. 02, p. 49-61, 1962-12.

KARAFYLLIDIS, I.; THANAILAKIS, A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. **Ecological Modelling**, v. 99, n. 1, p. 87-97. Jun 16, 1997.

LEE, D. B. Requiem for Large-Scale Models. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 39, n. 3, p. 163-178. 1973.

LI, H.; REYNOLDS, J. Modeling effects of spatial pattern, drought, and grazing on rates of rangeland degradation: A combined Markov and cellular automaton approach. **Scale in remote sensing and GIS**, p. 211–230. 1997.

LICHTER, D. T.; FUGUITT, G. V. Demographic response to transportation innovation: The case of the interstate highway. **Social Forces**, v. 59, p. 492. 1980.

LIU, Y. **Modelling urban development with geographical information systems and cellular automata**. CRC. 2009.

LU, D. et al. Change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2365-2407. Jun, 2004.

MAEDA, E. E. et al. 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**, v. 13, n. 3, p. 435-446. Jun, 2011.

MARTINS, C. C. **Autômato celular aplicado no crescimento de câncer**. 2010. 67f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL E COMBATE À FOME. **Diagnóstico das Condições Sócio- Econômicas e da Gestão Pública dos Municípios da Baixada Fluminense**. Brasília; Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: https://www.presidencia.gov.br/sri/CooperacaoInternacional/DocsCooptliana/BaixadaF_PSociais.pdf.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 30 out. 2008.

NOVAES, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Editora E. Blücher, 1981. 290p.

NOVAES, M. R. **Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial**. 2010. 155f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 155f. p. 2010.

OGUZ, H. **Modeling urban growth and land use/land cover change in the Houston Metropolitan Area from 2002 – 2030**. 2004. 163f. Ph.D. Dissertation, Texas A & M University. 2004.

PAN, Y. et al. The impact of variation in scale on the behavior of a cellular automata used for land use change modeling. **Computers Environment and Urban Systems**, v. 34, n. 5, p. 400-408. Aug, 2010.

PAPADAKIS, G. A. Assessment of requirements on safety management systems in EU regulations for the control of major hazard pipelines. **Journal of Hazardous Materials**, v. 78, n. 1-3, p. 63-89. Nov 3, 2000.

PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. **Ranking decrescente do IDH-M dos municípios do Brasil**. 2000. Disponível em: <http://www.pnud.org.br>. Acesso em: 05 jan. 2010.

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, v. 68, n. 10, p. 1041-1049. Oct, 2002.

PORWAL, A.; HALE, M. GIS-based weights-of-evidence analysis of multi-class spatial data for predictive mineral mapping: A case study from Aravalli province, western India. In: INTERN. CON. APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING, 14. 2000. **Proceedings**. v. p. 377–384.

POWER, C.; SIMMS, A.; WHITE, R. Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of land use maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 15, n. 1, p. 77-100. Jan, 2001.

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., 2007. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. p. 3089-3096.

RODRIGUES, H. O. Providing powerful modeling and analytical tools to turn oceans of data into intelligence: the Dinamica EGO approach. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba-PR.

RSI - Research Systems Inc. **The Environment for Visualizing Images - ENVI**. Boulder, CO, USA, 2009.

RUMBAUGH, J. **Object-oriented modeling and design**. Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, c1991.

SHANNON, R.E; **Systems Simulation – The Art and Science**, Prentice-Hall, 1975.

SILVERTOWN, J. et al. Cellular Automaton Models of Interspecific Competition for Space - the Effect of Pattern on Process. **Journal of Ecology**, v. 80, n. 3, p. 527-534. 1992.

SILVESTRINI, R. A. **Modelo probabilístico de ignição e propagação de fogo em áreas de floresta na Amazônia brasileira**. 2008. 50f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SOARES-FILHO, B. S.; ASSUNCAO, R. M.; PANTUZZO, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an amazonian colonization frontier. **Bioscience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067. Dec, 2001.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. C. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154, n. 3, p. 217-235. Sep 1, 2002.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: Albernaz, A. L. et al., (Ed.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de**

espécies em ambientes tropicais. S/l: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. p., 1-16.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Cenários de desmatamento para a Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 137-152. 2005.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, n. 7083, p. 520-523. Mar 23, 2006.

SOARES FILHO, B. S. et al. **Modelagem de dinâmica ambiental com Dinamica EGO.** Belo Horizonte. CSR-UFMG. 2009.

STRAATMAN, B. et al. The use of cellular automata for spatial modelling and decision support in coastal zones and estuaria. **MMTRI f. K. a. Systems. Maastricht, The Netherlands: Maastricht University.** 2001.

STEWART, I. **Será que Deus joga dados?** – a nova matemática do Caos. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1991.

TOBLER, W. R. Computer Movie Simulating Urban Growth in Detroit Region. **Economic Geography**, v. 46, n. 2, p. 234-240. 1970.

TRENCH, C. J. **The U.S. Oil Pipeline Industry's Safety Performance.** Allegro Energy Group, New York, March. 2003.

TRENTIN, G. **A expansão urbano-industrial do município de Americana-SP: geotecnologias aplicadas a análise temporal e simulação de cenários.** 2008.237 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

VALENTIN, E. F. D. **Modelagem dinâmica de perdas de solo: o caso do alto curso da bacia hidrográfica do rio Descoberto-DF/GO.** 2008. 95f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

VERBURG, P. H. et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. **Applied Geography**, v. 26, n. 2, p. 153-173. Apr, 2006.

VERBURG, P. H. et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. **Environmental Management**, v. 30, n. 3, p. 391-405. Sep, 2002.

VICARI, A. et al. Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a Cellular Automata approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 22, n. 10, p. 1465-1471. Oct, 2007.

VOSS, P. R.; CHI, G. Highways and Population Change. **Rural sociology**, v. 71, n. 1, p. 33-58. 2006.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular-Automata and Fractal Urban Form - a Cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Patterns. **Environment and Planning A**, v. 25, n. 8, p. 1175-1199. Aug, 1993.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular dynamics and GIS: modelling spatial complexity.

Geographical systems, v. 1, n. 3, p. 237-253. 1994.

WILSON, A. G. **Urban and regional models in geography and planning**. London: John Wiley & Sons. 1974.

WOLFRAM, S. Statistical-Mechanics of Cellular Automata. **Reviews of Modern Physics**, v. 55, n. 3, p. 601-644. 1983.

WOLFRAM, S. **A new kind of science**. Wolfram Media Champaign, IL, v. 1. 2002.

XIMENES, A. D. E. C. et al. MODELAGEM DINÂMICA DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 47, n. 3, p. 370-397. 2008.

ZHAO, S. Simulation of Mass Fire-Spread in Urban Densely Built Areas Based on Irregular Coarse Cellular Automata. **Fire Technology**, v. 47, p. 721-749. 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Pesos de evidência para a calibração do modelo utilizado nos dois períodos analisados.

Obs. A primeira coluna mostra os intervalos; a segunda, o tamanho das faixas de distância (*buffer*) em células; a terceira, o número de transições ocorridas dentro de cada *buffer*; a quarta, os pesos de evidência obtidos; a quinta, a medida do *contraste*, e a última, o resultado para o teste de significância estatística.

1. Período de simulação 1987-1998

a) Transição “vegetação arbórea para outros”

Tabela 21 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W ⁺	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	573	247	0,696692	0,717807	sim
$10 \leq v < 20$	2464	1468	1,36211	1,57566	sim
$20 \leq v < 30$	2072	1042	0,985784	1,10827	sim
$30 \leq v < 40$	2213	892	0,581523	0,654943	sim
$40 \leq v < 50$	2357	664	0,038226	0,042835	não
$50 \leq v < 60$	2009	628	0,186178	0,205645	sim
$60 \leq v < 70$	1531	362	-0,198059	-0,21208	sim
$70 \leq v < 80$	1264	256	-0,396345	-0,41805	sim
$80 \leq v < 90$	1040	169	-0,665542	-0,69307	sim
$90 \leq v < 100$	955	121	-0,956242	-0,98945	sim
$100 \leq v < 110$	861	78	-1,33222	-1,3693	sim
$110 \leq v < 120$	661	30	-2,07191	-2,10707	sim
$120 \leq v < 130$	592	35	-1,79302	-1,82256	sim
$130 \leq v < 140$	535	20	-2,27423	-2,30356	sim
$140 \leq v < 330$	2968	43	-3,24565	-3,43985	sim
Total	22095	6055			

Tabela 22 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável áreas protegidas.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	20862	6082	0,0877779	~ 0	não
$2 \leq v < 3$	1356	0	~ 0	-0,08778	não
Total	22218	6082			

Tabela 23 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante	
$0 \leq v < 60$	519	115	-0,28739	-0,29386	sim	
$60 \leq v < 90$	566	161	0,0466102	0,047854	não	
$90 \leq v < 120$	456	162	0,373109	0,381637	sim	
$120 \leq v < 180$	1335	389	0,0804297	0,085723	não	
$180 \leq v < 240$	1512	386	-0,101497	-0,1088	não	
$240 \leq v < 65550$	17618	4840	-	0,00171734	-0,0086	não
Total	22006	6053				

Tabela 24 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	131	37	0,0449632	0,045233	não
$60 \leq v < 420$	3115	752	-0,167611	-0,19378	sim
$420 \leq v < 450$	383	59	-0,725866	-0,7364	sim
$450 \leq v < 480$	365	70	-0,46114	-0,46801	sim
$480 \leq v < 1380$	9150	2026	-0,280066	-0,45696	sim
$1380 \leq v < 1410$	174	83	0,885321	0,893439	sim
$1410 \leq v < 1620$	1193	467	0,536119	0,570153	sim
$1620 \leq v < 1650$	131	40	0,15536	0,156315	não
$1650 \leq v < 2100$	1866	657	0,367475	0,404154	sim
$2100 \leq v < 2250$	660	271	0,61588	0,637159	sim
$2250 \leq v < 2580$	1143	388	0,311628	0,329762	sim
$2580 \leq v < 2670$	390	115	0,105501	0,107434	não
$2670 \leq v < 2700$	123	31	-0,110461	-0,11106	não
$2700 \leq v < 3420$	2360	692	0,0975454	0,109444	sim
$3420 \leq v < 3450$	59	30	1,01124	1,0144	sim
$3450 \leq v < 3510$	103	66	1,55608	1,56472	sim
$3510 \leq v < 3660$	186	94	0,998846	1,00874	sim

Tabela 24 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de estradas principais (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$3660 \leq v < 3690$	49	11	-0,262351	-0,2629	não
$3690 \leq v < 3720$	56	10	-0,548716	-0,54992	não
$3720 \leq v < 3750$	71	17	-0,178431	-0,17898	não
$3750 \leq v < 3780$	66	12	-0,526737	-0,52811	não
$3780 \leq v < 3840$	131	33	-0,11112	-0,11176	não
$3840 \leq v < 3870$	59	17	0,0728838	0,073081	não
$3870 \leq v < 3990$	133	52	0,534135	0,537707	sim
$3990 \leq v < 4020$	21	10	0,88203	0,882997	sim
$4020 \leq v < 4290$	36	22	1,42933	1,43209	sim
$4290 \leq v < 65550$	28	3	-1,14292	-1,14398	não
Total	22182	6065			

Tabela 25 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável declividade.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	845	375	0,779052	0,81593	sim
$2 \leq v < 8$	3383	1318	0,555844	0,674551	sim
$8 \leq v < 9$	520	159	0,184885	0,189651	sim
$9 \leq v < 31$	14512	3781	-0,0382894	-0,1151	sim
$31 \leq v < 32$	436	51	-1,01656	-1,03239	sim
$32 \leq v < 33$	368	30	-1,41699	-1,43344	sim
$33 \leq v < 34$	358	21	-1,7707	-1,78865	sim
$34 \leq v < 35$	267	9	-2,35088	-2,3658	sim
$35 \leq v < 36$	245	15	-1,72517	-1,73725	sim
$36 \leq v < 37$	163	3	-2,9717	-2,98137	sim
$37 \leq v < 65536$	460	15	-2,38517	-2,41117	sim
Total	21557	5777			

b) Transição “outros para vegetação arbórea”

Tabela 26 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	39541	361	-1,61395	-2,22317	sim
$10 \leq v < 20$	17835	858	0,0880823	0,114659	sim
$20 \leq v < 30$	8686	613	0,495177	0,573691	sim
$30 \leq v < 40$	5430	348	0,391835	0,426526	sim
$40 \leq v < 50$	2831	309	0,973627	1,03137	sim
$50 \leq v < 60$	1940	281	1,29748	1,35818	sim
$60 \leq v < 70$	1105	196	1,53886	1,58381	sim

Tabela 26 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável altitude (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$70 \leq v < 80$	811	171	1,75329	1,79435	sim
$80 \leq v < 280$	1946	407	1,74302	1,84471	sim
Total	80125	3544			

Tabela 27 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável áreas protegidas.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	80175	3562	0,00142172	~ 0	não
$2 \leq v < 3$	109	0	~ 0	-0,00142	não
Total	80284	3562			

Tabela 28 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	4480	99	-0,729548	-0,76133	sim
$60 \leq v < 150$	9663	268	-0,496581	-0,55142	sim
$150 \leq v < 330$	15638	527	-0,295613	-0,35856	sim
$330 \leq v < 360$	1900	77	-0,104069	-0,10654	não
$360 \leq v < 390$	2157	111	0,146253	0,150702	não
$390 \leq v < 65550$	44291	2416	0,207789	0,557699	sim
Total	78129	3498			

Tabela 29 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	1389	58	-0,0601846	-0,06122	não
$60 \leq v < 90$	1321	43	-0,318793	-0,32344	sim
$90 \leq v < 120$	883	13	-1,13049	-1,13827	sim
$120 \leq v < 150$	862	20	-0,66699	-0,67241	sim
$150 \leq v < 180$	1139	33	-0,438939	-0,44416	sim
$180 \leq v < 270$	2644	95	-0,216521	-0,22324	sim
$270 \leq v < 330$	1521	70	0,0415451	0,042369	não
$330 \leq v < 360$	688	40	0,288047	0,290914	não
$360 \leq v < 570$	5017	228	0,0283269	0,030255	não
$570 \leq v < 600$	686	17	-0,599513	-0,6035	sim
$600 \leq v < 630$	661	22	-0,295804	-0,29797	não
$630 \leq v < 660$	792	47	0,309822	0,313413	sim

Tabela 29 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável distância de estradas principais (cont).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
660 ≤ v < 690	659	29	-0,00536583	-0,00541	não
690 ≤ v < 720	667	47	0,493486	0,498733	sim
720 ≤ v < 750	692	66	0,823363	0,834005	sim
750 ≤ v < 1470	16856	1271	0,566553	0,784626	sim
1470 ≤ v < 1500	700	14	-0,818762	-0,82383	sim
1500 ≤ v < 2580	23793	571	-0,632408	-0,81922	sim
2580 ≤ v < 2610	556	36	0,402748	0,406161	sim
2610 ≤ v < 3330	11433	615	0,205714	0,244231	sim
3330 ≤ v < 3360	354	15	-0,0448917	-0,04509	não
3360 ≤ v < 3420	692	22	-0,343177	-0,34575	não
3420 ≤ v < 3450	381	5	-1,24709	-1,25062	sim
3450 ≤ v < 3510	718	13	-0,92019	-0,92579	sim
3510 ≤ v < 3540	356	9	-0,579042	-0,58105	não
3540 ≤ v < 3570	368	15	-0,0853597	-0,08574	não
3570 ≤ v < 3600	336	11	-0,312872	-0,31402	não
3600 ≤ v < 3660	545	22	-0,0954809	-0,09611	não
3660 ≤ v < 3720	486	14	-0,444863	-0,4471	não
3720 ≤ v < 3750	180	7	-0,134323	-0,13461	não
3750 ≤ v < 3780	196	4	-0,798143	-0,79953	não
3780 ≤ v < 3810	179	5	-0,476559	-0,47743	não
3810 ≤ v < 3840	179	6	-0,288474	-0,28904	não
3840 ≤ v < 3870	175	7	-0,104996	-0,10522	não
3870 ≤ v < 3900	174	13	0,556603	0,558181	não
3900 ≤ v < 3930	187	10	0,199494	0,200008	não
3930 ≤ v < 3960	159	7	-0,00491221	-0,00492	não
3960 ≤ v < 3990	162	6	-0,185038	-0,18539	não
3990 ≤ v < 4020	146	1	-1,90368	-1,9053	não
4020 ≤ v < 4050	130	0	~ 0	-0,00171	não
4050 ≤ v < 65550	676	0	~ 0	-0,00891	não
Total	79738	3527			

Tabela 30 - Transição "outros para vegetação arbórea": variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
0 ≤ v < 2	15762	296	-1,41516	-1,77931	sim
2 ≤ v < 3	4020	196	-0,430055	-0,46436	sim
3 ≤ v < 4	2190	137	-0,166194	-0,17401	não
4 ≤ v < 6	2643	206	0,070236	0,074714	não

Tabela 30 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável distância de estradas principais (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$6 \leq v < 7$	1140	129	0,482	0,497348	sim
$7 \leq v < 8$	979	79	0,107936	0,110428	não
$8 \leq v < 10$	2022	206	0,364368	0,384373	sim
$10 \leq v < 13$	3112	384	0,580201	0,636199	sim
$13 \leq v < 65536$	13572	1686	0,587881	0,965579	sim
Total	45440	3319			

c) Transição “outros para área construída”

Tabela 31 - Transição “outros para área construída”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	40089	909	0,594975	2,5032	sim
$10 \leq v < 20$	16999	22	-2,29002	-2,51794	sim
$20 \leq v < 30$	8089	16	-1,86514	-1,96008	sim
$30 \leq v < 40$	5103	21	-1,13039	-1,17739	sim
$40 \leq v < 50$	2530	8	-1,39481	-1,4201	sim
$50 \leq v < 60$	1662	3	-1,95681	-1,97564	sim
$60 \leq v < 70$	910	1	-2,45379	-2,46471	sim
$70 \leq v < 80$	640	0	~ 0	-0,00839	não
$80 \leq v < 280$	1539	0	~ 0	-0,0203	não
Total	77561	980			

Tabela 32 - Transição “outros para área construída”: variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	4403	22	-0,957141	-0,99484	sim
$60 \leq v < 120$	6905	50	-0,583862	-0,62762	sim
$120 \leq v < 150$	2576	36	0,0804482	0,083404	não
$150 \leq v < 210$	5809	97	0,261235	0,286289	sim
$210 \leq v < 240$	2594	33	-0,0147969	-0,01532	não
$240 \leq v < 300$	4824	46	-0,306287	-0,32417	sim
$300 \leq v < 450$	9887	122	-0,0456901	-0,05239	não
$450 \leq v < 480$	1691	31	0,356263	0,366047	sim
$480 \leq v < 660$	9714	220	0,572061	0,691419	sim
$660 \leq v < 690$	1355	22	0,232704	0,23748	não
$690 \leq v < 1320$	21982	295	0,0393557	0,055935	não
$1320 \leq v < 1350$	447	1	-1,76347	-1,76844	não
$1350 \leq v < 1440$	1104	1	-2,66894	-2,6828	sim

Tabela 32 - Transição "outros para área construída": variável distância de drenagens. (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1440 \leq v < 65550$	2316	0	~ 0	-0,03152	não
Total	75607	976			

Tabela 33 - Transição "outros para área construída": variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 120$	3483	4	-2,42868	-2,47137	sim
$120 \leq v < 150$	842	0	~ 0	-0,01111	não
$150 \leq v < 180$	1123	17	0,164232	0,166864	não
$180 \leq v < 270$	2600	51	0,427893	0,446545	sim
$270 \leq v < 300$	748	20	0,744955	0,755683	sim
$300 \leq v < 330$	739	16	0,528703	0,535399	sim
$330 \leq v < 660$	7624	134	0,31604	0,357393	sim
$660 \leq v < 690$	630	0	~ 0	-0,0083	não
$690 \leq v < 810$	2553	3	-2,40571	-2,43672	sim
$810 \leq v < 840$	606	2	-1,3709	-1,37685	não
$840 \leq v < 870$	613	3	-0,975323	-0,98034	não
$870 \leq v < 900$	684	5	-0,571659	-0,57557	não
$900 \leq v < 930$	604	11	0,352225	0,355541	não
$930 \leq v < 960$	638	9	0,0926172	0,093425	não
$960 \leq v < 1140$	3679	64	0,30556	0,323516	sim
$1140 \leq v < 1410$	6301	88	0,0824615	0,09012	não
$1410 \leq v < 1440$	656	4	-0,754226	-0,75879	não
$1440 \leq v < 1470$	689	3	-1,09274	-1,09876	não
$1470 \leq v < 1590$	2773	16	-0,809786	-0,83041	sim
$1590 \leq v < 1620$	697	7	-0,251258	-0,25329	não
$1620 \leq v < 1710$	2110	31	0,133869	0,137894	não
$1710 \leq v < 1740$	723	16	0,551082	0,557989	sim
$1740 \leq v < 1770$	682	8	-0,0942647	-0,09507	não
$1770 \leq v < 1800$	739	4	-0,874052	-0,87971	não
$1800 \leq v < 1980$	4176	32	-0,524157	-0,54734	sim
$1980 \leq v < 2160$	3692	35	-0,309526	-0,32286	não
$2160 \leq v < 2220$	1351	16	-0,084574	-0,08602	não
$2220 \leq v < 2250$	627	9	0,11026	0,111213	não
$2250 \leq v < 2280$	613	5	-0,461213	-0,46418	não
$2280 \leq v < 2430$	3153	21	-0,665381	-0,68599	sim
$2430 \leq v < 2460$	555	1	-1,97764	-1,98393	sim
$2460 \leq v < 2730$	4908	17	-1,32241	-1,37149	sim
$2730 \leq v < 2760$	505	7	0,074834	0,075345	não
$2760 \leq v < 2790$	522	5	-0,299081	-0,30085	não
$2790 \leq v < 2820$	530	8	0,161298	0,162506	não
$2820 \leq v < 2880$	1005	20	0,442615	0,449932	sim

Tabela 33 - Transição "outros para área construída": variável distância de estradas principais (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$2880 \leq v < 3120$	3663	89	0,64672	0,69249	sim
$3120 \leq v < 3300$	2243	44	0,427956	0,443952	sim
$3300 \leq v < 3330$	370	0	~ 0	-0,00487	não
$3330 \leq v < 3480$	1764	2	-2,44153	-2,46291	sim
$3480 \leq v < 3510$	330	2	-0,760343	-0,76264	não
$3510 \leq v < 3540$	348	1	-1,5098	-1,51336	não
$3540 \leq v < 3570$	353	0	~ 0	-0,00464	não
$3570 \leq v < 3900$	2366	5	-1,81788	-1,84431	sim
$3900 \leq v < 3930$	185	8	1,24282	1,24857	sim
$3930 \leq v < 4080$	756	52	1,73399	1,77844	sim
$4080 \leq v < 4470$	631	84	2,46589	2,54698	sim
$4470 \leq v < 65550$	23	15	4,96813	4,98323	sim
Total	77205	994			

Tabela 34 - Transição "outros para área construída": variável litologia.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	2737	0	~0	-0.0670767	não
$2 \leq v < 3$	38174	956	0.0420872	0.430545	sim
$3 \leq v < 255$	2	0	~0	-4.7408e-005	não
$255 \leq v < 256$	2314	83	0.412513	0.441437	sim
Total	43227	1039			

Tabela 35 - Transição "outros para área construída": variável declividade.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	15639	173	0,431609	0,807275	sim
$2 \leq v < 3$	3841	17	-0,491122	-0,52914	sim
$3 \leq v < 4$	2068	15	0,00570939	0,006003	não
$4 \leq v < 7$	3469	21	-0,176311	-0,19062	não
$7 \leq v < 17$	9068	44	-0,398737	-0,4846	sim
$17 \leq v < 18$	849	6	-0,0204909	-0,02091	não
$18 \leq v < 19$	854	4	-0,434225	-0,44145	não
$19 \leq v < 20$	832	6	-0,000118699	-0,00012	não
$20 \leq v < 21$	787	7	0,211333	0,215783	não
$21 \leq v < 22$	701	4	-0,235774	-0,2393	não
$22 \leq v < 23$	683	2	-0,905699	-0,91544	não
$23 \leq v < 24$	555	3	-0,290219	-0,29356	não

Tabela 35 - Transição “outros para área construída”: variável declividade (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$24 \leq v < 25$	559	1	-1,39964	-1,40971	não
$25 \leq v < 26$	433	0	~ 0	-0,01033	não
$26 \leq v < 27$	365	1	-0,972437	-0,97784	não
$27 \leq v < 28$	344	0	~ 0	-0,0082	não
$28 \leq v < 29$	261	1	-0,635965	-0,63888	não
$29 \leq v < 31$	445	1	-1,17111	-1,17843	não
$31 \leq v < 32$	160	0	~ 0	-0,00381	não
$32 \leq v < 65536$	514	0	~ 0	-0,01228	não
Total	42427	306			

2. Período de simulação 1998-2010

a) Transição “vegetação arbórea para outros”

Tabela 36 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	687	672	4,80323	4,93879	sim
$10 \leq v < 20$	1854	1356	2,00272	2,26526	sim
$20 \leq v < 30$	1643	888	1,16328	1,29391	sim
$30 \leq v < 40$	1669	586	0,386855	0,426264	sim
$40 \leq v < 50$	2002	507	-0,0803447	-0,0893031	não
$50 \leq v < 60$	1662	459	0,0375023	0,0410129	não
$60 \leq v < 70$	1365	257	-0,46021	-0,490672	sim
$70 \leq v < 80$	1179	179	-0,719344	-0,757126	sim
$80 \leq v < 90$	1006	94	-1,27132	-1,3191	sim
$90 \leq v < 100$	925	76	-1,4123	-1,45887	sim
$100 \leq v < 330$	5592	189	-2,35194	-2,78902	sim
Total	19584	5263			

Tabela 37 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável áreas mineradas.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	20875	5369	-0,00113443	-0,343908	não
$2 \leq v < 255$	16	11	1,84791	1,84963	sim
$255 \leq v < 256$	48	10	-0,27555	-0,27614	não
Total	20939	5390			

Tabela 38 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável áreas protegidas.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	18342	5273	0,0984608	6,30391	sim
$2 \leq v < 3$	1356	1	-6,20545	-6,30391	sim
Total	19698	5274			

Tabela 39 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	503	122	-0,136377	-0,139878	não
$60 \leq v < 180$	2020	401	-0,393201	-0,434094	sim
$180 \leq v < 210$	527	86	-0,632296	-0,647173	sim
$210 \leq v < 240$	741	144	-0,419702	-0,434601	sim
$240 \leq v < 270$	766	182	-0,163493	-0,169927	sim
$270 \leq v < 1200$	13826	3743	0,0114383	0,0398144	não
$1200 \leq v < 1230$	90	32	0,407695	0,409757	não
$1230 \leq v < 1350$	320	148	0,852119	0,868709	sim
$1350 \leq v < 1380$	64	52	2,46874	2,4779	sim
$1380 \leq v < 1800$	482	291	1,42345	1,46728	sim
$1800 \leq v < 1830$	16	2	-0,943508	-0,94411	não
$1830 \leq v < 1860$	17	5	0,126933	0,127047	não
$1860 \leq v < 1920$	40	8	-0,383893	-0,384611	não
$1920 \leq v < 1950$	10	0	~ 0	-0,000703037	não
$1950 \leq v < 65550$	29	6	-0,341333	-0,341801	não
Total	19451	5222			

Tabela 40 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	152	77	1,03568	1,04524	sim
$60 \leq v < 210$	865	375	0,741884	0,781408	sim
$210 \leq v < 240$	227	72	0,242604	0,245597	não
$240 \leq v < 270$	237	57	-0,140542	-0,142201	não
$270 \leq v < 300$	231	45	-0,409721	-0,414111	sim
$300 \leq v < 330$	263	43	-0,623064	-0,630234	sim
$330 \leq v < 360$	257	45	-0,54056	-0,546782	sim

Tabela 40 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância de estradas principais (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
360 ≤ v < 390	320	68	-0,300558	-0,305172	sim
390 ≤ v < 1050	7323	1691	-0,193781	-0,301014	sim
1050 ≤ v < 1080	251	97	0,547122	0,555027	sim
1080 ≤ v < 1830	3755	1230	0,290136	0,36442	sim
1830 ≤ v < 1860	69	6	-1,34201	-1,34525	sim
1860 ≤ v < 1920	164	17	-1,14786	-1,15487	sim
1920 ≤ v < 1950	82	10	-0,964718	-0,967824	sim
1950 ≤ v < 1980	102	18	-0,531082	-0,533497	sim
1980 ≤ v < 2070	320	68	-0,300558	-0,305172	sim
2070 ≤ v < 2550	1401	342	-0,120906	-0,129908	sim
2550 ≤ v < 2580	126	52	0,656542	0,661349	sim
2580 ≤ v < 2730	649	219	0,33465	0,346962	sim
2730 ≤ v < 3120	1461	424	0,11501	0,124515	sim
3120 ≤ v < 3150	72	16	-0,2434	-0,244243	não
3150 ≤ v < 3210	143	27	-0,44839	-0,451321	sim
3210 ≤ v < 3240	67	11	-0,618093	-0,619892	não
3240 ≤ v < 3270	72	8	-1,07008	-1,07301	sim
3270 ≤ v < 3300	66	12	-0,494714	-0,496182	não
3300 ≤ v < 3330	58	18	0,210856	0,21151	não
3330 ≤ v < 3360	52	20	0,53936	0,540954	não
3360 ≤ v < 3390	47	22	0,88153	0,883994	sim
3390 ≤ v < 3480	98	37	0,509407	0,512238	sim
3480 ≤ v < 3510	22	5	-0,214412	-0,21464	não
3510 ≤ v < 3540	18	1	-1,82385	-1,82484	não
3540 ≤ v < 3570	30	5	-0,600075	-0,600859	não
3570 ≤ v < 3600	24	1	-2,12613	-2,12754	sim
3600 ≤ v < 3630	33	6	-0,494714	-0,495447	não
3630 ≤ v < 3690	91	14	-0,695385	-0,698076	sim
3690 ≤ v < 3720	51	5	-1,20984	-1,21209	sim
3720 ≤ v < 3750	61	8	-0,881487	-0,883649	sim
3750 ≤ v < 3810	113	17	-0,721771	-0,725217	sim
3810 ≤ v < 3840	54	12	-0,2434	-0,244031	não
3840 ≤ v < 3870	49	7	-0,782396	-0,783983	não
3870 ≤ v < 3900	47	12	-0,061078	0,0612224	não
3900 ≤ v < 3930	29	6	-0,334371	-0,334826	não
3930 ≤ v < 3960	22	4	-0,494714	-0,495202	não
3960 ≤ v < 3990	19	6	0,236173	0,236414	não
3990 ≤ v < 4020	12	3	-0,0892489	-0,0893023	não
4020 ≤ v < 4080	13	2	-0,695385	-0,695768	não
4080 ≤ v < 65550	26	6	-0,194609	-0,194855	não
Total	19644	5247			

Tabela 41 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável distância do AMRJ.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 270$	717	716	7,63683	7,78024	sim
$270 \leq v < 300$	112	109	4,65588	4,67624	sim
$300 \leq v < 10920$	20039	4532	-0,166983	-6,55922	sim
Total	20868	5357			

Tabela 42 - Transição “vegetação arbórea para outros”: variável declividade.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	766	423	1,27687	1,34296	sim
$2 \leq v < 5$	1553	684	0,827848	0,915495	sim
$5 \leq v < 6$	462	158	0,4128	0,424034	sim
$6 \leq v < 7$	417	168	0,673744	0,691042	sim
$7 \leq v < 8$	380	130	0,413307	0,422514	sim
$8 \leq v < 10$	910	348	0,587934	0,62144	sim
$10 \leq v < 15$	2827	955	0,394182	0,470311	sim
$15 \leq v < 17$	1326	381	0,158848	0,171187	sim
$17 \leq v < 19$	1243	-318	0,000509264	-0,00054471	não
$19 \leq v < 21$	1297	369	0,144998	0,155959	sim
$21 \leq v < 22$	667	128	-0,370452	-0,382583	sim
$22 \leq v < 23$	651	142	-0,209388	-0,216381	sim
$23 \leq v < 24$	622	107	-0,504105	-0,518884	sim
$24 \leq v < 29$	2766	400	-0,710258	-0,806993	sim
$29 \leq v < 30$	473	51	-1,04595	-1,0656	sim
$30 \leq v < 31$	480	29	-1,67694	-1,70324	sim
$31 \leq v < 65536$	2259	97	-2,03684	-2,18184	sim
Total	19099	4888			

b) Transição “outros para vegetação arbórea”

Tabela 43 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 20$	57513	920	-1,02133	-1,99493	sim
$20 \leq v < 30$	9114	599	0,443616	0,513888	sim
$30 \leq v < 40$	5859	605	0,936422	1,05423	sim
$40 \leq v < 50$	3165	389	1,13275	1,21295	sim
$50 \leq v < 60$	2281	339	1,35247	1,42789	sim
$60 \leq v < 110$	3510	607	1,53297	1,68301	sim
$110 \leq v < 170$	606	87	1,31194	1,33015	sim
$170 \leq v < 180$	25	1	-0,0801152	-0,0801387	não
$180 \leq v < 190$	9	0	~ 0	-0,000114548	não
$190 \leq v < 280$	39	0	~ 0	-0,000496471	não
Total	82121	3547			

Tabela 44 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável áreas protegidas.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	82185	3563	0,00138542	~ 0	não
$2 \leq v < 3$	109	0	~ 0	-0,00138542	não
Total	82294	3563			

Tabela 45 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	4494	122	-0,496693	-0,520094	sim
$60 \leq v < 90$	4292	157	-0,188735	-0,198494	sim
$90 \leq v < 120$	2871	138	0,0963608	0,100108	não
$120 \leq v < 65550$	68512	3098	0,0322827	0,244168	sim
Total	80169	3515			

Tabela 46 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	1350	75	0,262917	0,267911	sim
$60 \leq v < 630$	15893	735	0,0697167	0,087221	sim
$630 \leq v < 660$	822	15	-0,889144	-0,895264	sim
$660 \leq v < 780$	2823	65	-0,651744	-0,669091	sim
$780 \leq v < 810$	690	36	0,196542	0,198374	não
$810 \leq v < 1020$	4728	196	-0,044674	-0,047357	não
$1020 \leq v < 1050$	690	17	-0,582402	-0,586225	sim
$1050 \leq v < 1080$	619	20	-0,303399	-0,305416	não
$1080 \leq v < 1110$	659	14	-0,734063	-0,738377	sim
$1110 \leq v < 1140$	650	25	-0,122746	-0,123676	não
$1140 \leq v < 1320$	4408	139	-0,328531	-0,344564	sim
$1320 \leq v < 1380$	1516	38	-0,564729	-0,573003	sim
$1380 \leq v < 1410$	835	29	-0,228658	-0,230783	não
$1410 \leq v < 1440$	732	21	-0,42602	-0,429197	não
$1440 \leq v < 2070$	15265	529	-0,23093	-0,277675	sim
$2070 \leq v < 2100$	637	38	0,338455	0,341567	sim
$2100 \leq v < 2130$	681	31	0,0531448	0,0536022	não
$2130 \leq v < 2220$	2080	117	0,276075	0,284292	sim
$2220 \leq v < 2250$	667	27	-0,0695014	-0,070055	não
$2250 \leq v < 2280$	655	32	0,127319	0,12841	não
$2280 \leq v < 2340$	1370	81	0,328957	0,335504	sim
$2340 \leq v < 65550$	24001	1258	0,201396	0,297293	sim
Total	81771	3538			

Tabela 47 - Transição “outros para vegetação arbórea”: variável declividade.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	15748	227	-1,65668	-2,01874	sim
$2 \leq v < 3$	4142	277	-0,0673818	-0,0735894	não
$3 \leq v < 9$	8478	680	0,128788	0,158583	sim
$9 \leq v < 17$	8698	823	0,309825	0,391576	sim
$17 \leq v < 18$	1078	126	0,546035	0,562112	sim
$18 \leq v < 19$	1047	99	0,309083	0,317033	sim
$19 \leq v < 20$	1045	123	0,553957	0,56981	sim
$20 \leq v < 65536$	7471	1042	0,748641	0,958232	sim
Total	47707	3397			

c) Transição “outros para área construída”

Tabela 48 - Transição “outros para área construída”: variável altitude.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 10$	39404	350	0,312862	0,763849	sim
$10 \leq v < 20$	17548	9	-2,54733	-2,78229	sim
$20 \leq v < 30$	8516	1	-4,02196	-4,13471	sim
$30 \leq v < 40$	5369	115	1,20582	1,38931	sim
$40 \leq v < 50$	2797	21	0,143385	0,149048	não
$50 \leq v < 60$	1948	6	-0,752085	-0,765392	não
$60 \leq v < 70$	1066	6	-0,146635	-0,148499	não
$70 \leq v < 80$	757	2	-0,905941	-0,911706	não
$80 \leq v < 90$	525	3	-0,131426	-0,132249	não
$90 \leq v < 100$	323	1	-0,746922	-0,749085	não
$100 \leq v < 110$	245	1	-0,469539	-0,470706	não
$110 \leq v < 120$	159	0	~ 0	-0,00202562	não
$120 \leq v < 280$	432	0	~ 0	-0,00551317	não
Total	79089	515			

Tabela 49 - Transição “outros para área construída”: variável distância de drenagens.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 90$	8517	10	-1,74317	-1,8412	sim
$90 \leq v < 120$	2740	7	-0,964355	-0,986974	sim
$120 \leq v < 180$	6058	25	-0,483234	-0,515446	sim
$180 \leq v < 300$	9957	57	-0,154349	-0,175338	não
$300 \leq v < 330$	2181	20	0,320296	0,331309	não
$330 \leq v < 420$	6287	79	0,638744	0,720813	sim
$420 \leq v < 600$	10616	100	0,347407	0,415737	sim
$600 \leq v < 810$	10267	65	-0,0530616	-0,0609642	não
$810 \leq v < 840$	1310	0	~ 0	-0,0172375	não
$840 \leq v < 870$	1314	2	-1,48327	-1,49664	sim
$870 \leq v < 900$	1431	4	-0,874145	-0,885139	não
$900 \leq v < 930$	1229	5	-0,497551	-0,503892	não
$930 \leq v < 960$	1309	10	0,136125	0,138642	não
$960 \leq v < 990$	1088	2	-1,29422	-1,3046	não
$990 \leq v < 1020$	1212	6	-0,300415	-0,304554	não
$1020 \leq v < 1200$	5394	41	0,13105	0,141618	não
$1200 \leq v < 1260$	1254	7	-0,179696	-0,182412	não
$1260 \leq v < 1290$	545	0	~ 0	-0,00713527	não

Tabela 49 - Transição "outros para área construída": variável distância de drenagens (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1290 \leq v < 1380$	1468	3	-1,18811	-1,20156	sim
$1380 \leq v < 1410$	399	6	0,82084	0,827419	sim
$1410 \leq v < 1470$	690	16	1,26225	1,28498	sim
$1470 \leq v < 65550$	1903	50	1,39035	1,46801	sim
Total	77169	515			

Tabela 50 - Transição "outros para área construída": variável distância de estradas principais.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 60$	1293	18	0,782559	0,802421	sim
$60 \leq v < 150$	2969	30	0,458261	0,481214	sim
$150 \leq v < 180$	1136	15	0,728962	0,744683	sim
$180 \leq v < 240$	1655	34	1,17845	1,22721	sim
$240 \leq v < 780$	13248	206	0,894834	1,23658	sim
$780 \leq v < 810$	659	5	0,169219	0,170775	não
$810 \leq v < 840$	640	4	-0,0260158	-0,0262263	não
$840 \leq v < 900$	1354	5	-0,554793	-0,562236	não
$900 \leq v < 930$	622	0	~ 0	-0,00798238	não
$930 \leq v < 990$	1282	2	-1,41858	-1,43111	sim
$990 \leq v < 1020$	652	7	0,519548	0,525228	não
$1020 \leq v < 1050$	685	12	1,01605	1,03146	sim
$1050 \leq v < 1200$	3278	43	0,722304	0,769068	sim
$1200 \leq v < 1230$	647	2	-0,733215	-0,737525	não
$1230 \leq v < 1260$	696	1	-1,50102	-1,50796	não
$1260 \leq v < 1290$	766	0	~ 0	-0,00983951	não
$1290 \leq v < 1500$	5287	5	-1,91973	-1,97969	sim
$1500 \leq v < 1530$	717	6	0,267975	0,270798	não
$1530 \leq v < 1560$	786	8	0,465603	0,471577	não
$1560 \leq v < 1590$	677	9	0,735825	0,745232	sim
$1590 \leq v < 1920$	7875	79	0,45097	0,516116	sim
$1920 \leq v < 1950$	656	0	~ 0	-0,00842056	não
$1950 \leq v < 3300$	23980	13	-2,4766	-2,81631	sim
$3300 \leq v < 3330$	386	1	-0,910355	-0,913306	não
$3330 \leq v < 3360$	352	0	~ 0	-0,00450953	não
$3360 \leq v < 65550$	6440	0	~ 0	-0,0859046	não
Total	78738	505			

Tabela 51 - Transição "outros para área construída": variável distância do AMRJ.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 720$	10788	11	-1,93388	-2,05789	sim
$720 \leq v < 750$	412	5	0,554023	0,557787	não
$750 \leq v < 780$	496	3	-0,148499	-0,149347	não
$780 \leq v < 810$	441	0	~ 0	-0,00548635	não
$810 \leq v < 1680$	13789	21	-1,53218	-1,68189	sim
$1680 \leq v < 1710$	468	7	0,76591	0,772553	sim
$1710 \leq v < 4560$	33208	368	0,462079	0,979361	sim
$4560 \leq v < 4590$	226	0	~ 0	-0,00280784	não
$4590 \leq v < 9060$	18522	19	-1,92785	-2,15468	sim
$9060 \leq v < 9090$	53	7	3,07067	3,08247	sim
$9090 \leq v < 9570$	1733	66	1,72427	1,82666	sim
$9570 \leq v < 10200$	1035	62	2,20015	2,30337	sim
Total	81171	569			

Tabela 52 - Transição "outros para área construída": variável litologia.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$1 \leq v < 2$	3335	33	0,116519	0,126777	não
$2 \leq v < 3$	38097	300	-0,113908	-0,668717	sim
$3 \leq v < 255$	7	0	~ 0	-0,000161736	não
$255 \leq v < 256$	2230	52	0,987376	1,08085	sim
Total	43669	385			

Tabela 53 - Transição "outros para área construída": variável declividade.

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
$0 \leq v < 2$	15614	93	0,329343	0,565431	sim
$2 \leq v < 3$	3901	36	0,770494	0,888075	sim
$3 \leq v < 4$	2131	7	-0,268454	-0,280238	não
$4 \leq v < 5$	1416	3	-0,708166	-0,724743	não
$5 \leq v < 6$	1165	4	-0,22405	-0,229437	não
$6 \leq v < 7$	1115	3	-0,468611	-0,478196	não
$7 \leq v < 8$	969	1	-1,42854	-1,44538	não
$8 \leq v < 10$	1945	3	-1,02617	-1,05515	não
$10 \leq v < 11$	966	4	-0,0360279	-0,0368129	não
$11 \leq v < 12$	1025	2	-0,790655	-0,803487	não
$12 \leq v < 14$	2012	5	-0,548266	-0,568092	não
$14 \leq v < 15$	999	2	-0,764911	-0,777143	não

Tabela 53 - Transição "outros para área construída": variável declividade (cont.).

Intervalos	Transições Possíveis	Transições Executadas	W+	Contraste	Significante
15 ≤ v < 16	973	4	-0,043278	-0,0442245	não
16 ≤ v < 17	997	2	-0,762903	-0,775088	não
17 ≤ v < 18	953	1	-1,41187	-1,42834	não
18 ≤ v < 19	951	3	-0,30905	-0,314845	não
19 ≤ v < 21	1815	3	-0,956882	-0,982804	não
21 ≤ v < 22	796	3	-0,130519	-0,132746	não
22 ≤ v < 23	751	1	-1,17338	-1,1852	não
23 ≤ v < 24	644	2	-0,324749	-0,328817	não
24 ≤ v < 25	619	0	~ 0	-0,0140683	não
25 ≤ v < 26	488	1	-0,741572	-0,747374	não
26 ≤ v < 27	423	0	~ 0	-0,00959224	não
27 ≤ v < 28	379	2	0,207594	0,209576	não
28 ≤ v < 29	295	1	-0,236888	-0,238295	não
29 ≤ v < 30	255	0	~ 0	-0,00577153	não
30 ≤ v < 31	205	1	0,128572	0,129207	não
31 ≤ v < 32	171	0	~ 0	-0,00386664	não
32 ≤ v < 34	249	1	-0,0667365	-0,0670998	não
34 ≤ v < 35	78	1	1,10289	1,1064	não
35 ≤ v < 36	78	0	~ 0	-0,00176188	não
36 ≤ v < 37	37	1	1,86317	1,86761	não
37 ≤ v < 38	30	0	~ 0	-0,000677277	não
38 ≤ v < 43	37	1	1,86317	1,86761	não
43 ≤ v < 65536	19	0	~ 0	-0,000428889	não
Total	44501	191			