

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO DE
MUDANÇAS NA COBERTURA FLORESTAL DAS
SERRAS DO SUDESTE E CAMPANHA MERIDIONAL
DO RIO GRANDE DO SUL**

TESE DE DOUTORADO

Ana Caroline Paim Benedetti

Santa Maria, RS, Brasil

2010

**MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO DE
MUDANÇAS NA COBERTURA FLORESTAL DAS SERRAS
DO SUDESTE E CAMPANHA MERIDIONAL
DO RIO GRANDE DO SUL**

por

Ana Caroline Paim Benedetti

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira

Santa Maria, RS, Brasil

2010

B462m Benedetti, Ana Caroline Paim, 1980-
Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul / Ana Caroline Paim Benedetti. - 2010.
166 f. ; il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, 2010.
“Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira”

1. Engenharia florestal 2. Sensoriamento remoto 3. NDVI 4. Modelagem dinâmica 5. Matriz de transição I. Pereira, Rudiney Soares II. Título

CDU: 528.8

Ficha catalográfica elaborada por
Patrícia da Rosa Corrêa – CRB 10/1652
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2010

É permitida a reprodução de partes ou do todo deste trabalho com a devida citação da fonte.

Endereço eletrônico: anabenedetti@unipampa.edu.br

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS NA
COBERTURA FLORESTAL DAS SERRAS DO SUDESTE E
CAMPANHA MERIDIONAL DO RIO GRANDE DO SUL**

elaborada por
Ana Caroline Paim Benedetti

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutora em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Rudiney Soares Pereira, Dr.
(Presidente/Orientador)

Cláudia Maria de Almeida, Dr^a. (INPE)

Elvis Rabuske Hendges, Dr. (UNIOESTE)

Claire Delfini Viana Cardoso, Dr^a. (UFSM)

José Américo de Mello Filho, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 02 de Junho de 2010

AGRADECIMENTOS

Obrigada a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse concretizar esse sonho!

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, especialmente aos professores Dr. Paulo Renato Schneider, Dr. César Augusto Guimarães Finger e Dr. Mauro Valdir Schumacher, coordenadores do Programa, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado; devo igualmente agradecer pela concessão da bolsa de estudos da CAPES.

Muito obrigada ao professor Dr. Rudiney Soares Pereira, orientador desse trabalho, por todo o aprendizado e, sobretudo, pela confiança e constante incentivo.

Sinceros agradecimentos são destinados a professora Dr^a. Cláudia Maria de Almeida, pesquisadora do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, não somente pelo imenso conhecimento transmitido, mas por toda atenção a mim dispensada. Seus ensinamentos nortearam esse trabalho e tornaram possível sua realização.

Sou grata ao professor Dr. Solon Jonas Longhi, pela participação no comitê de orientação, bem como pelas correções efetuadas no exame de qualificação.

Especiais agradecimentos são destinados aos professores membros da banca examinadora à sua valiosa participação, Dr^a. Claire Delfini Viana Cardoso, Dr. Enio Giotto, Dr. José Américo de Mello Filho e Dr. Elvis Rabuske Hendges.

Muito obrigada!

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS NA COBERTURA FLORESTAL DAS SERRAS DO SUDESTE E CAMPANHA MERIDIONAL DO RIO GRANDE DO SUL

AUTORA: ANA CAROLINE PAIM BENEDETTI
ORIENTADOR: PROF. Dr. RUDINEY SOARES PEREIRA
Local e Data da Defesa: Santa Maria, 02 de Junho de 2010.

Processos significativos de conversão nos padrões de uso da terra têm sido verificados no Rio Grande do Sul devido à incorporação de áreas florestais nos últimos anos. Nessa concepção, este trabalho tem como objetivo estabelecer diretrizes metodológicas para analisar a dinâmica desses padrões nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional, microrregiões pertencentes à Metade Sul do Estado. Mapas temáticos dos anos de 2000, 2004 e 2008 foram elaborados a partir do produto NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) do sensor MODIS, de forma a relacionar este índice às classes de uso da terra. Os mapas elaborados serviram para alimentar um modelo dinâmico, o qual possibilitou quantificar, através de matrizes Markovianas, as taxas de conversão entre as classes. A simulação foi concebida através do método probabilístico pesos de evidência, o qual permitiu inferir sobre a contribuição das variáveis influentes nas mudanças na cobertura florestal das duas microrregiões. Os principais resultados constituem simulações baseadas no paradigma de Autômatos Celulares (AC), nas quais são quantificadas e distribuídas espacialmente as áreas florestais até o ano de 2016. Os prognósticos modelados, com base nas variáveis analisadas, indicam que a floresta deve ocupar espaços anteriormente destinados às atividades agrícolas e ao pastoreio extensivo do gado, tanto pela introdução de espécies exóticas como pelo estabelecimento da regeneração. A cobertura florestal na microrregião Serras do Sudeste passará de 8,6% para 16,2% ao fim do período. Na Campanha Meridional o acréscimo será de 11,1% para 12,5%, sendo observadas, nas duas microrregiões, tendências à estabilidade dessa expansão.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; NDVI; modelagem dinâmica; matriz de transição.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

DYNAMIC MODELING FOR CHANGES SIMULATIONS IN THE FOREST COVER AT THE SERRAS DO SUDESTE AND CAMPANHA MERIDIONAL FROM RIO GRANDE DO SUL STATE

AUTHOR: Ana Caroline Paim Benedetti
ADVISER: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira
Defense Place and Date: Santa Maria, June⁰², 2010.

Significant processes of conversion in the land use patterns have been verified in the State of Rio Grande do Sul due to the incorporation of forest areas during the last years. In this conception, this work aims to establish the methodological guidelines to analyze the dynamics of these patterns in the *Serras do Sudeste* and *Campanha Meridional*, which are micro regions located in the southern part of the State. Thematic maps from the years 2000, 2004 and 2008 were elaborated through the product NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) from the MODIS sensor in a way to relate this index to the land use classes. The maps that we elaborated were used to drive a dynamic model, which made it possible to quantify, through the use of Markov model, the conversion rates between classes. The simulation designed using the probabilistic method weighs-of-evidence, and allowed to assess the role of influential variables in the forest cover changes of both micro regions. The main results are simulations based on the paradigm of Cellular Automata (CA), in which the forest areas are quantified and spatially distributed until the year 2016. The predictions modeled, based on the considered variables, indicate that the forest will expand over spaces previously allocated to agricultural activities and to extensive grazing of cattle, either with the introduction of exotic species or by means of regeneration. The forest cover in *Serras do Sudeste* will increase from 8,6% to 16,2% by the end of the period. In *Campanha Meridional* the increase will be from 11,1% to 12,5% and, in both micro regions, the expansion will tend to stabilize within the observed period.

Key-words: Remote Sensing; NDVI; dynamic modeling; transition matrix.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Localização das microrregiões de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.....	54
FIGURA 2 – Interface do <i>site</i> do INPE para pesquisa de imagens do satélite Landsat.....	58
FIGURA 3 – Articulação das cenas Landsat sobre as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	59
FIGURA 4 – Aplicação da técnica de contraste linear nas composições coloridas MODIS, Blue (B), NIR (G), MIR (R) e Blue (B), MIR (G), NIR (R).....	60
FIGURA 5 – “ <i>USGS Global Visualization Viewer</i> ”: interface para busca e <i>download</i> de imagens do sensor MODIS.....	62
FIGURA 6 – Interface gráfica do aplicativo MRT 4.0 utilizado na conversão de imagens MODIS para o formato <i>GeoTiff</i>	63
FIGURA 7 – Unidade amostral espacializada sobre as imagens Landsat e MODIS e sua posterior sobreposição às imagens grade (MDT) para leitura do valor médio do NDVI.....	66
FIGURA 8 – Mapas de variáveis estáticas na microrregião Serras do Sudeste.....	72
FIGURA 9 – Mapas de variáveis estáticas na microrregião Campanha Meridional.....	73
FIGURA 10 – Sequência de procedimentos operacionais realizados para conversão de arquivos no aplicativo IDRISI 32.....	76
FIGURA 11 – Sequência de procedimentos operacionais realizados no processo de modelagem na plataforma Dinamica EGO.....	83
FIGURA 12 – Obtenção dos “mapas diferença 1 e 2” para aplicação do	

método de similaridade <i>fuzzy</i>	85
FIGURA 13 – Plotagem da comparação pareada entre as classes, obtida pelo teste <i>Tukey</i> HSD, para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	94
FIGURA 14 – Mapeamento temático obtido pelo processo de classificação digital, microrregião Serras do Sudeste em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.....	99
FIGURA 15 – Mapeamento temático obtido pelo processo de classificação digital, microrregião Campanha Meridional em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.....	100
FIGURA 16 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2000.....	106
FIGURA 17 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2004.....	107
FIGURA 18 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2008.....	108
FIGURA 19 – Mapa índice de vegetação na microrregião Campanha Meridional em 2000.....	109
FIGURA 20 – Mapa índice de vegetação na microrregião Campanha Meridional em 2004.....	110
FIGURA 21 – Mapa índice de vegetação na microrregião Campanha Meridional em 2008.....	111
FIGURA 22 – Resultado da simulação anual entre 2008 e 2016 para a microrregião Serras do Sudeste.....	124
FIGURA 23 – Resultado da simulação anual entre 2008 e 2016 para a microrregião Campanha Meridional.....	125
Figura 24 – Evolução da cobertura florestal na microrregião Serras do Sudeste.....	128
Figura 25 – Evolução da cobertura florestal na microrregião Campanha Meridional.....	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Qualidade da classificação digital segundo intervalos do coeficiente <i>Kappa</i>	31
TABELA 2 – Faixas espectrais e espaciais do sensor <i>Tematic Mapper</i>	36
TABELA 3 – Microrregiões integrantes da área de estudo e seus municípios....	53
TABELA 4 – Dados socioeconômicos das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	55
TABELA 5 – Relação das cenas Landsat abrangentes da área de estudo e as respectivas datas analisadas.....	58
TABELA 6 – Descrição das classes de declividade do solo.....	70
TABELA 7 – Parâmetros calculados para o conjunto amostral dos valores médios do NDVI na microrregião Serras do Sudeste.....	87
TABELA 8 – Parâmetros calculados para o conjunto amostral dos valores médios do NDVI na microrregião Campanha Meridional.....	87
TABELA 9 – Teste F aplicado aos valores médios do NDVI, considerando um mesmo período de análise, nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	89
TABELA 10 – Teste de Shapiro-Wilks. aplicado aos valores NDVI referentes a 2000, 2004 e 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	90
TABELA 11 – ANOVA aplicada aos valores médios do NDVI em 2000, 2004 e 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	91
TABELA 12 – Comparação pareada entre as classes, através do teste de <i>Tukey HSD</i> nos diferentes períodos, para a microrregião Serras do Sudeste.....	92
TABELA 13 – Comparação pareada entre as classes, através do teste de	

<i>Tukey</i> HSD nos diferentes períodos, para a microrregião Campanha Meridional	93
TABELA 14 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2000 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	95
TABELA 15 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2004 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	96
TABELA 16 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2008 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	96
TABELA 17 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2000 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	97
TABELA 18 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2004 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	97
TABELA 19 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2008 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice <i>Kappa</i>	98
TABELA 20 – Quantificação das classes temáticas por meio da classificação digital na microrregião Serras do Sudeste em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.....	101
TABELA 21 – Quantificação das classes temáticas por meio da classificação digital na microrregião Campanha Meridional em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.....	101
TABELA 22 – Índices calculados para o fatiamento das imagens MOD13Q1 produto NDVI, microrregião Serras do Sudeste em 2000, 2004 e 2008.....	102
TABELA 23 – Índices calculados para o fatiamento das imagens MOD13Q1 produto NDVI, microrregião Campanha Meridional em 2000, 2004 e 2008.....	103
TABELA 24 – Área total das classes de vegetação na microrregião Serras do Sudeste.....	104
TABELA 25 – Área total das classes de vegetação na microrregião Campanha Meridional.....	104
TABELA 26 – “ <i>Single step transition matrix</i> ” para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	112
TABELA 27 – Processos de conversão entre as classes de vegetação nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional, nos dois períodos de análise, em valores de área (ha).....	113
TABELA 28 – Descrição das variáveis dinâmicas e estáticas de maior influência nas transições da classe floresta na microrregião Serras do	

Sudeste.....	116
TABELA 29 – Descrição das variáveis dinâmicas e estáticas de maior influência nas transições da classe floresta na microrregião Campanha Meridional.....	117
TABELA 30 – Valores dos índices Cramer (<i>V</i>) e Incerteza de Informação Conjunta (<i>U</i>) calculados para os modelos de simulação.....	118
TABELA 31 – Parâmetros calibrados nos algoritmos <i>expander</i> e <i>patcher</i> nos modelos de simulação para os períodos 2000 a 2004 e 2004 a 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.....	120
TABELA 32 – Índices de similaridade <i>fuzzy</i> calculados através das funções de decaimento constante e decaimento exponencial para distintos tamanhos de janela.....	122
TABELA 33 – Área total das classes de vegetação simuladas na modelagem da microrregião Serras do Sudeste.....	126
TABELA 34 – Área total das classes de vegetação simuladas na modelagem da microrregião Campanha Meridional.....	126
TABELA 35 – Processos de conversão entre as classes de vegetação nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional entre 2008 e 2016, em valores de área (ha).....	127

LISTA DE EQUAÇÕES E EXPRESSÕES

1

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ij} - \sum_{i=1}^r X_i + X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_i + X_{+i}} \dots\dots\dots 30$$

2 $NDVI = (\rho IVP - \rho V) / (\rho IVP + \rho V) \dots\dots\dots 33$

3 $EVI = G. (IVP - Vermelho) / (L + IVP + C1. Vermelho - C2. Azul) \dots\dots\dots 34$

4 $P\{F \cap E_1\} = N \{F \cap E_1\} / N\{T\} \dots\dots\dots 44$

5 $P\{E_1 \cap \bar{F}\} = N \{E_1 \cap \bar{F}\} / N\{T\} \dots\dots\dots 44$

6 $P\{F | E_1\} = N \{F \cap E_1\} / N\{E_1\} \dots\dots\dots 44$

7 $P\{E_1 | F\} = P\{E_1 \cap F\} / P\{F\} \dots\dots\dots 44$

8 $P\{E_1 | \bar{F}\} = P\{\bar{F} \cap E_1\} / P\{\bar{F}\} \dots\dots\dots 45$

9 $N\{E_1\} = N\{E_1 \cap F\} + N\{E_1 \cap \bar{F}\} \dots\dots\dots 45$

10 $P\{F | E_1\} = P\{F\} * P\{E_1 | F\} / P\{E_1 | F\} * P\{F\} + P\{E_1 | \bar{F}\} * P\{\bar{F}\} \dots\dots\dots 45$

11 $P\{E_1 \cap E_2\} = P\{E_1 \cap E_2 | F\} * P\{F\} + P\{E_1 \cap E_2 | \bar{F}\} * P\{\bar{F}\} \dots\dots\dots 45$

12 $O\{F | E_1\} = O\{F\} * P\{E_1 | F\} / P\{E_1 | \bar{F}\} \dots\dots\dots 46$

13 $\log it \{F | E_1\} = \log it \{F\} + W^r \dots\dots\dots 46$

14 $\log it \{F | \bar{E}_1\} = \log it \{F\} + W \dots\dots\dots 46$

15 $\prod (t+1) = P^n . \prod (t) \dots\dots\dots 48$

16
$$P = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{vmatrix} \dots\dots\dots 48$$

17 $P_{ij} = a_{ij} / \sum_j a_{ij} \dots\dots\dots 49$

18 $P = H. V. H^{-1} \dots\dots\dots 50$

19 $V = \sqrt{X^2 / T}$ 78

20 $U(A, B) = 2 [H(A) + H(B) - H(A, B) / H(A) + H(B)]$ 78

21 $V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ M \\ \mu_{nbhood\ C} \end{bmatrix}$ 84

22 $\mu_{nbhood\ i} = \mu_{crisp\ i,1} * m_1, \mu_{crisp\ i,2} * m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,n} * m_n$ **Max** 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA -	<i>Analysis of Variance</i>
AC -	Autômato Celular
ASC -	<i>American Standard Code for Information</i>
APP -	Área de Preservação Permanente
BGR -	<i>Blue, Green, Red</i>
CSR -	Centro de Sensoriamento Remoto
DPI -	Divisão de Processamento de Imagens
DSG -	Diretoria de Serviço Geográfico do Exército
DXF -	<i>Drawing Interchange Format</i>
EMBRAPA -	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
EOS -	<i>Earth Observing System</i>
EVI -	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
GPS -	<i>Global Position System</i>
HDF -	<i>Hierarchical Data Format</i>
HSD -	<i>Honestly Significant Differences</i>
IBGE -	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH -	Índice de Desenvolvimento Humano

INPE -	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IV -	Infravermelho
LEGAL -	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrica
<i>MaxVer</i> -	<i>Máxima Verossimilhança</i>
MIR -	<i>Mid Infrared</i>
MNT -	Modelo Numérico do Terreno
MODIS -	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MRT -	<i>Modis Reprojection Tool</i>
NASA -	<i>National Aerospace and Space Administration</i>
NDVI -	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR -	<i>Near Infrared</i>
PIXEL -	<i>Picture element</i>
RDC -	<i>Idrisi Raster Documentation File</i>
RST -	<i>Idrisi Raster Format</i>
SIG -	Sistema de Informação Geográfica
SPRING -	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SRTM -	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIFF -	<i>Tagged Image File Format</i>
TM -	<i>Thematic Mapper</i>
UFSM -	Universidade Federal de Santa Maria
USGS -	<i>United States Geological Survey</i>
WGS -	<i>World Geodetic System 1984</i>
µm -	Micrômetro

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Serras do Sudeste.....	143
APÊNDICE B – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Serras do Sudeste.....	145
APÊNDICE C – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Serras do Sudeste.....	147
APÊNDICE D – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Campanha Meridional.....	149
APÊNDICE E – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Campanha Meridional.....	151
APÊNDICE F – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Campanha Meridional.....	153
APÊNDICE G – Pesos de Evidência (<i>W</i>) para cada faixa de distância das variáveis em relação às transições na microrregião Serras do Sudeste entre 2000 e 2004.....	155
APÊNDICE H – Pesos de Evidência (<i>W</i>) para cada faixa de distância das variáveis em relação às transições na microrregião Serras do Sudeste entre 2004 e 2008.....	158
APÊNDICE I – Pesos de Evidência (<i>W</i>) para cada faixa de distância das variáveis em relação às transições na microrregião Campanha Meridional entre 2000 e 2004.....	161
APÊNDICE J – Pesos de Evidência (<i>W</i>) para cada faixa de distância das variáveis em relação às transições na microrregião Campanha Meridional entre 2004 e 2008.....	164

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Mudanças na região da Metade Sul	20
1.2 Contextualização da modelagem dinâmica	21
1.3 Análise temporal da vegetação	22
1.4 Objetivo geral	23
1.5 Objetivos específicos	24
1.6 Hipóteses da pesquisa	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 Sensoriamento Remoto	26
2.1.1 Sistemas sensores imageadores.....	31
2.1.1.1 O Sensor MODIS e o produto MOD13.....	32
2.1.1.2 O Satélite Landsat.....	34
2.2 Geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação	36
2.3 Dinâmica de uso e cobertura da terra	39
2.4 Modelagem dinâmica espacial	41
2.4.1 Modelos estocásticos de simulação.....	43
2.4.1.1 Método dos pesos de evidência.....	43

2.4.1.2 Modelagem através de Autômatos Celulares.....	47
2.4.1.3 Métodos de prognose usando cadeias de Markov.....	48
2.4.2 Modelos computacionais.....	51
2.4.2.1 O simulador Dinamica EGO.....	51
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1 Características das áreas de estudo.....	53
3.1.1 Localização.....	53
3.1.2 Aspectos físicos e socioeconômicos.....	54
3.2 Material.....	56
3.3 Elaboração do banco de dados espaciais.....	57
3.3.1 Processamento de imagens Landsat.....	57
3.3.2 Processamento de imagens MODIS.....	61
3.4 Estratégia amostral para obtenção dos mapas de vegetação.....	64
3.5 Mapeamento temático através de classificação digital.....	67
3.6 Elaboração dos mapas índice de vegetação.....	67
3.7 Elaboração dos mapas temáticos estáticos.....	68
3.7.1 Mapas de rede hidrográfica.....	68
3.7.2 Mapas de rede viária.....	68
3.7.3 Mapas de localização de centros urbanos.....	69
3.7.4 Mapas clinográficos.....	69
3.7.5 Mapas de densidade populacional.....	70
3.7.6 Mapas de sub-bacias hidrográficas.....	71
3.8 Conversões necessárias ao processo de modelagem.....	74

3.8.1	Uso do aplicativo Idrisi.....	74
3.8.2	Uso do aplicativo ErMapper – <i>Earth Resource Mapping</i>	77
3.9	Modelagem de dados espaciais no Dinamica EGO.....	78
3.9.1	Seleção das variáveis integrantes do modelo.....	78
3.9.2	Processos de calibração e simulação.....	79
3.9.3	Teste de validação estatística dos modelos.....	84
4	RESULTADOS.....	86
4.1	Análise amostral.....	86
4.2	Mapeamento através da classificação digital de imagens.....	95
4.3	Mapas índice de vegetação.....	102
4.4	Transições nas classes de vegetação.....	112
4.5	Modelagem dinâmica e simulações anuais.....	115
4.6	Validação do modelo de simulação.....	121
4.7	Simulação de cenários futuros.....	123
5	CONCLUSÃO.....	130
5.1	Mapeamento utilizando o NDVI do sensor MODIS.....	130
5.1.1	Mudanças na cobertura florestal.....	131
5.2	Simulações através de modelagem dinâmica.....	132
5.3	Principais contribuições e aplicações desta pesquisa.....	132
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	134
7	APÊNDICE.....	142

1 INTRODUÇÃO

1.1 Mudanças na região da Metade Sul

Historicamente, a Metade Sul do estado do Rio Grande do Sul constitui-se em uma região essencialmente agrária, de economia consolidada na pecuária extensiva e na rizicultura. Ao longo do tempo, a improdutividade dos latifúndios e a inexpressiva contribuição dos setores industriais vêm, sobremaneira, contribuir com os baixos índices de desenvolvimento regional, verificados desde a década de 1930.

A pobreza econômica e cultural da Metade Sul tem suas origens na forma de distribuição territorial adotada pelo Império, na qual eram concedidas vastas extensões de terra, denominadas sesmarias, a alguns poucos proprietários conhecidos como “estancieiros”.

Dados da Fundação de Economia e Estatística - FEE (2009) mostram que desde o ano de 1939, a Metade Sul passou a ter uma participação inferior no produto interno bruto do estado. Parte deste fato decorre do conservadorismo dos proprietários de terras que não têm por hábito diversificar sua produção, seja pela inadequação do solo para alguns cultivos, seja pela distância aos centros consumidores e de pouca inter-relação comercial, concentração de renda na mão de poucos e mesmo pela insuficiência da rede viária (CORONEL et al., 2007).

A pecuária, considerada a “base” da Metade Sul, há tempos vem reduzindo sua taxa de expansão e freando o crescimento da região. Soma-se a isto, a falta de empreendedorismo e inovação tecnológica. A estrutura urbana da maioria dos municípios da Metade Sul compreende uma população de baixo poder aquisitivo, composta por descendentes de escravos e antigos peões de estância.

Mais recentemente, o tema “crescimento da Metade Sul” passou a ter demasiada importância e repercussão estadual. O anúncio de novos setores de investimentos promete dar início a um novo ciclo de desenvolvimento da região. Tais perspectivas deverão, ao longo do tempo, alterar o cenário de estagnação econômica e a realidade das comunidades locais.

No ano de 2003, foi lançado pelo governo do Rio Grande do Sul o Programa Estadual de Florestamento que, dentre outros objetivos, previa fomentar o florestamento comercial em municípios da Metade Sul através da implantação de 40 mil hectares de maciços florestais, podendo gerar, até 2014, uma receita bruta de R\$ 200 milhões aos produtores (SANTOS et al., 2007).

Desde esse período, a Metade Sul tem sido foco de investimentos por parte de empresas multinacionais do setor de celulose e papel, as quais poderão tornar a região um polo para o suprimento de demandas do setor papelero.

No entanto, a recessão internacional, em 2009, fez com que as empresas papelarias recuassem seus investimentos, após a aquisição de uma grande quantidade de terras e de serem apontadas como solução para os problemas econômicos da região. Atualmente, muito embora várias das “predições” com relação à consolidação de uma cadeia de base produtiva no setor florestal não tenham se confirmado, as ações efetivadas nos processos de implantação florestal já acarretam mudanças na paisagem regional.

A expansão da silvicultura envolve a situação ambiental de uma grande área do território gaúcho, o Bioma Pampa. Neste enfoque, uma das questões reside em: como avaliar a dinâmica dessa paisagem? E, ainda, como monitorar processos de transição entre o bioma original campo e a cobertura florestal?

Certamente, a busca pelo desenvolvimento da Metade Sul passa pelo entendimento de quais fatores são determinantes no processo de mudança do ecossistema original, e esforços científicos integrados nesse sentido, poderão servir como subsídio ao planejamento regional.

1.2 Contextualização da modelagem dinâmica

Até recentemente, as pesquisas científicas realizadas têm sido voltadas para construir um modelo espacial adequado para representar a realidade geográfica, de modo que a maioria dos sistemas computacionais trata apenas de uma reprodução estática e invariável da mesma, que desconsidera fenômenos inerentemente dinâmicos como, por exemplo, mudanças na paisagem.

Nesse sentido, o propósito da modelagem dinâmica é simular mudanças espaço-temporais nos atributos do meio ambiente e atreladas a um território geográfico. Sua concepção permite o entendimento dos mecanismos influentes que determinam a função de mudança e, assim, avaliar como um sistema evolui diante de um conjunto de circunstâncias definidas pelo modelador.

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

Quando utilizada para o estudo de fenômenos de transição de classes da paisagem, a modelagem dinâmica torna-se uma ferramenta útil ao planejamento, uma vez que possibilita a simulação de cenários futuros.

No Brasil, pesquisas de maior relevância no meio científico tratam da modelagem de fenômenos de desmatamento, principalmente na região Amazônica, destacando-se trabalhos de Soares-Filho et al. (2002) e Aguiar (2006). Sobre a dinâmica de áreas urbanas, destaca-se o trabalho de Almeida (2003). Hendges (2007) procurou desenvolver um modelo adequado para representar a dinâmica florestal no estado do Rio Grande do Sul, projetando a expansão de áreas florestais para o ano de 2020.

1.3 Análise temporal da vegetação

A modelagem dinâmica pode ser precedida de uma análise temporal realizada através de imagens de satélite, a qual permite explorar mudanças decorridas na área sob análise, em geral pelo registro de informações sob o formato de um mapa.

Neste sentido, a utilização de produtos oriundos de sensores remotos pode fornecer um inventário sistemático dos temas de interesse. Os mapas produzidos em uma série histórica servirão como subsídio para determinar o processo de mudança, de modo a alimentar o modelo dinâmico, o qual tem como premissa conhecer as taxas de transição entre as classes de uso e cobertura observadas.

Uma forma usual de se obter mapas temporais que denotam a paisagem constitui-se no emprego da técnica de classificação digital, processo no qual os temas de interesse são categorizados em classes temáticas de acordo com critérios subjetivos da visão humana. Esse processo, no entanto, torna-se oneroso e muito mais susceptível ao erro quando nele forem utilizados produtos orbitais de média e baixa resolução espacial. Como exemplo, citam-se os subprodutos do sensor MODIS que, em contrapartida à baixa resolução espacial, disponibilizam informações de alta periodicidade em uma escala global. É crescente o uso desse instrumento para mapear periodicamente atributos do meio ambiente, com notável destaque para o monitoramento da cobertura vegetal.

O sensor MODIS apresenta características que conferem capacidades superiores de descrição do comportamento espectral da vegetação (Rudorff et al., 2007) e, dentre as técnicas utilizadas para tal avaliação, o estudo dos índices de vegetação (IV) mostra-se como uma das mais eficientes. O maior benefício ao analista de imagens do sensor MODIS é a disponibilidade do IV registrado diretamente em uma imagem digital, a qual possibilita a inferência sobre as condições da vegetação.

Baseando-se nessas informações, pretende-se, na presente pesquisa, utilizar o produto MOD13Q1 do sensor MODIS, para produzir mapas temporais que descrevam o comportamento espectral da vegetação a partir do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e, com base nesse IV, discriminar as tipologias: floresta, regeneração, campo e solo sem vegetação, de modo que tais informações passem a servir como base para a execução do modelo espacial dinâmico.

1.4 Objetivo geral

Em vista do exposto, o objetivo geral dessa pesquisa constitui-se na aplicação de uma ferramenta para a modelagem da dinâmica da vegetação, com vistas à cobertura florestal, em duas microrregiões da Metade Sul do Rio Grande do Sul, no período de 2000 a 2008 e, com base nesse modelo, efetuar a projeção de cenários futuros.

1.5 Objetivos específicos

- 1) Monitorar o comportamento do índice de vegetação nas áreas de estudo, com base em uma série temporal de imagens MODIS, produto MOD13Q1 dos anos 2000, 2004 e 2008.
- 2) Definir limiares de referência, quanto ao índice de vegetação, adequados aos temas da paisagem nas áreas de estudo e, com base nesses valores, produzir mapas que caracterizem a vegetação.
- 3) Aplicar uma ferramenta de modelagem dinâmica para simular processos de transição na vegetação ocorridos durante o período de análise.
- 4) Avaliar como a presença dos fatores clinografia do terreno, rede viária, rede hidrográfica, limite de sub-bacias, densidade populacional e zonas urbanas contribuem para a dinâmica espacial-temporal da cobertura florestal nas áreas de estudo.
- 5) E, com base no modelo dinâmico, projetar simulações futuras, de intensidade e localização de mudanças na vegetação das duas microrregiões.

1.6 Hipóteses da pesquisa

A presente pesquisa é postulada pelas hipóteses descritas a seguir:

É viável a utilização de imagens de baixa resolução espacial (250 metros) para a extração de informações temáticas acerca da paisagem, permitindo então o monitoramento de sua dinâmica espaço-temporal?

Se a primeira hipótese for confirmada, é possível estabelecer uma relação direta entre os temas da paisagem e o índice de vegetação disponibilizado pelo produto MOD13Q1, podendo utilizar esse produto diretamente para obtenção de

mapas temáticos, e compensar assim sua baixa resolução espacial e favorecer-se de sua alta periodicidade e cobertura em escala global?

Sendo as duas hipóteses anteriores verdadeiras, será possível identificar variáveis que influenciem as transições estabelecidas entre a vegetação, sobretudo aquelas determinantes para a dinâmica da cobertura florestal nas microrregiões de estudo?

Caso as hipóteses anteriores sejam plausíveis, é possível então alimentar um modelo estocástico de simulação com os mapas “índice de vegetação”, para então se obter cenários que descrevam o processo de mudança bem como as taxas de transição verificadas na vegetação durante o período analisado?

E, finalmente, se todas as hipóteses anteriores forem confirmadas, será viável, através do modelo de simulação, gerar prognósticos sobre a paisagem nas áreas de estudo, espacializando informações sobre seus processos de expansão e/ou redução, se consideradas as variáveis determinantes?

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma literatura introdutória aos principais tópicos desta pesquisa. Inicialmente, serão abordadas conceituações de ciências que embasam o processo de modelagem dinâmica, tema central desta tese; fundamentos de Sensoriamento Remoto, Geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação são abordados no intuito de esclarecer conceitos que serão, posteriormente, abordados na metodologia e nos resultados do trabalho.

Em seguida, é feita uma abordagem sobre a análise dos padrões de uso e cobertura da terra e seus possíveis processos de transição, enfocando sua possibilidade de espacialização através de modelos dinâmicos.

O fechamento deste capítulo é dedicado à modelagem dinâmica espacial e as principais teorias e fundamentações que forneceram diretrizes à metodologia utilizada, incluindo o método dos pesos de evidência, os Autômatos Celulares (AC) e as cadeias de Markov. Ao fim desta seção, é apresentado o aplicativo computacional Dinamica EGO, plataforma sob a qual foram conduzidas as simulações desse estudo.

2.1 Sensoriamento Remoto

Sensoriamento Remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra e as suas mais diversas manifestações (NOVO, 1998, p. 2).

Segundo Rocha (2000), as informações oriundas dos sistemas sensores remotos constituem imagens que, por sua vez, possuem alguns parâmetros inerentes, como: resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica, resolução temporal e largura da faixa imageada, que varia de acordo com o satélite imageador.

A “resolução espacial”, conforme Silva (1995), é o menor elemento de área que um sistema sensor é capaz de distinguir. Ela determina se o alvo pode ser identificado na imagem em função de seu tamanho. Crósta (1992) afirma que esta resolução está diretamente relacionada com o tamanho do *pixel* da imagem, ou seja, uma determinada quantidade em metros quadrados de área no terreno que o sensor é capaz de imagear.

A “resolução espectral” é um conceito inerente às imagens multiespectrais, sendo definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela amplitude do intervalo de comprimento de onda de cada banda. O sistema óptico (espelhos e lentes) decide em que parte do espectro o sensor será capaz de receber a radiação refletida ou emitida pela superfície terrestre, e o tipo do detector é responsável pela sensibilidade e pelo intervalo espectral de cada banda (MOREIRA, 2005).

A “resolução radiométrica”, para Silva (1995), representa a menor diferença de brilho que um sistema sensor é capaz de perceber, determinando se o alvo pode ser visto na imagem em função de seu contraste com alvos vizinhos. Está relacionada ao número de níveis de cinza usados para expressar os dados coletados pelo sensor, considerando que, quanto maior o nível de cinza, maior a resolução radiométrica.

A “resolução temporal” é conceituada como sendo a frequência com a qual um sistema sensor é capaz de imagear um alvo, determinando o período mínimo a ser aguardado para um novo imageamento. É importante para a identificação de processos que se modificam de forma dinâmica, permitindo o monitoramento desses recursos (SILVA, 1995).

Conforme Rocha (2000), um sistema sensor imageador produz uma imagem bidimensional da radiação, emitância ou retroespalhamento destas trocas energéticas, em determinado instante e espaço físico, extraindo informações sobre uma determinada região.

Uma imagem digital, segundo Crósta (1992), constitui-se de um arranjo de elementos sob a forma de uma malha ou matriz. Cada elemento é denominado *pixel*, derivado do inglês *picture element*, e sua localização é definida por um sistema de coordenadas tipo “linha” e “coluna”, representadas por “x” e “y”. Para um mesmo sistema sensor, cada *pixel* corresponde a uma área de iguais dimensões na superfície terrestre, que possui ainda um atributo “z” de reflectância de radiação

solar nas diversas bandas eletromagnéticas. Esses valores são transformados em tons de cinza, resultando em imagem do terreno naquele comprimento de onda da banda selecionada.

Os produtos oriundos do Sensoriamento Remoto podem ser submetidos a diferentes técnicas de processamento. Para Rechiuti (1996), o processamento digital de imagens é entendido como a manipulação e análise de uma imagem por computador, de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens, sendo que a finalidade deste processamento é extrair informações de imagens e transformar essas informações de tal modo que sejam mais facilmente discerníveis.

Crósta (1992) complementa que o processamento digital de imagens trata especificamente das técnicas utilizadas para identificação, extração, condensação e realce da informação de interesse para determinados fins, a partir de uma enorme quantidade de dados que usualmente compõem essas imagens. O resultado desse processo é a produção de outras imagens contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir das imagens brutas.

As técnicas de processamento de imagens podem ser classificadas em três grupos (NOVO, 1998): técnicas de pré-processamento, técnicas de realce e técnicas de classificação.

O pré-processamento das imagens trata do conjunto de técnicas que permitem a transformação de dados digitais em dados corrigidos radiométrica e geometricamente. As operações de correção radiométrica, conforme Richards (1993), visam minimizar diferenças entre os níveis de cinza registrados por uma matriz de detectores, originados pela instrumentalização utilizada e pela influência da atmosfera.

As técnicas de realce de uma imagem têm por objetivo melhorar a visualização da cena. Novo (1998) cita as técnicas mais utilizadas:

- manipulação de contraste: usada para facilitar a discriminação visual de características da cena com baixo contraste;

- filtragem espacial: são transformações na imagem *pixel a pixel*, que não dependem apenas do nível de cinza de um determinado *pixel* da imagem original, mas também do valor dos níveis de cinza dos *pixels* vizinhos;

- rotação de imagens: é realizada através de transformações lineares e não-lineares dos *pixels* de uma cena, visando melhorar a visualização dos objetos de interesse.

Já a classificação digital de imagens consiste no estabelecimento de um processo de decisão, no qual um grupo de *pixels* é definido como pertencente a uma determinada classe. Neste sentido, os sistemas computacionais auxiliam o usuário na interpretação das imagens orbitais (VENTURIERI e SANTOS, 1998).

Para Crósta (1992), classificar imagens de Sensoriamento Remoto é associar a cada *pixel* uma informação qualitativa (atributo), na qual os valores de nível de cinza que cada *pixel* possui podem ser associados à reflectância dos materiais que compõem o terreno, estando cada *pixel* ou conjunto de *pixels* associados a uma classe ou tema.

Na classificação digital de imagens, os valores dos níveis de cinza são categorizados ou rotulados, utilizando-se algoritmos estatísticos de programas computacionais para o reconhecimento de padrões espectrais. Conforme o algoritmo utilizado neste procedimento, a classificação é dita supervisionada ou não-supervisionada, envolvendo duas fases distintas: o treinamento e a fase de classificação propriamente dita (MOREIRA, 2005).

Na classificação supervisionada, utilizada nesta pesquisa, foi necessária a tomada de amostras de treinamento para as classes temáticas avaliadas. Richards (1993) indica um mínimo de $(N+1)$ amostras para cada classe, sendo o N o número de bandas espectrais que integram a imagem utilizada no processo de classificação.

Nessa etapa, utilizou-se o algoritmo de máxima verossimilhança “*MaxVer*”, que associa sempre os *pixels* à determinada categoria por meio do grau de associação booleano (0 ou 1).

Para Venturieri e Santos (1998), este algoritmo baseia-se no cálculo da distância estatística entre cada *pixel* e a média dos níveis de cinza da classe previamente definida a partir das amostras de treinamento, cuja seleção deve refletir na variabilidade de cada categoria pertencente à área estudada, não existindo um número ideal destas amostras para representar a classe de interesse.

Os resultados da classificação digital podem, por sua vez, ser avaliados. Um dos parâmetros mais utilizados e eficientes para quantificar a exatidão de levantamentos, segundo Congalton e Green (1999), é o coeficiente *Kappa* (K), obtido mediante a adoção de uma referência para comparação dos mapeamentos produzidos, e neste caso, a análise da exatidão é obtida através de matrizes de confusão ou matrizes de erro, que apresentam a distribuição de percentagem de *pixels* classificados correta e erroneamente, sendo posteriormente calculado o índice

Kappa de concordância. A confiabilidade da matriz de erros depende da amostragem, registro e conhecimento, sendo importante que a amostra de treinamento seja homogênea e representativa da classe de interesse.

Congalton (1992) destaca que o índice *Kappa* é um coeficiente baseado na diferença entre a concordância observada (diagonal principal da matriz de confusão com a concordância entre a classificação e os dados de referência) e a chance de concordância entre os dados de referência de uma classificação aleatória (produto entre os totais marginais da matriz). A equação que fornece o valor de *Kappa* é apresentada a seguir:

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ij} - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r x_{i+} x_{+i}} \quad . (1)$$

Em que:

r = número de classes;

x_{ij} = número de elementos classificados corretamente;

x_{i+} = total de elementos classificados para uma categoria *i*;

x_{+i} = total de elementos de referência amostrados para uma categoria *i*;

N = número total de amostras.

O valor do coeficiente de *Kappa* varia entre -1 e 1; o valor 1 representa uma completa concordância entre a imagem classificada com o dado de referência.

O valor *K* pode ser comparado com os valores e conceitos contidos na Tabela 1, desenvolvidos por Landis e Koch (1977), podendo, dessa forma, avaliar o mapa temático obtido a partir da classificação da imagem.

Tabela 1 – Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente *Kappa*.

Valor do <i>Kappa</i>	Qualidade da Classificação
< 0,00	Péssima
0,0 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

2.1.1 Sistemas sensores imageadores

Os sistemas sensores são dispositivos capazes de captar, registrar e processar a radiação de determinada faixa do espectro eletromagnético, gerando um produto (imagem) em uma forma adequada para ser interpretada pelo usuário.

Segundo Eastman (1998), podem ser divididos em dois grandes grupos: passivos ou ativos. Os sensores passivos medem níveis de fonte de energia existentes, enquanto os sensores ativos têm sua própria fonte de energia como, por exemplo, um *flash* fotográfico.

A maior parte do Sensoriamento Remoto se utiliza de sensores passivos, para os quais o Sol é a principal fonte de energia. Porém, nem todos os sensores passivos usam a energia do Sol, alguns sensores no infravermelho termal e sensores de micro-ondas passivos medem emissões de energia terrestre.

Para Lazzaroto (2005), as informações resultantes da interação da energia eletromagnética com objetos da superfície terrestre, a ser captada pelos sensores, pode ser refletida, transmitida, absorvida ou emitida pela superfície e, a partir destas interações, são derivadas informações importantes sobre características físicas (dimensão, forma, temperatura, cor) e químicas (composição) dos alvos em estudo.

2.1.1.1 O sensor MODIS e o produto MOD13

As descrições a seguir foram retiradas de Rudorff et al. (2007), obra na qual são abordadas inúmeras aplicações do sensor MODIS. Segundo os autores, atribui-se a este instrumento a geração de produtos de alta qualidade, já com correções atmosférica, radiométrica e geométrica.

O MODIS constitui-se no principal sensor a bordo das plataformas Terra e *Aqua*, projetado para fornecer observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera, nas regiões compreendidas entre 0,4 e 14,4 μm do espectro eletromagnético, com resolução espacial variando de 250 m a 1 km e subdivisão em 36 bandas espectrais, destinadas a diferentes aplicações, subdivididas em 44 produtos (para maiores informações ver RUDORFF et al., 2007, p. 15).

Para os autores, a varredura de 55° para cada lado, na órbita de 705 km de altura, resulta em uma faixa imageada de 2.330 km (ortogonal) por 10 km (direção de voo no nadir), com cobertura global a cada dois dias.

Os produtos gerados por esse sensor seguem determinada hierarquia que vai desde o “nível 0” (produtos sem tratamento e não disponíveis aos usuários), “nível 1A” (produtos que contêm 36 bandas como dados de entrada para geolocalização, calibração e processamento); “nível 1B” (produtos que contêm os dados de calibração e geolocalização para as 36 bandas geradas pelo nível 1A); “nível 2” (produtos derivados de radiâncias calibradas de produtos prévios MODIS); “nível 3” (produtos espacialmente reamostrados); até o “nível 4” (produtos gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para estimar variáveis geofísicas). Seus produtos estão disponíveis gratuitamente via internet, CD-ROM ou DVD, através dos centros de pesquisa da NASA (RUDORFF et al., 2007).

O produto MOD13 contém os índices de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e EVI (*Enhanced Vegetation Index*) produzidos em escala global nas resoluções 1 km, 500 m e 250 m em composições de imagens ou mosaicos de 16 dias. Os índices produzidos pelo MOD13 permitem realizar estudos, tanto ao longo do tempo quanto no espaço, sobre as condições da cobertura vegetal, descrevendo e reconstituindo dados de variações fenológicas e discriminando variações interanuais na vegetação nas escalas global e regional (RUDORFF et al., 2007).

As imagens índices de vegetação (IV) são derivadas a partir das respostas espectrais oriundas da superfície terrestre, e a reflectância da cobertura vegetal depende das propriedades estruturais e ópticas da vegetação e do solo. A reflectância na faixa do vermelho (0,55 – 0,70 μm) reduz com o aumento do índice de área foliar, enquanto que na faixa do infravermelho próximo (0,70-1,30 μm) é verificado que a reflectância é diretamente proporcional ao aumento do índice de área foliar (MATSUMOTO E BITTENCOURT, 2001).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos da vegetação responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, enquanto que o EVI é mais sensível à variação na estrutura do dossel, incluindo o LAI (*Leaf Area Index*), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (HUETE et al., 2002).

O NDVI é uma relação entre as reflectâncias (ρ) das bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V), que visam eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica em imagens multitemporais. Constitui o índice mais utilizado nos diversos estudos sobre a vegetação que envolvem o uso dos dados de Sensoriamento Remoto (MOREIRA, 2005).

É expresso pela razão entre a diferença da medida da reflectância (ρ) nos canais do infravermelho próximo (0,70 – 1,30 μm) e do vermelho (0,55 – 0,70 μm) e a soma desses canais (ROUSE et al., 1974), ou seja:

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V). \quad (2)$$

Em que:

ρ_{IVP} corresponde à resposta espectral do *pixel* na banda do infravermelho próximo, e ρ_V corresponde à resposta espectral do *pixel* na banda do vermelho visível.

O valor deste IV pode variar em uma escala entre -1 a +1 (quanto mais próximo de 1, maior a densidade de cobertura vegetal), sendo que o 0 representa o valor aproximado para ausência de vegetação. O NDVI tem se mostrado bastante útil na estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, e o seu ponto forte é o conceito de razão que reduz várias formas de ruídos multiplicativos, como diferenças de iluminação, sombra de nuvens, atenuação atmosférica, certas variações

topográficas (SILVA, 2004). Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação que o torna insensível ao aumento da densidade do dossel. Os valores NDVI estabilizam-se em um patamar independente do aumento da densidade do dossel (ROSENDO, 2005).

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de propiciar o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas. O EVI pode ser calculado através da seguinte equação (JUSTICE et al., 1998):

$$EVI = G. (IVP\text{-}Vermelho)/(L+IVP+C1.Vermelho-C2.Azul). \quad (3)$$

Em que:

L é o fator de ajuste para o solo; $C1$ e $C2$ são os coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis na atmosfera e G é o fator de ganho. Segundo Huete et al. (1997) e Justice et al. (1998), os valores dos coeficientes utilizados pelo algoritmo do EVI são: $L=1$, $C1=6$, $C2=7,5$ e $G=2,5$.

2.1.1.2 O satélite Landsat

O Satélite Landsat teve origem na análise de dados multiespectrais adquiridos durante a missão Apolo 9 (plataforma espacial tripulada) e das observações fotográficas obtidas a partir dos voos orbitais Mercury e Gemini (SILVA, 1995). Segundo Rocha (2000), foi colocado em órbita, em 1972, com o nome de *Earth Resources Technological Satellite-1* (ERTS-1), obtendo um desempenho tão significativo que foi transformado na série Landsat a partir de 1975.

Os modelos 1, 2 e 3 do Landsat eram equipados com um sensor *Return Beam Vidicom* (RBV), constituído de três câmaras espectrais, com uma resolução geométrica de aproximadamente 80 metros, e com um sensor MSS (*Multispectral*

Scanner), com quatro câmeras espectrais (duas no visível e duas no infravermelho próximo) e uma resolução também de 80 metros.

Em 1984, logo após o lançamento do Landsat-4, o mesmo foi desativado devido ao mau funcionamento, e a NASA lançou o Landsat-5, com um novo sistema sensor a bordo, o *Thematic Mapper (TM)*, que incorporou uma tecnologia mais avançada que o MSS e passou a registrar dados em sete canais ou sete bandas espectrais (três no visível, um no infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal), com resolução espacial de 30 metros (exceto para o canal termal, que é 120 metros). Em 1994, houve uma tentativa de lançamento do Landsat-6, mas a plataforma não chegou a entrar em órbita, tendo caído no mar (SILVA, 1995).

Em continuação ao programa, o governo norte-americano lançou o satélite Landsat-7, em 15 de abril de 1999, que entrou em órbita com o sensor denominado *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)* (NASA, 2008). Uma imagem Landsat-7 ETM+ é composta por 8 bandas espectrais que podem ser combinadas em inúmeras possibilidades de composições coloridas e opções de processamento.

Entre as principais melhorias técnicas, se comparado ao satélite Landsat-5, destacam-se a adição de uma banda espectral pancromática com resolução de 15 metros, melhorias nas características geométricas e radiométricas e o aumento da resolução espacial da banda termal para 60 metros. Esses avanços tecnológicos habilitam o Landsat-7 para a geração de imagens de satélites com aplicações diretas até a escala 1:25.000 (NASA, 2008).

Os satélites Landsat têm o mesmo período de revisita (16 dias), a mesma grade de referência (WRS-2) e a mesma área imageada (185 x 185 km por cena). A conservação destes parâmetros técnicos entre as séries facilita o processo de pesquisa de imagens, que pode ser feito com a mesma grade de referência e a perfeita integração no processamento das imagens do Landsat-7 com dados históricos do Landsat-5, existentes desde 1985, no caso de utilização de dados simultaneamente no mesmo projeto para a mesma área como, por exemplo, em um estudo multitemporal. Cada banda desta série de satélites representa a resposta em uma faixa espectral, como define Moreira (2005). Na Tabela 2, constam as principais características espectrais e espaciais do sensor TM (NASA, 2008).

Tabela 2 – Faixas espectrais e espaciais do sensor *Thematic Mapper*.

Bandas	Faixa espectral (μm)	Região do Espectro	Resolução espacial (metro x metro)
1	0,45 – 0,52	Azul	30
2	0,53 – 0,61	Verde	30
3	0,63 – 0,69	Vermelho	30
4	0,78 – 0,90	IV Próximo	30
5	1,55 – 1,75	IV médio	30
6	10,4 – 12,5	IV termal	120
7	2,09 – 2,35	IV médio	30

Fonte: MOREIRA (2005). Adaptado pela autora.

Com relação à combinação de bandas do satélite Landsat, o INPE (2009) recomenda as seguintes combinações para composições coloridas:

Bandas 1, 2 e 3: imagens em cor natural, com boa penetração de água, realçando as correntes, a turbidez e os sedimentos; a vegetação aparece em tonalidades esverdeadas.

Bandas 2, 3 e 4: definem melhor os limites entre solo e água, ainda mantendo algum detalhe em águas profundas e mostrando as diferenças na vegetação, que aparece em tonalidades de vermelho.

Bandas 3, 4 e 5: mostram mais claramente os limites entre solo e água, com vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidades verde-rosa.

Bandas 2, 4 e 7: mostram a vegetação em tons verdes e permitem discriminar umidade, tanto na vegetação como no solo.

2.2 Geoprocessamento e Sistemas Geográficos de Informação

Com o advento da informática na automação de processos, surgiram várias ferramentas para captura, armazenamento, processamento e apresentação de informações espaciais georreferenciadas. A ligação técnica e conceitual dessas

ferramentas levou ao desenvolvimento da tecnologia de processamento de dados geográficos, denominada Geoprocessamento, definida por Rocha (2000) como:

Uma tecnologia transdisciplinar que, através da axiomática da localização e do processamento de dados geográficos, integra várias disciplinas, equipamentos, programas, processos, entidades, dados, metodologias e pessoas para coleta, tratamento, análise e apresentação de informações associadas a mapas digitais georreferenciados (ROCHA, 2000, p.210).

O objetivo principal desta ciência, segundo Câmara e Medeiros (1998), é fornecer ferramentas computacionais para que diferentes analistas determinem as evoluções espacial e temporal de um fenômeno geográfico, bem como as inter-relações entre diferentes fenômenos. Dizem ainda que o uso do Geoprocessamento em projetos ambientais requer o emprego intensivo de técnicas de integração de dados. Para serem feitos de forma detalhista, os projetos requerem que o especialista combine ferramentas de análise espacial, processamento de imagens, geoestatística e modelagem numérica do terreno.

O Geoprocessamento é constituído pelo conjunto de quatro categorias técnicas relacionadas ao tratamento da informação espacial (LAZARATTO, 2002):

1) Técnicas para coleta de informação espacial (Cartografia, Sensoriamento Remoto, Sistema de Posicionamento Global (GPS), Topografia, Fotogrametria, Levantamento de dados alfanuméricos).

2) Técnicas de armazenamento de informação espacial (Bancos de Dados – orientados a objetos, relacional, hierárquico).

3) Técnicas para tratamento e análise da informação espacial, como modelagem de dados, geoestatística, aritmética lógica, funções topológicas, redes.

4) Técnicas para o uso integrado de informação espacial, como os SIG, *Land Information System* (LIS), *Automated Mapping/Facility Management* (AM/FM) e *Computer Aided Drafting Design* (CADD).

A definição de SIG, para Maguire et al. (1991), também engloba aspectos já abordados na definição de Geoprocessamento, porém, agregam-se ainda os aspectos institucional, de recursos humanos (*peopleware*) e, principalmente, a aplicação específica a que se destina.

Aranoff (1989) conceitua Sistemas de Informações Geográficas como sendo um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar

e manipular dados georreferenciados e, ainda, como um sistema de captação, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados georreferenciados.

Para o autor, um SIG deve possuir os seguintes componentes: a) interface com o usuário; b) entrada e manipulação de dados; c) funções de processamento, visualização, armazenamento e recuperação de dados.

Outro conceito difundido na literatura é dado por Burrough e McDonnell (1998), que dizem ser os Sistemas de Informações Geográficas um conjunto de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre um mundo real para um objetivo específico.

Para Câmara e Medeiros (1998), as principais características de um SIG são a capacidade de inserir e integrar, em uma única base de dados, informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados censitários, de cadastro urbano e rural, imagens de satélite, redes e modelos numéricos do terreno e também oferecer mecanismos para combinar as várias informações, através de algoritmos de manipulação e análise, bem como para consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados georreferenciados.

Silva (2003) subdivide os dados de um SIG em dois grandes grupos: 1) dados gráficos, espaciais ou geográficos; 2) dados não-gráficos, alfanuméricos ou descritivos. Os dados gráficos descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição), podendo ser representados de duas formas distintas: vetorial (*vector*) e matricial (*raster*). No modelo vetorial, as entidades do mundo real são representadas graficamente sob a forma de pontos, linhas ou polígonos. Já no formato matricial, tem-se uma matriz de células, às quais estão associados valores, que permitem reconhecer o objeto sob a forma de uma imagem digital; cada uma das células, denominada *pixel*, é endereçada por meio de suas coordenadas (linha, colunas) e encontra-se associada a valores inteiros e limitados, geralmente entre 0 e 255. Os dados não-gráficos, alfanuméricos ou descritivos, descrevem os atributos das características de algum dado espacial, estando ligados aos elementos espaciais através de identificadores comuns, chamados de geocódigos.

2.3 Dinâmica de uso e cobertura da terra

A análise da dinâmica da paisagem, com seus processos de transição, requer o uso de diversos recursos cartográficos, tais como mapeamentos, fotografias aéreas digitais e analógicas, imagens de satélite e demais levantamentos que caracterizem o uso/ocupação e a cobertura da terra no intervalo de tempo proposto.

Se considerada uma série temporal distinta, definida por duas imagens, *tempo 1* – inicial e *tempo 2* – final, tomadas de uma mesma paisagem, pode-se observar, através de tais recursos, o estado de cada elemento (classe de uso/cobertura) de interesse.

Já é sabido que, para avaliar mudanças na cobertura da terra, são necessárias observações diretas através de sistemas de monitoramento, que possibilitem a identificação de taxas e padrões.

Sabins (1999) diz que o uso de técnicas de Sensoriamento Remoto no mapeamento de uma determinada área propicia a realização de um inventário sistemático da superfície da terra, possibilitando a categorização dos diferentes usos em classes. Quando este mapeamento for associado aos SIG, possibilita o conhecimento da evolução da dinâmica espacial do uso da terra, com a produção de séries temporais de mapas para uma mesma área.

Para Soares-Filho (2005), a obtenção de mapas temporais da cobertura da terra e, conseqüentemente, de um mapa multitemporal das mudanças permite identificar as tendências da dinâmica da paisagem na área de estudo, incluindo suas taxas líquidas e brutas para cada período analisado, como também a evolução dessas taxas através do tempo.

É oportuna a definição dos termos “uso” da terra e “cobertura” da terra, uma vez que estes caracterizam o estado geral de uma paisagem, seja qual for a classe de interesse observada pelo pesquisador.

Para Turner et al. (1994), *cobertura da terra* compreende a caracterização do estado físico, químico e biológico da superfície terrestre, por exemplo, floresta, gramíneas, água, ou área construída; já *uso da terra* se refere aos propósitos humanos associados àquela cobertura, por exemplo, pecuária, recreação, conservação, área residencial. Briassoulis (2000) diz que uma única classe de cobertura pode suportar múltiplos usos (extração madeireira, preservação de espécies, recreação em áreas de floresta), ao mesmo tempo em que um único

sistema de uso pode incluir diversas coberturas (certos sistemas agropecuários combinam áreas cultivadas, pastagens melhoradas, áreas de reserva e áreas construídas); mudanças no uso do solo normalmente acarretam mudanças na cobertura do solo, mas podem ocorrer modificações na cobertura sem que isto signifique alterações em seu uso. Quanto à modificação no uso e cobertura do solo, ocorrem, em termos de *cobertura*, mudanças estruturais e funcionais causadas por fenômenos naturais e ações humanas, como alterações na biomassa e na produtividade da vegetação. Em termos de *uso*, intensificação ou mudanças nos seus atributos, por exemplo, em sistemas agrícolas como a ocorrência de intensificação, extensificação, marginalização e abandono (ALVES et al., 2002).

Como os modelos, objetos deste estudo, estão intimamente ligados aos padrões de uso da terra que definem o arranjo dos diferentes elementos da paisagem, a definição de terra de Stewart (apud ALMEIDA, 2003), no contexto científico, é de que esse termo é usado em um sentido compreensivo, integrador, referindo-se a um vasto espectro de atributos de recursos naturais em um perfil que vai desde a atmosfera até alguns metros abaixo da superfície da terra. Seus principais atributos são: clima, relevo, solo, vegetação, fauna e recursos hídricos.

O termo “uso da terra” está ligado à ação antrópica, ou seja, à destinação que o homem dá à terra e, nesse sentido, Skole (1994) afirma que o uso do solo é o emprego humano de certa cobertura da terra, o meio pelo qual a atividade humana se apropria dos resultados da produção primária líquida, conforme determinado por um complexo de fatores socioeconômicos.

O termo “mudança de uso da terra”, para Briassoulis (2000), significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo. Segundo a autora, a mudança de uso pode envolver sua conversão para outro, ou ainda a modificação de certo tipo de uso no seu padrão de desenvolvimento do mesmo uso e, assim, modificar-se em um sistema formador da paisagem.

Tais análises acerca de mudanças de uso e cobertura são fundamentais ao desenvolvimento de cenários que visem à sustentabilidade local e regional. Pedrosa (2004) propõe o uso de modelos espaciais dinâmicos para tal, e esses, por sua vez, descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo.

2.4 Modelagem dinâmica espacial

O avanço das geotecnologias enfatizou a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática, uma vez que sua principal forma de abstração constitui-se no mapa. No entanto, a maioria dos fenômenos, tais como planejamento urbano, escoamento da água da chuva, dispersão de sementes, evolução do uso da terra, são inerentemente dinâmicos, e as representações estáticas comumente utilizadas em SIG não os capturam adequadamente no espaço. Dessa forma, para Pedrosa e Câmara (2007), uma grande preocupação da ciência da informação espacial constitui-se no desenvolvimento de técnicas e abstrações eficazes na representação adequada de fenômenos espaço-temporais dinâmicos.

Mais recentemente, o estudo de mudanças na paisagem vem sendo desenvolvido através da aplicação de técnicas de modelagem e da criação de modelos. Soares-Filho (1998) refere-se ao termo modelagem como:

...processo de pesquisa que leva à geração do modelo (representação) de um sistema. Este processo se desenvolve, então, através da definição de um conjunto de hipóteses ou previsões, que poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Dependendo da concordância entre o observado e o resultado gerado, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado de alguma maneira, para novamente ser testado.

(Soares-Filho, 1998. p.55)

Durante a modelagem, existe a necessidade, por parte do modelador, de especificar a estrutura e o comportamento (Bertalanffy, 1951) do modelo idealizado, portanto, um mesmo modelo pode ser representado de várias maneiras.

Segundo Wegener et al., (1986) apud Almeida (2003) um modelo se denomina dinâmico, se ele possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo, e se seus estados dependem de estados anteriores.

A modelagem dinâmica procura superar as limitações atuais da tecnologia de Geoprocessamento, fortemente baseada em uma visão estática e bidimensional do mundo, sendo que o objetivo dos modelos dinâmicos em um ambiente SIG é

realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo (BURROUGH e McDONNEL, 1998).

Um modelo espacial dinâmico, segundo os autores, compreende uma representação matemática de um processo do mundo real, em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações nas forçantes de tal processo.

Pedrosa (2004) propõe o uso de modelos espaciais dinâmicos que, por sua vez, descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, sendo capazes de simular cenários de sustentabilidade local e regional.

Goodchild et al. (1993) classifica os modelos dinâmicos em três grandes grupos: modelo de escala, modelo conceitual e modelo matemático.

O modelo de escala é, em geral, um modelo que reproduz uma redução simplória do sistema original; o modelo conceitual descreve o processo através da construção de fluxogramas que mostram o sistema principal e os processos e inter-relações entre os subsistemas formadores deste; e o modelo matemático utiliza-se de sistemas de equações em sua construção, podendo ser classificado em dois grupos distintos: determinísticos e estocástico-probabilísticos.

No modelo determinístico, o estado de um sistema é definido por causas que se podem determinar e identificar, sendo descrito adequadamente sem recorrer-se a elementos probabilísticos, determinando os resultados, exatamente, a partir das condições iniciais. Os modelos estocástico-probabilísticos são descritos mais detalhadamente na Seção 2.4.1, a seguir, por estarem incluídos na tipologia de modelos usada neste trabalho.

Uma extensiva categorização de modelos genéricos de mudanças de uso do solo é apresentada por Briassoulis (2000). Segundo a autora, os modelos podem ser classificados, em vista de seus aspectos metodológicos e funcionais, em: estatísticos ou econométricos; modelos de interação espacial; modelos de otimização (incluindo programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multi-critérios de tomada de decisão); modelos integrados (modelos de gravidade, de simulação e de entrada-saída); modelos baseados em ciências naturais; modelos baseados em SIG e modelos baseados em cadeias de Markov.

2.4.1 Modelos estocásticos de simulação

A modelagem estocástica constitui o método de simulação usada neste estudo. É de fundamental importância descrever as regras constituintes desse processo e enfatizar que a modelagem apresenta soluções sempre associadas a uma probabilidade de ocorrência de determinado fenômeno, sendo esses elementos probabilísticos incorporados ao modelo.

2.4.1.1 Método dos pesos de evidência

Nesta pesquisa, o método dos pesos de evidência é utilizado para o cálculo das probabilidades de transição entre as classes analisadas.

O método baseia-se no teorema da probabilidade *bayesiana*, fundamentada no Teorema de Bayes que determina a possibilidade de ocorrer um evento, dada a ocorrência prévia de uma evidência. A probabilidade *bayesiana* está relacionada a dois conceitos: a probabilidade *a priori* $P(D)$ e a probabilidade *a posteriori* $P(D|B)$ (BONHAM-CARTER, 1994; ALMEIDA, 2003; ALMEIDA et al., 2007; SILVA, 2003).

As referências, a seguir, sobre o método de pesos de evidência são retiradas de Silva (2003). Dado que $N\{T\}$ representa o conjunto total de dados, e $M\{F\}$ o conjunto de dados devido a ocorrência de certo evento, então a probabilidade prévia de ocorrer tal evento é expressa por: $P\{F\} * M\{F\} / N\{T\}$, caso não sejam consideradas outras evidências.

Informações ditas “adicionais” podem ser incorporadas, de forma a atualizar o cálculo da probabilidade prévia, desde que estas sejam multiplicadas por um fator que represente a presença ou ausência da informação adicional. Se o fator de informação adicional for maior que 1, significa que ela está presente, aumentando a probabilidade prévia; se este fator, no entanto, for menor que 1, indicando a ausência da informação adicional, a probabilidade prévia será diminuída.

Como exemplo, um mapa *booleano* de evidência E_1 , que represente a presença de uma feição especial F : se verdadeira a presença da feição especial, o atributo será 1; se for ausente, será falso, portanto, zero (0).

A probabilidade de a evidência estar presente, $P\{E_1\}$ é a relação entre o conjunto do número total de evidências e o número total de dados em questão. Supondo-se que o conjunto, dada a ocorrência de uma evidência, é $N\{E_1\}$, então a probabilidade prévia de a feição estar presente é dada por $P\{E_1\} = N\{E_1\} / N\{T\}$.

A probabilidade da existência da interseção entre a feição especial F e a evidência E_1 , dada pela equação $P\{F \cap E_1\}$, corresponde à relação entre o número de interseções da feição especial F com a evidência E_1 e o número total de dados é expresso por:

$$P\{F \cap E_1\} = N\{F \cap E_1\} / N\{T\}. \quad (4)$$

A probabilidade da existência da interseção entre a evidência E_1 e a ausência da feição especial \bar{F} , representada pela equação $P\{E_1 \cap \bar{F}\}$, é a relação entre o número de interseções da evidência E_1 com a ausência da feição especial e o \bar{F} conjunto do total de dados existentes, e é representada pela seguinte equação:

$$P\{E_1 \cap \bar{F}\} = N\{E_1 \cap \bar{F}\} / N\{T\}. \quad (5)$$

A probabilidade de se encontrar uma feição especial F , dada a presença da evidência E_1 , representada pela equação $P\{F | E_1\}$, é a relação entre o número de interseções entre a feição especial F e evidência E_1 e o número de evidências é expresso pela equação:

$$P\{F | E_1\} = N\{F \cap E_1\} / N\{E_1\}. \quad (6)$$

A probabilidade condicional de uma feição especial F , dada a presença da evidência E_1 é dada por $P\{F | E_1\} = P\{F \cap E_1\} / P\{E_1\}$, definida como a relação entre a probabilidade de se ter a interseção entre a feição especial F com a evidência E_1 e a probabilidade da existência da evidência.

A probabilidade condicional de uma evidência E_1 , dada a presença de uma feição especial F , é a relação entre a probabilidade da existência de interseção entre a evidência e a feição especial e a probabilidade da existência da feição especial, e é expressa pela equação:

$$P\{E_1 | F\} = P\{E_1 \cap F\} / P\{F\}. \quad (7)$$

A probabilidade da existência da evidência E_1 , dada a ausência da feição especial \bar{F} , é a relação entre a probabilidade da existência da interseção entre a ausência da feição especial com a evidência e a probabilidade da ausência da feição especial, e é expressa por:

$$P\{E_1 | \bar{F}\} = P\{\bar{F} \cap E_1\} / P\{\bar{F}\}. \quad (8)$$

O fator de multiplicação é a relação entre a probabilidade da existência da evidência E_1 dada a presença da feição especial F , multiplicada pela probabilidade da existência da feição especial F e a probabilidade da existência da evidência E_1 , sendo $P\{F | E_1\}$.

O número total de evidências, $N\{E_1\}$, pode ser definido como o conjunto de todas as interseções entre a evidência e a feição especial F , somado ao conjunto das interseções entre a evidência E_1 e a ausência da feição especial \bar{F} , podendo ser expresso pela seguinte equação:

$$N\{E_1\} = N\{E_1 \cap F\} + N\{E_1 \cap \bar{F}\}. \quad (9)$$

A probabilidade condicional de uma feição especial F , dada a presença da evidência E_1 é a relação entre o produto da probabilidade da existência da feição especial F pela probabilidade da existência da evidência E_1 , dada a presença da feição especial F , dividido pela soma do produto da probabilidade da existência da feição especial F e a probabilidade da presença da evidência E_1 , dada a presença da feição especial F com o produto da probabilidade da existência da evidência E_1 , dada a ausência da feição especial \bar{F} e a probabilidade da ausência da feição especial \bar{F} , expressa pela equação:

$$P\{F | E_1\} = P\{F\} * P\{E_1 | F\} / P\{E_1 | F\} * P\{F\} + P\{E_1 | \bar{F}\} * P\{\bar{F}\}. \quad (10)$$

Se considerado um segundo mapa *booleano* de evidência E_2 , a probabilidade de se encontrar uma feição especial F , dada a presença de dois mapas *booleanos* de evidência, é a relação entre a probabilidade da interseção entre as evidências E_1 e E_2 e a probabilidade da existência das interseções entre as evidências E_1 e E_2 , representada por:

$$P\{E_1 \cap E_2\} = P\{E_1 \cap E_2 | F\} * P\{F\} + P\{E_1 \cap E_2 | \bar{F}\} * P\{\bar{F}\}. \quad (11)$$

No caso de a independência entre as evidências ser mantida, outros mapas *booleanos* podem ser incluídos.

O modelo de probabilidade *bayesiana* pode ser expresso na forma de uma razão entre a probabilidade de um evento ocorrer sobre a probabilidade de não ocorrer, razão esta chamada de “chance”, dada por:

$$O\{F|E_1\} = O\{F\} * P\{E_1|F\} / P\{E_1|\bar{F}\}, \quad (12)$$

em que $O\{F|E_1\}$ é chamado de chance posterior da feição especial, dada a presença de E_1 , $O\{F\}$ é a chance prévia da feição especial, e a razão $P\{E_1|F\} / P\{E_1|\bar{F}\}$ é denominada Razão de Suficiência (*RS*), portanto, a chance posterior é dada pela chance prévia multiplicada por *RS*.

Sendo o logaritmo natural de chance *logg it*, tem-se que: $logg\ it\ \{F|E_1\} = logg\ it\ \{F\} + log_e\ RS$; em que $log_e\ RS$ é conhecido como o peso positivo de evidência (W^+). Assim, a equação final é:

$$logg\ it\ \{F|E_1\} = logg\ it\ \{F\} + W^+. \quad (13)$$

Da mesma forma, para se obter a equação do tipo “chance” para a probabilidade condicional da existência da feição especial F , dada a ausência da evidência \bar{E}_1 , será usada $O\{F|\bar{E}_1\} = O\{F\} * P\{\bar{E}_1|F\} / P\{\bar{E}_1|\bar{F}\}$, sendo a razão $P\{\bar{E}_1|F\} / P\{\bar{E}_1|\bar{F}\}$ conhecida como Razão de Necessidade (*RN*); o $log_e\ RN$ é conhecido como W e representa o peso negativo de evidência, assim temos:

$$log\ it\ \{F|\bar{E}_1\} = log\ it\ \{F\} + W. \quad (14)$$

Se forem utilizados n mapas *booleanos*, a expressão em termos de chance será: $logg\ it\ \{F|E_1 \cap E_2 \cap E_3 \cap E_4 \cap \dots \cap E_n\} = logg\ it\ \{F\} + \sum_{i=1}^n W_i^+$.

Para o cálculo de $logg\ it\ \{F\}$, W^+ , W , os mapas devem ser submetidos, dois a dois, ao teste de independência condicional, para verificar se os mapas de evidência são estatisticamente independentes; nos mapas *booleanos*, a probabilidade de E_1 estar independente de E_2 é expressa por $P\{E_1|E_2\} = P\{E_1\}$ e $P\{E_2|E_1\} = P\{E_2\}$ (SILVA, 2003).

2.4.1.2 Modelagem através de Autômatos Celulares

O modelo de Autômatos Celulares (AC), concebido originalmente por von Neumann, na década de 1960 (ROCHA et al., 2001; GREMONINI e VICENTINI, 2008), objetivou a simulação de sistemas artificiais dotadas da faculdade de autorreprodução. Este modelo consiste em um reticulado bidimensional e infinito de células possuindo estados discretos equivalentes, e cada célula é conectada às suas adjacências imediatas. As regras de transição são exatamente as mesmas para cada célula, sendo que a estrutura celular é funcionalmente homogênea.

No modelo baseado em AC, o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com o arranjo específico de certa vizinhança, sendo todas as células atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo (SOARES-FILHO et al., 2002; BURROUGH e McDONNEL, 1998).

Wolfram (1986) apresenta uma descrição formal para os autômatos de von Neumann. Segundo o autor, AC são idealizações matemáticas de sistemas físicos, nos quais o espaço e o tempo são atributos discretos, e os atributos também assumem um conjunto de valores igualmente discretos; o estado de um AC é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula; um AC evolui a passos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontradas no passo de tempo anterior, e a vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências.

AC são sistemas inerentemente dinâmicos e, atualmente, seu uso na simulação espacial tem se tornado comum, sendo, algumas vezes incluídos em SIG, devido a sua facilidade de implementação e capacidade de reprodução de fenômenos espaciais, a exemplo de trabalhos de dinâmica florestal (LETT, et al., 1999), dinâmica de uso e cobertura do solo (ROCHA et al., 2001; Soares-Filho et al., 2002) e de dinâmica do solo urbano (ALMEIDA, 2003). O Dinamica, aplicativo utilizado neste estudo, constitui um exemplo de modelo de simulação espacial do tipo AC (SOARES-FILHO et al., 2002). Como regras locais, utiliza um engenho de alocação de mudanças, partindo da premissa de que uma paisagem é composta por uma variedade de arranjos de elementos (classes) sobrepostos a uma matriz, os quais constituem os dados de entrada no processo.

2.4.1.3 Métodos de prognose usando cadeias de Markov

Para Baca et al. (2007), a disponibilidade de uma série temporal de mapas de uso e cobertura do solo pode derivar em uma sequência de modelos Markovianos de primeira ordem, em que cada modelo refere-se às mudanças ocorridas entre dois instantes de tempo; considerando que as taxas de mudança mantenham-se as mesmas durante o período, uma matriz de transição estacionária para toda a série seria suficiente.

Uma matriz de transição é estocástica, formada por elementos que representam a probabilidade de mudança de uma classe de uso para outra (HAYKIN, 2000). Baca et al. (2007) reportam que a matriz de transição compreende uma representação matemática das cadeias de Markov, sendo a formalização da modelagem de sistemas.

Pedrosa e Câmara (2007) também definem as cadeias de Markov como modelos matemáticos empíricos, que servem para descrever processos estocásticos.

Este modelo pode ser expresso pela notação matricial, como denotado por Baker (1989):

$$\Pi (t+1) = P^n . \Pi (t) . \textbf{(15)}$$

Em que $\Pi (t)$ é o estado do sistema no tempo t , $\Pi (t+1)$ é o estado do sistema no instante $t+1$ e P^n são as mudanças passíveis de acontecer, que são representados em matrizes de probabilidade de transição decomposta em um passo de tempo. Essas matrizes de transição representam a probabilidade de um determinado estado i permanecer o mesmo ou mudar para o estado j , durante o instante de tempo $t \rightarrow t+1$.

A matriz de Markov simula mudanças entre classes de uso e cobertura de uma maneira multidirecional, ou seja, parcelas de uma classe podem teoricamente mudar de uma categoria mutuamente exclusiva para outra em um tempo qualquer.

Portanto, três categorias de uso geram seis possibilidades diferentes de mudança, como disposto na seguinte matriz:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} . \textbf{(16)}$$

Essa matriz estocástica, segundo Haykin (2000), possui duas características fundamentais:

1. a soma dos elementos de uma linha desta matriz é igual a um (1,0);
2. todos os elementos da matriz são iguais a zero (0,0) ou maiores que zero.

Segundo Baca et al. (2007), a matriz de transição permite:

- Analisar a dinâmica da paisagem pela forma como as classes de uso variam em dois instantes de tempo, considerando-se o primeiro deles como tempo inicial ou base desse “passo”.
- Realizar simulações (projeções) dos estados da paisagem para datas futuras.
- Avaliar a percentagem de área original das classes que foram cedidas para outras classes;
- Determinar quais classes não mudaram, isto é, apresentaram 100% na diagonal principal da matriz.

As principais vantagens das cadeias de Markov, segundo Pedrosa e Câmara (2007), são a simplicidade operacional e matemática do modelo aliadas à facilidade com que podem ser aplicadas a dados provenientes de Sensoriamento Remoto e implementadas em SIG. Outra grande vantagem é o fato de não necessitarem de grande quantidade de dados antigos para prever o futuro.

Para JRC e ESA (1994), a atratividade reside no fato de que os parâmetros do modelo Markoviano são facilmente estimados.

As probabilidades de transição podem ser estimadas $(t + n) = P^n \cdot (t)$ estatisticamente a partir de uma amostra de transições ocorridas durante algum intervalo de tempo.

Dado que a_{ij} indica transições entre pares de estados em algum intervalo de tempo, as probabilidades de transição P_{ij} são estimadas por (JRC e ESA, 1994):

$$P_{ij} = a_{ij} / \sum_j a_{ij} \quad (17)$$

Para Soares-Filho (1998), as probabilidades de transição são usualmente derivadas de amostras relativas a um certo instante de tempo. O modelo assume

que o estado futuro do sistema depende apenas do seu estado presente e das possibilidades de transição, sendo independente da trajetória que o levou àquele estado (estados em um tempo $t-1$). Este modelo assume que toda a informação do passado está concentrada no presente estado do sistema (JRC e ESA, 1994).

Para a estimativa das probabilidades de transição, segundo JRC e ESA (1994), a cadeia de Markov requer apenas o estabelecimento de um número finito de estados e que as probabilidades de transição sejam conhecidas, mas embora haja simplicidade no processo, várias limitações estão associadas ao emprego deste modelo para simular mudanças no uso do solo.

Uma limitação reside na suposição de que a probabilidade de um conjunto particular de saídas depende unicamente da distribuição atual entre os estados e das probabilidades de transição (JRC e ESA, 1994). A cadeia de Markov apresenta um número finito de estados, sua dinâmica é não-periódica e ela não possui estados absorventes, quando $P_{ij} = 1$. Neste caso, Bell e Hinojosa (1977) propõem o cálculo de um sistema hipotético em equilíbrio, através do método de componentes principais dado por:

$$P = H \cdot V \cdot H^{-1}, \quad (18)$$

em que H é matriz de autovetores, H^{-1} é a matriz transposta de autovetores e V é a matriz de autovalores.

Segundo Almeida (2003), esse método aplicado ao modelo Markoviano é útil para permitir a decomposição das probabilidades da matriz de transição, as quais são então estimadas para intervalos de tempo menores, p.ex. passos de um ano. Esse método é usado nas simulações para se gerar mapas de uso do solo anuais, ao longo de toda a série temporal avaliada nesse estudo.

Nas cadeias de Markov, as probabilidades de transição não mudam com o tempo mas, segundo Baker (1989), se as probabilidades de transições forem não-estacionárias, na realidade, elas podem ser inseridas por meio de ajustes na matriz de probabilidades de transição, sendo extremamente útil na simulação de cenários, uma vez que pode ser ajustada para incorporar efeitos como a influência de variáveis endógenas e exógenas ao modelo, superando a estacionariedade.

2.4.2 Modelos computacionais

A seguir, é feita uma breve descrição sobre o aplicativo utilizado nesta pesquisa, que constitui um modelo estocástico implementado através de algoritmos de alocação de mudanças, utilizado para a simulação da dinâmica de paisagens.

2.4.2.1 O simulador Dinamica EGO

Um dos modelos computacionais desenvolvidos para simulação de paisagens é o Dinamica – *Landscape Dynamic System*. Trata-se de um *software freeware* criado e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), pertencente ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

O aplicativo é baseado em simulação discreta e em Autômatos Celulares, utilizando como parâmetros de entrada mapas temáticos da paisagem (originados usualmente de dados de Sensoriamento Remoto), representados por uma matriz. No processo de modelagem implementado neste aplicativo, são consideradas variáveis espaciais classificadas em dinâmicas e estáticas. Também, são considerados outros parâmetros necessários para compor os dados de entrada: as taxas anuais de transição, tempo mínimo de permanência em cada estado, as percentagens alocadas para cada um dos algoritmos de transição desenvolvidos, entre outros. Como saída, o aplicativo produz mapas temáticos da paisagem e mapas de probabilidade de transição para cada passo de tempo simulado (SOARES-FILHO, 2001).

Soares-Filho (1998) descreve as variáveis estáticas e as dinâmicas. As primeiras referem-se aos mapas geralmente associados às características humanas e físicas da paisagem, e as variáveis dinâmicas referem-se, na maioria das vezes, a mapas de distância, a certos tipos de uso e cobertura da terra. Essas, por sua vez, sofrem alterações e são continuamente atualizadas, de modo a influenciar o cálculo das probabilidades de transição a cada iteração do programa, ocorrendo mudanças no estado (uso da terra) das células, alterando assim a distribuição dos usos que, novamente, são recalculados para novas etapas da simulação.

Para o autor, é necessária a inserção da matriz de transição, responsável por informar ao algoritmo de simulação o percentual de alteração de um uso para outro, sendo essa informação obtida externamente e pode ser conseguida através da tabulação cruzada entre o mapa de cobertura de uso da terra inicial com outro mapa desse mesmo tipo em um instante de tempo posterior, ou seja, a matriz de transição é que determina os tipos de alteração de uso da terra possíveis e a sua extensão.

O modelo ainda deve ser composto pelo cálculo da influência de cada faixa de valores das variáveis estáticas e dinâmicas nas probabilidades espaciais de cada transição, constituída pela inserção da matriz de pesos de evidência; através dessas informações, o *software* determina onde vai ocorrer a transição (GONÇALVES et al., 2007).

Os algoritmos *expander* e *patcher* são responsáveis pelas características espaciais das transições de uso da terra no Dinamica. A função *expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma classe de uso da terra, e a função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes, ou seja, a função *expander* executa transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado *j* e a função *patcher* realiza transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de *j* (SOARES-FILHO et al., 2007).

Soares Filho et al., (2002; 2007) destaca que ambos os algoritmos de transição do aplicativo Dinamica adotam um mecanismo estocástico de seleção, onde o algoritmo aplicado consiste no escaneamento do mapa de uso da terra inicial para identificar as células com valores de probabilidade mais elevados, e dispô-las em um vetor de dados e, seguindo este procedimento, as células desse vetor são selecionadas aleatoriamente em sentido descendente (o mecanismo estocástico de seleção interna pode ser suavizado ou realçado, dependendo do grau de aleatoriedade desejada). No final, o mapa de uso da terra é novamente escaneado para se executar as transições selecionadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características da área de estudo

3.1.1 Localização

A área de estudo é composta por duas microrregiões que integram a Metade Sul do estado do Rio Grande do Sul. Sua escolha foi feita de modo a representar parte do Bioma Pampa, e por reproduzir processos atuais de uso e ocupação do solo na Metade Sul, como reflorestamento, solo agrícola e áreas de pastagem.

Os limites microrregionais são definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esse órgão governamental disponibiliza, via internet, dados relativos às Geociências, que incluem mapeamentos temáticos, malhas digitais regionais, municipais e demais produtos cartográficos. A partir desta definição oficial, foram selecionados os dados vetoriais relativos às microrregiões, como relaciona a Tabela 3.

Tabela 3 – Microrregiões integrantes da área de estudo e seus municípios.

Código IBGE	Microrregião	Municípios integrantes
43031	Campanha Meridional	Aceguá, Bagé, Dom Pedrito, Hulha Negra e Lavras do Sul.
43032	Serras do Sudeste	Amaral Ferrador, Caçapava do Sul, Candiota, Encruzilhada do Sul, Pedras Altas, Pinheiro Machado, Piratini e Santana da Boa Vista.

Fonte: IBGE (2009).

A Figura 1 demonstra a localização das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional no estado do Rio Grande do Sul.



Figura 1 – Localização das microrregiões de estudo no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Elaborado pela autora.

3.1.2 Aspectos físicos e socioeconômicos

Segundo a definição do IBGE (2009), o Rio Grande do Sul abriga dois biomas: a Mata Atlântica e o Pampa, cuja localização é muito semelhante à divisão do estado nas Mesorregiões Norte e Sul. As microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional inserem-se no Bioma Pampa, o qual ocupa uma área de aproximadamente 700.000 km², compartilhada pelo Brasil, Argentina e Uruguai. No território brasileiro, este Bioma distribui-se na Metade Sul do estado, em cerca de 176.000 km², o equivalente a 64% do território gaúcho. Caracteriza-se pela presença da vegetação campestre distribuída de maneira uniforme sobre o relevo de planícies; a cobertura vegetal denomina-se estepe e savana estépica, que correspondem, respectivamente, aos campos do planalto e da campanha, e à vegetação mais densa, arbustiva e arbórea nas encostas e ao longo dos cursos d'água, onde também aparecem as áreas de banhados.

Uma peculiaridade é o fato de que, na década de 1960, em busca de uma alternativa para a alimentação dos rebanhos durante o inverno, ao se introduzir o capim Rhodes (*Chloris gayana*), introduziu-se acidentalmente o capim Anonni

(*Eragrostis plana*), cuja disseminação ficou absolutamente fora de controle. A estimativa, segundo EMBRAPA (2009), é que hoje o Anonni estaria ocupando uma área superior a 500 mil hectares no Rio Grande do Sul.

Conforme Moreno (1961), baseado na classificação de W. Köppen, o clima predominante é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com chuvas regulares em todos os meses do ano. Os índices anuais de precipitação pluviométrica variam de 1.300 mm a 1.500 mm; as temperaturas médias anuais no Bioma Pampa estão entre 14°C e 18°C.

Na microrregião Serras do Sudeste, com relação ao relevo, destacam-se os afloramentos rochosos nas encostas e nos altos platôs, o solo muitas vezes é quase inexistente, a frequência de arbustos de diversas espécies resulta em paisagens que variam desde os “campos sujos” até as formações arbustivas compactas (RAMBO, 1942). Na região turística das Guaritas, também chamada “escudo cristalino”, transparecem pequenos platôs da ordem de até 400 metros de altitude, remanescentes ainda em suas bordas atuais. A hidrografia da microrregião tem como curso principal o rio Camaquã. Já na microrregião Campanha Meridional, as altitudes variam entre 90 e 450 m, constituem colinas suaves, campos planos e limpos e pequenas serras. A vegetação varia entre campos com pequenas porções de mata a campos planos compostos de gramíneas e lavouras de arroz, que ocupa grande parte de sua extensão territorial. A drenagem principal é formada pelos rios Santa Maria, Camaquã e a nascente do Rio Negro, em Bagé, cujo curso corta o território uruguaio. As duas microrregiões são tipicamente agropecuárias, baseadas principalmente na criação extensiva do gado, influência da proximidade com os países platinos, em parte responsáveis pela diversidade das etnias formadoras da população. Na Tabela 4, encontram-se dados relacionados às características socioeconômicas das microrregiões.

Tabela 4 – Dados socioeconômicos das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião	Área (km ²)	População	Densidade Populacional	IDH	PIB percapta R\$
S. do Sudeste	16.522,81	121.504 hab.	7,4 hab./km ²	0,744	8.152,46
C. Meridional	14.261,06	179.093 hab.	12,6 hab./km ²	0,777	8.631,31

Fonte: IBGE (2009).

3.2 Material

Foram utilizados, nesta pesquisa, os seguintes materiais cartográficos relacionados abaixo:

- Imagens - satélite LANDSAT-5 – sensor TM, resolução espacial 30 m, dos anos 2000, 2004 e 2008.

- Imagens - satélite TERRA – sensor MODIS, produto MOD13Q1, quadrante h13v12, resolução espacial 250 metros, datadas de:

15/08/2000, 15/09/2000, 15/10/2000 e 15/11/2000;

15/08/2004, 15/09/2004, 15/10/2004 e 15/11/2004;

15/08/2008, 15/09/2008, 15/10/2008 e 15/11/2008.

- Cartas topográficas elaboradas pelo Ministério do Exército – Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) – Região Sul do Brasil, escala 1:250.000, impressão em 1979, na seguinte nomenclatura:

Bagé SH.21-2-D;

Cachoeira do Sul SH.22.Y.A;

Jaguarão SI.22-V-A;

Pedro Osório SH.22-Y-C;

São Gabriel SH.21-Z-B.

3.3 Elaboração do banco de dados espaciais

O banco de dados espaciais foi construído no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – SPRING. Este sistema, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), opera como um banco de dados geográficos para suportar um grande volume de informações, sem limitação de escala, projeção ou fuso, administrando tanto dados vetoriais quanto matriciais, de forma a integrar dados de Sensoriamento Remoto em SIG.

O primeiro passo consistiu em criar um banco de dados para o armazenamento das informações processadas. Em seguida, criou-se um projeto com o objetivo de definir a projeção cartográfica a ser utilizada (Policônica e Datum WGS 84 - *World Geodetic System 1984*) e delimitar a área de estudo através de um retângulo envolvente contendo as coordenadas geográficas de interesse.

Nesse aplicativo, os objetos componentes de um mapa têm como característica básica o fato de serem tratados como um plano de informação (PI), sendo cada um associado a uma categoria que, conseqüentemente, se refere a um modelo de dados (Temático, Numérico, Imagem, Cadastral ou Rede).

Os primeiros dados incorporados ao banco foram os limites do estado do Rio Grande do Sul e suas respectivas microrregiões, sendo posteriormente selecionadas para o trabalho somente as áreas de interesse.

Os arquivos, disponibilizados pelo IBGE, contendo os dados de “limite” das microrregiões, encontram-se no formato DXF (*Drawing Interchange Format*) e compreendem estruturas vetoriais compostas de linhas que definem polígonos. As áreas de interesse foram, então, importadas e associadas a um modelo de dados do tipo temático.

3.3.1 Processamento de imagens Landsat

As imagens do satélite Landsat compreendem cinco cenas diferentes que recobrem as áreas de estudo. A aquisição das mesmas deu-se através do *site* do INPE (<http://www.inpe.br>), que disponibiliza gratuitamente imagens atualizadas de

diversos produtos de satélites, entre eles o Landsat 5, sensor TM (*Thematic Mapper*) e o Landsat 7, sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), os quais forneceram as imagens utilizadas.

Para realizar o *download*, o usuário deve ser previamente cadastrado e, após a seleção das cenas de interesse, receberá o *link* disponibilizando os arquivos. A Figura 2 ilustra a tela de pesquisa de imagens disponíveis, e nesta interface, a busca pode ser realizada escolhendo-se o tipo de satélite e, posteriormente, o município, órbita-ponto ou coordenadas geográficas que abrangem a área de interesse.

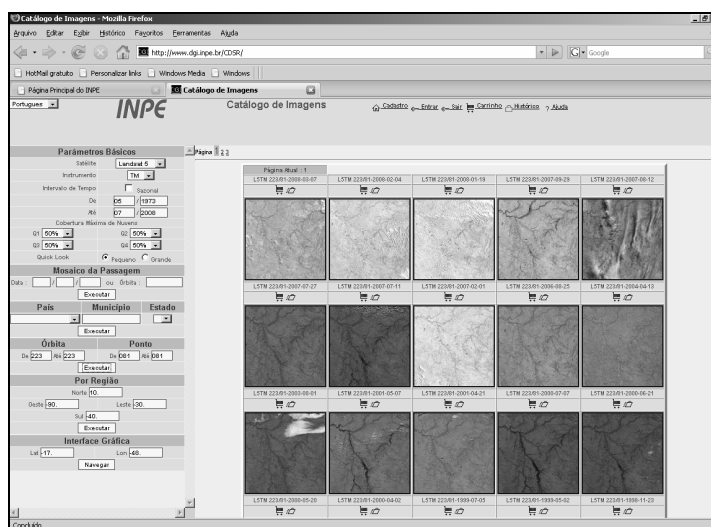


Figura 2 – Interface do *site* do INPE para pesquisa de imagens do satélite Landsat.

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2009).

A Tabela 5 relaciona as cenas utilizadas neste estudo e suas respectivas datas. A espacialização das cenas Landsat pode ser vista na Figura 3.

Tabela 5 – Relação das cenas Landsat abrangentes da área de estudo e as respectivas datas analisadas.

Cena	Órbita	Ponto	Ano 2000	Ano 2004	Ano 2008
1	222	081	27/09	04/07	03/10
2	222	082	02/09	28/08	10/10
3	223	081	20/05	06/10	18/11
4	223	082	23/07	07/11	18/11
5	224	081	27/05	25/07	08/10

Fonte: dados da autora.

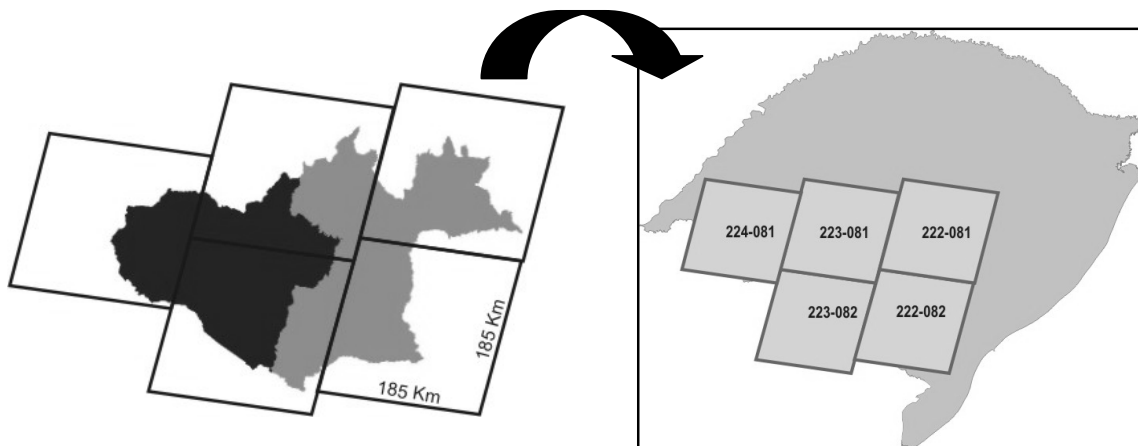


Figura 3 – Articulação das cenas Landsat sobre as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Elaborado pela autora.

As imagens desse sensor são disponibilizadas originalmente no formato *GeoTiff*, o qual possibilita importação direta no banco de dados geográficos do SPRING, no entanto, seu sistema de coordenadas não é equivalente ao sistema do sensor MODIS e aos limites vetoriais disponibilizados pelo IBGE.

Para a adequação entre esses planos de informação, e sua posterior sobreposição, foi preciso converter e retificar as imagens Landsat.

A retificação de uma imagem digital, segundo Mazza (2000), constitui-se na manipulação da geometria da imagem, ou seja, na transformação das coordenadas da imagem (“x” e “y”) em coordenadas de mapa. Neste processo, também denominado de georreferenciamento da imagem, são utilizados pontos de apoio de coordenadas conhecidas, facilmente detectados na imagem.

Nesta etapa foram, então, selecionados pontos de controle visíveis na composição de imagem falsa-cor e, respectivamente, na carta topográfica, da qual foram retirados os valores das coordenadas planas a serem convertidos para valores de latitude e longitude geográficas.

Para o processamento digital das imagens, foram elaboradas as composições falsa-cor pela associação ao canal do azul à banda 3, ao canal do verde à banda 4 e ao canal do vermelho à banda 5, formando a composição 3,4,5 e ainda ao canal do azul à banda 2, ao canal do verde à banda 3 e ao canal do vermelho à banda 4, para a composição 2,3,4. À estas composições foi aplicada a técnica de contraste linear, ilustrada na Figura 4.

A técnica de contraste linear consiste de uma transferência radiométrica em cada *pixel*, em que um histograma da imagem descreve a distribuição estatística dos níveis de cinza em termos do número de *pixels* com cada nível (INPE, 2009). É normalmente utilizada como uma etapa de pré-processamento para interpretação e classificação de imagens digitais.

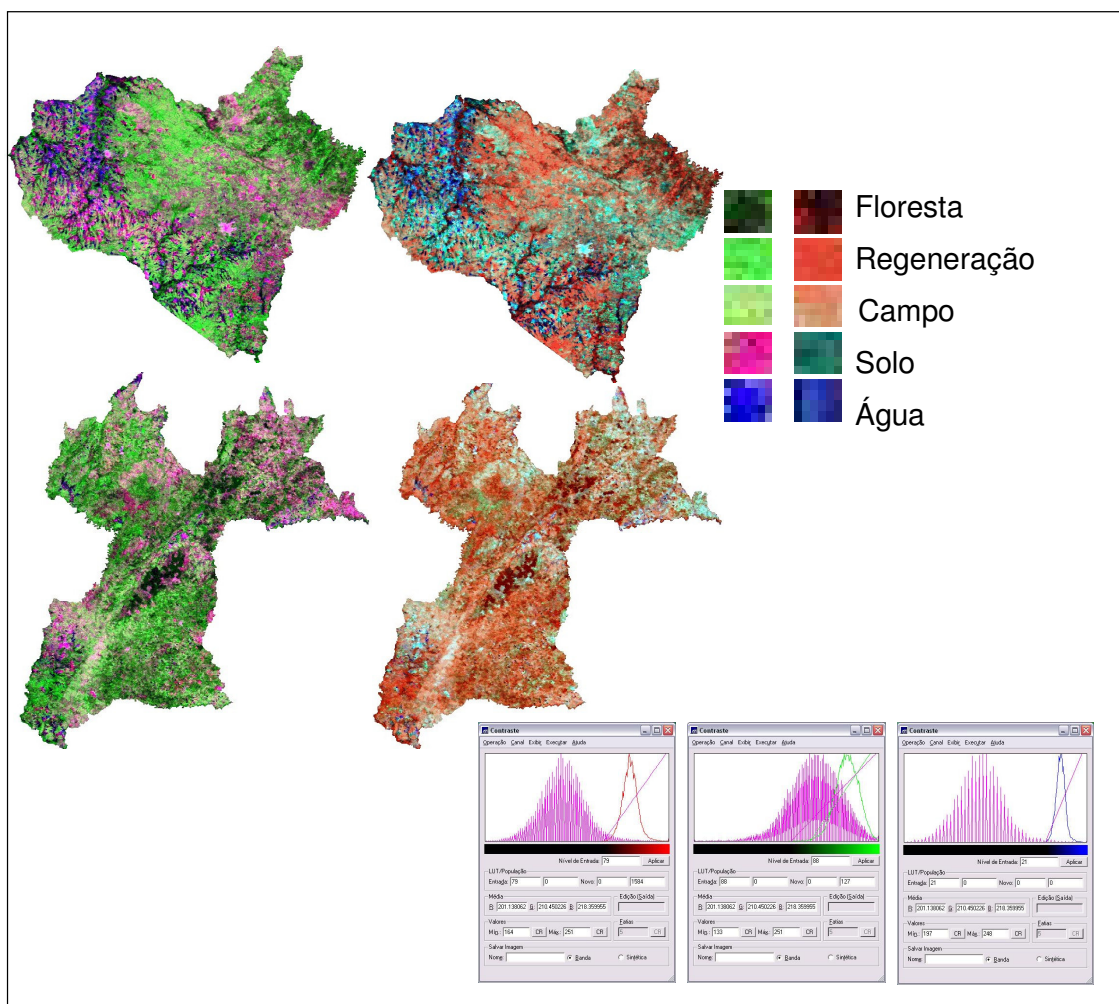


Figura 4 – Aplicação da técnica de contraste linear nas composições coloridas MODIS, Blue (B), NIR (G), MIR (R) e Blue (B), MIR (G), NIR (R).

Elaborado pela autora.

3.3.2 Processamento de imagens MODIS

Parte das imagens de satélite utilizadas é oriunda do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), instrumento a bordo do satélite TERRA, integrante do programa *Earth Observing System* (EOS), desenvolvido pela *National Aerospace and Space Administration* (NASA) para observação e coleta de dados sobre o planeta Terra.

As imagens MODIS, assim como outros produtos de satélites, são distribuídas pela NASA através de sua página oficial na internet (<https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/>), mostrada na Figura 5.

Dentre as cenas disponíveis, foram escolhidas as bandas espectrais *Blue*, *Red*, *NIR*, *MIR* e ainda as imagens índices de vegetação NDVI.

Em geral, os produtos MODIS são identificados através da convenção adotada pela NASA, conforme exemplo descrito para o nome do arquivo correspondente à cena de 15/10/2008:

(MOD13Q1.A2008289.h13v12.005.2008309103012.hdf), em que:

MOD é a identificação da plataforma MOD-Terra;

13Q1 é o número do produto (índice de vegetação, 16 dias 250 m);

A2008289 corresponde à data de aquisição ano: 2008 dia juliano 289;

h13v12 corresponde ao quadrante (*tile*) horizontal 13 vertical 12;

005 coleção ou versão de processamento 005;

2008309103012 corresponde à data de processamento: ano 2008 dia juliano 309 horário 10:30:12.

Como as áreas de interesse encontram-se contidas em uma única cena MODIS, de coordenadas centrais de 54° de longitude oeste e 35° de latitude sul, para efetuar o *download* foi necessária apenas a escolha em função do quadrante de abrangência da cena (h13v12) e das datas de interesse, conforme a resolução temporal definida (intervalo de 4 anos).

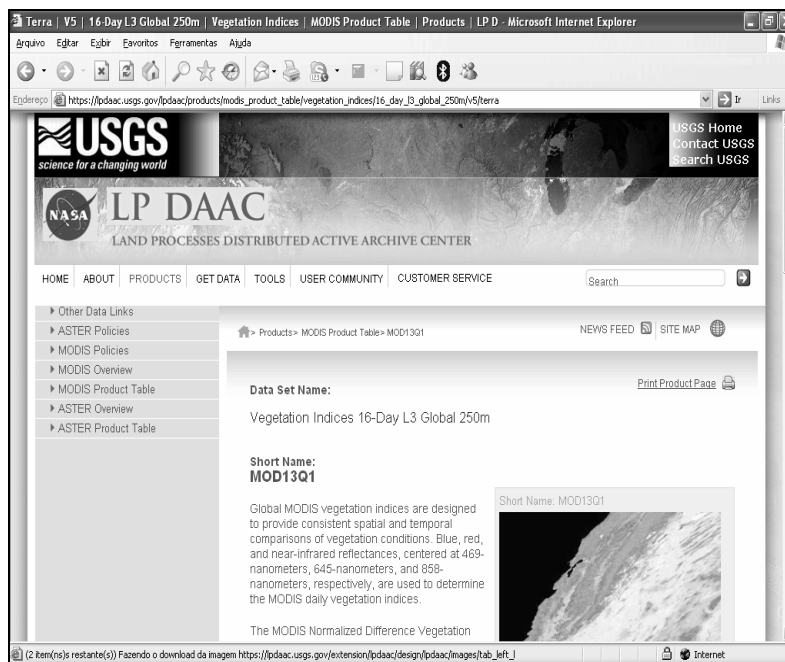


Figura 5 - “USGS Global Visualization Viewer”: interface para busca e *download* de imagens do sensor MODIS.

Fonte: NASA (2008).

As imagens MODIS são disponibilizadas no formato original **.hdf* (*Hierarchical Data Format*), que contém dados de calibração, navegação, informações da missão, características de qualidade, tipo e lugar do processamento, estação receptora, tempo de início e fim da tomada da imagem e referências geográficas das imagens.

No entanto, para o processamento dessas imagens e posterior importação no aplicativo SPRING, foi necessária a conversão para o formato **.GeoTiff*, procedimento este realizado através do aplicativo desenvolvido pela NASA, o MRT - *Modis Reprojection Tool*, versão 4.0.

No MRT (Figura 6), a conversão das imagens é procedida através da seleção do arquivo de entrada (imagem **.hdf*) e posterior denominação do arquivo de saída (imagem **.GeoTiff*). O aplicativo faz a releitura das informações do arquivo de entrada assim como de suas coordenadas de referência, sendo necessário que o usuário proceda a seleção de bandas espectrais a serem convertidas e o sistema de coordenadas a ser adotado.

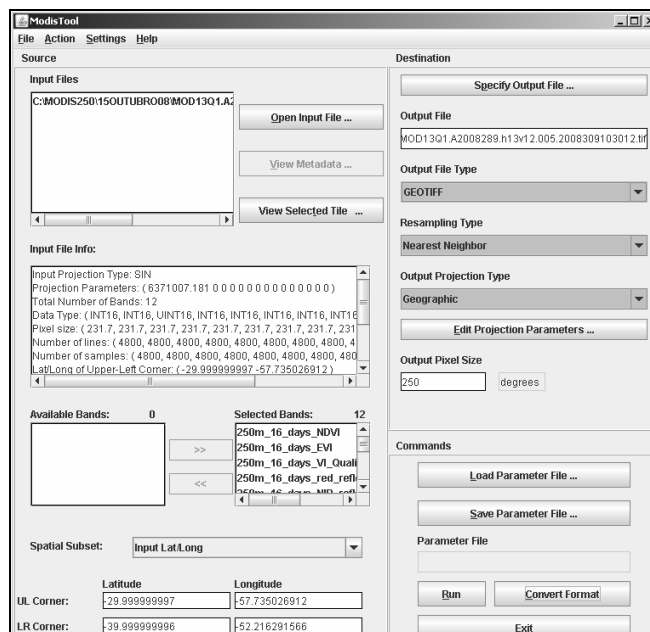


Figura 6 – Interface gráfica do aplicativo MRT 4.0 utilizado na conversão de imagens MODIS para o formato *GeoTiff*.

Fonte: NASA (2008). Adaptado pela autora.

As imagens então convertidas foram importadas no SPRING, onde foi definido o *Datum South American'69* e mantida a projeção original Sinusoidal. Ainda nesse procedimento, foi selecionada a opção de conversão para 8 bits, uma vez que a imagem original deste sensor é de 16 bits e necessita ser convertida para leitura no SPRING.

Dentre os produtos MOD13Q1, foram selecionadas as bandas espectrais *Blue* com intervalo espectral entre 0,459-0,479 μm , *Red* entre 0,620-0,670 μm , NIR, (canal do infravermelho próximo) entre 0,841-0,876 μm , e MIR (canal do infravermelho médio) entre 1,230-1,250 μm , para posterior montagem das composições coloridas, e ainda as imagens índice de vegetação NDVI.

De posse das cenas respectivas de cada data a ser analisada, efetuou-se o recorte individual com o correspondente limite vetorial para cada microrregião importado anteriormente.

Em cada imagem NDVI recortada, efetuou-se a transformação do formato matricial (*raster*) para o formato numérico, através da exportação no formato ASC II, e posterior importação para a geração de uma grade regular MNT (Modelo Numérico do Terreno), contemplando valores de 0 a 255.

Uma grade regular, segundo Druck et al. (2004), constitui uma matriz em que cada elemento está associado a um valor numérico. Essa matriz, por sua vez, está associada a uma região da superfície terrestre, a partir da coordenada inicial e de espaçamentos regulares na horizontal e vertical.

As bandas espectrais MODIS também foram usadas para a elaboração das composições sintéticas BMN (*Blue* associada ao canal do azul, MIR associada ao canal do verde e NIR associada ao canal do vermelho) e BNM (*Blue* associada ao canal do azul, NIR associada ao canal do verde e MIR associada ao canal do vermelho). A primeira composição é usada pela facilidade de discriminar tipologias de cobertura vegetal, enquanto a última composição é a que melhor discrimina padrões de vegetação, solo e água, equiparando-se visualmente às composições B2G3R4 e B3G4R5, realizadas anteriormente com as imagens Landsat.

3.4 Estratégia amostral para obtenção dos mapas de vegetação

Esta análise foi realizada com o objetivo de estabelecer uma correspondência entre os mapas índice de vegetação obtidos pela análise do NDVI e as classes temáticas da paisagem nas diferentes microrregiões de estudo.

Os valores médios dos índices de vegetação foram adquiridos com base em amostras relativas às classes temáticas avaliadas. Para isso, foi espacializada, sob as microrregiões de estudo, uma malha amostral de dimensão 3 x 3 *pixels* tendo como base as imagens Landsat.

Para cada classe temática, foram analisados os valores de 100 unidades poligonais. Estas amostras foram identificadas com base nas composições falsa-cor das imagens Landsat TM, B3G4R5 e B2G3R4 para as respectivas datas, de modo a selecionar as áreas de forma homogênea (Figura 7). Dessa forma, as imagens de média resolução (30 metros) do sensor TM serviram como base para a identificação das seguintes classes:

Floresta: compreendem as formações vegetais de porte arbóreo, dentre as quais florestas nativas, que são as de ocorrência natural, encontradas sob a forma de mata ciliar ao longo da rede hidrográfica e dispersas em forma de fragmentos. Ainda

foram consideradas, nessa mesma classe, a ocorrência de florestas plantadas (áreas de reflorestamento em estágio de porte arbóreo).

Regeneração: compreendem uma formação vegetal sucessora, chamada popularmente de “capoeirão”; também podem estar presentes nessa classe áreas de implantação florestal, ou seja, locais onde é praticada a silvicultura, porém em estágios iniciais de plantio.

Campo: constitui a paisagem predominante nas microrregiões e de ocorrência natural no Bioma Pampa; usado em toda a região para pecuária extensiva.

Solo sem vegetação: apresentam-se como áreas de agricultura em pousio nessa época do ano ou em fase de preparo do solo; podem ser ainda voçorocas e ravinas provocadas por processos erosivos e afloramentos rochosos.

Água: estas superfícies compreendem reservatórios naturais e/ou artificiais e, por vezes, espaços utilizados para o cultivo do arroz irrigado.

Para cada classe temática foram, então, gerados planos de informação contendo a malha de amostragem poligonal que, posteriormente, foi sobreposta às grades numéricas NDVI, referentes ao período de análise (agosto a novembro) de cada ano.

A extração dos valores médios para a unidade amostral foi realizada através da função “estatística da imagem por polígonos” do aplicativo SPRING.

Com base nos valores do NDVI, calculou-se a média aritmética simples entre as leituras de cada imagem mensal, para que então as mesmas fossem tomadas como referência para cada ano de avaliação (2000, 2004 e 2008).

Posteriormente, no intuito de verificar a discriminação das classes, os valores representativos da análise anual foram submetidos ao Teste *Tukey* HSD para comparação de médias. A aplicação deste teste resultou na verificação da heterogeneidade dos valores médios de NDVI entre as classes de uma mesma data. Todas as análises foram desenvolvidas no aplicativo para análises estatísticas “R” (REIS e RIBEIRO JÚNIOR, 2007).

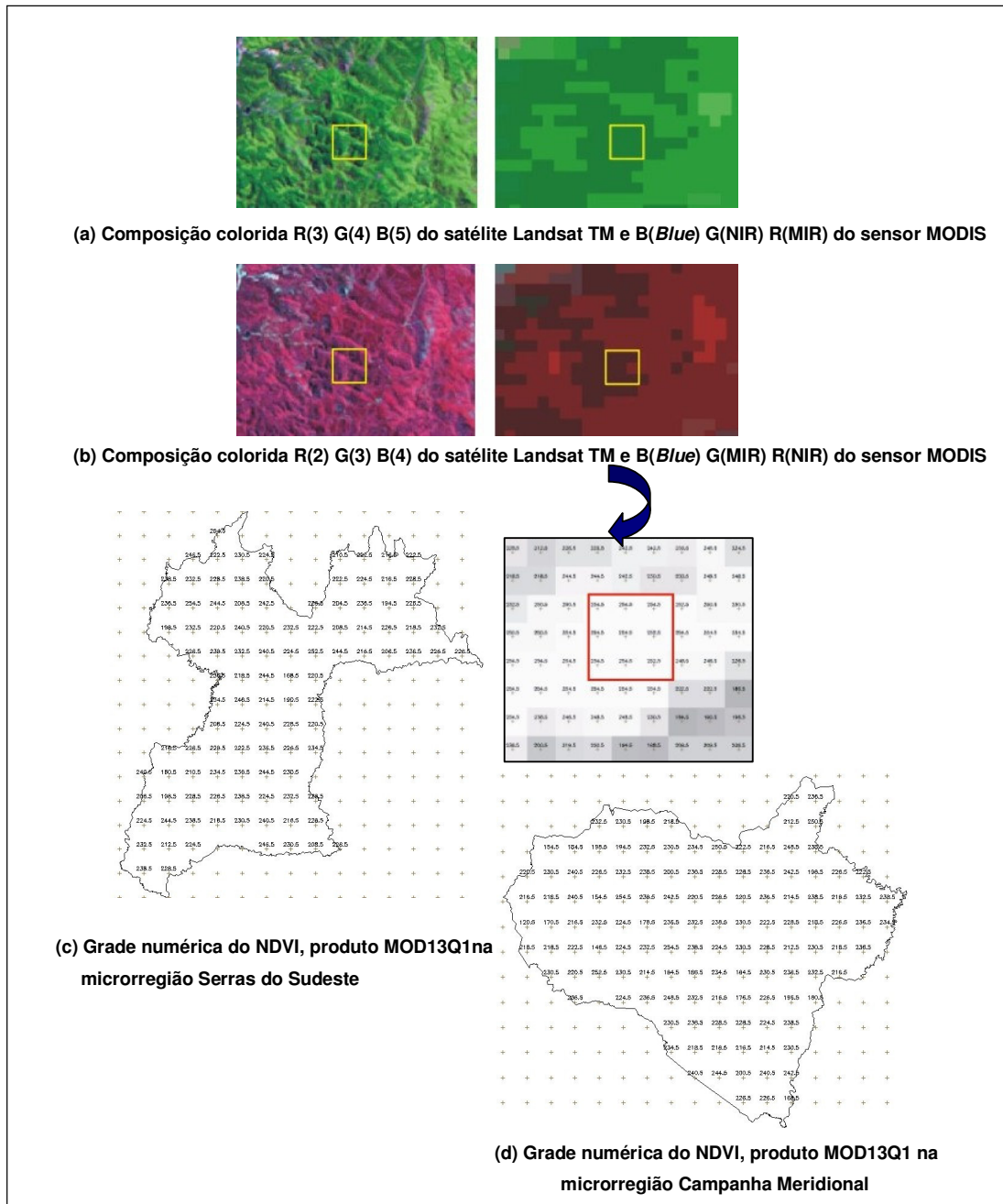


Figura 7 – Unidade amostral espacializada sobre as imagens Landsat e MODIS e sua posterior sobreposição às imagens grade (MDT) para leitura do valor médio do NDVI.

Elaborado pela autora.

3.5 Mapeamento temático através de classificação digital

Mapas temáticos da paisagem das microrregiões foram gerados a partir da classificação digital das imagens MODIS datadas de 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008. Essa etapa foi realizada de modo “supervisionado” e através do algoritmo classificador da máxima verossimilhança (*MaxVer*), que adota a função de densidade probabilística, baseada na estatística Bayesiana, a qual verifica a probabilidade de cada *pixel* em pertencer a uma determinada classe, englobando-a na de maior probabilidade. A qualidade da classificação digital pode ser avaliada através do índice *Kappa*, descrito anteriormente na Seção 2.1.

3.6 Elaboração dos mapas índice de vegetação

Os mapas temporais de vegetação foram elaborados com base nas análises estatísticas das amostras de cada classe. A partir delas, estabeleceram-se os valores médios que indicaram os limiares para a operação de “fatiamento” das grades numéricas dos índices de vegetação para toda a série temporal; os limiares foram definidos pelos valores máximos e mínimos obtidos na classe.

Os mapas temáticos gerados nesse processo foram denominados “mapas índice de vegetação” e contemplam as seguintes classes: floresta, regeneração, campo e solo sem vegetação. Nessa última classe, foram agrupadas as áreas de solo exposto juntamente com as superfícies de água.

Os mapas obtidos nessa etapa são variáveis de entrada usadas no modelo de simulação e, devido à sua variação espaço-temporal no período de análise, são considerados como “variáveis dinâmicas” participantes da modelagem.

3.7 Elaboração dos mapas temáticos estáticos

Os mapas descritos a seguir referem-se às variáveis estáticas “categóricas” e “contínuas”, assim denominadas por serem desconsideradas a ocorrência de processos de transição ou mudança em suas classes durante o período analisado.

Esses mapas constituíram-se inicialmente em planos de informação vetoriais e, após sua conclusão, foram convertidos para o formato matricial para serem exportados, respeitando os mesmos parâmetros de imagem quanto à dimensão apresentada pelos mapas de vegetação.

Os mapas de variáveis estáticas das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional são ilustrados, respectivamente, nas Figuras 8 e 9.

3.7.1 Mapas de rede hidrográfica

O mapeamento da rede hidrográfica abrangeu a totalidade dos cursos d'água presentes nas microrregiões de estudo. Os elementos da drenagem foram incorporados ao processo de modelagem como variáveis estáticas, podendo atuar de modo condicionante à expansão florestal, uma vez que configuram uma faixa marginal considerada Área de Preservação Permanente (APP), segundo a legislação florestal brasileira.

Essa rede foi referenciada espacialmente de forma a descrever qualitativa e quantitativamente seus atributos, sendo construída a partir da vetorização em tela das cartas topográficas digitais da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) na escala 1:250.000, conforme articulação e nomenclatura descritas anteriormente.

3.7.2 Mapas de rede viária

Os mapas de rede viária constituem o arranjo espacial das estradas pavimentadas e não pavimentadas, de gestão federal, estadual e municipal,

compreendidas nos limites das microrregiões de estudo. A existência da malha viária, com seus atributos qualitativos e quantitativos, é considerada relevante ao processo de dinâmica da paisagem decorrente na área de estudo.

Assim como a rede hidrográfica, foi igualmente extraída a partir da vetorização em tela das cartas topográficas digitais citadas anteriormente.

3.7.3 Mapas de localização de centros urbanos

A representação zonal dos centros urbanos dos municípios compreendidos nas microrregiões de estudo foi vetorizada com base nas imagens Landsat, no intuito de se obter informações atualizadas quanto à sua expansão; não foram consideradas as informações contidas nas cartas topográficas.

3.7.4 Mapas clinográficos

Os mapas clinográficos das microrregiões de estudo foram elaborados com base na *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM⁶) da NASA. Os produtos são disponibilizados no formato matricial *Tiff/GeoTiff* e foram convertidos em grades de cotas altimétricas de forma a compor um Modelo Numérico do Terreno (MNT).

A classificação da declividade do solo foi possível através da operação “fatiamento”, com o objetivo de agrupar valores altimétricos diferentes em intervalos de classes pré-definidos. Os valores percentuais de declividade foram agrupados em 5 classes, com base na metodologia desenvolvida por De Biase (1992), conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Descrição das classes de declividade do solo.

Classes de declividade	Percentual de Declividade
1 - Terras cultiváveis com problemas simples de conservação do solo, sem maiores problemas de erosão.	0 – 5%
2 - Compreende o limite máximo para emprego de mecanização agrícola; declividades moderadas.	5 – 12%
3 - Permite apenas o uso de equipamentos de tração animal ou tratores esteira devido à inclinação das vertentes.	12 – 30%
4 - Compreende o limite máximo para o corte raso de vegetação; segundo o código florestal, a partir de tal declividade, só será permitida a exploração se sustentada por coberturas florestais.	30 – 47%
5 - Na faixa situada entre 47 e 100% de declividade, não é permitida a derrubada de florestas para nenhum fim, só sendo tolerada a extração de toros quando em regime de utilização racional.	> 47%

Fonte: De Biase (1992). Adaptado pela autora.

3.7.5 Mapas de densidade populacional

Os mapas temáticos de densidade populacional foram elaborados a partir de dados censitários do IBGE com relação à população total dos municípios, demonstrada nos mapas de densidade populacional ilustrados nas Figuras 8 e 9 para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Tais informações são tabulares e discriminadas por município, podendo ser importadas no SPRING com um identificador em comum, que conecta as informações às respectivas coordenadas geográficas da sede municipal.

A distribuição espacial da população sobre a área de estudo foi calculada pelo estimador de densidade de Kernel. Este estimador cria uma grade de pesos descentralizando a informação radialmente da sede do município para suas abrangências. Quando os limites de um município são ultrapassados, confrontando-se com os valores dos municípios adjacentes, o estimador de Kernel recalcula o valor em uma grade, em que cada célula representa o valor de densidade. Segundo Delgado (1995), a partir de uma função Gaussiana de Kernel distribui-se, em uma grade tridimensional, os pesos resultantes de uma regressão que vincula a

proximidade de dois eventos em relação à sua coordenada de referência. Assim, calculam-se as distâncias de cada ponto (*pixel*) aos eventos observados que estiverem dentro de uma mesma região de influência limitada por uma distância definida pelo raio de ação. Essas distâncias contribuem para o cálculo da intensidade estimada no ponto (*pixel*). Sobre a grade de pesos gerada no processo, executou-se o “fatiamento” em cinco classes temáticas de intervalos iguais entre os valores de maior e menor densidade observada.

3.7.6 Mapas de sub-bacias hidrográficas

Para elaborar os mapas das sub-bacias hidrográficas presentes nas microrregiões de estudo, foram utilizados os dados disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas - HIDROWEB, que pode ser acessado através do *site* <http://hidroweb.ana.gov.br>. Neste sistema, foram selecionados para *download* os dados vetoriais da bacia do rio Uruguai e da bacia do Atlântico – Trecho Sudeste com suas respectivas divisões em sub-bacias; os arquivos são disponibilizados originalmente no formato **.shape* e foram posteriormente convertidos para que, no SPRING, pudessem ser gerados os planos matriciais referentes à cada microrregião.

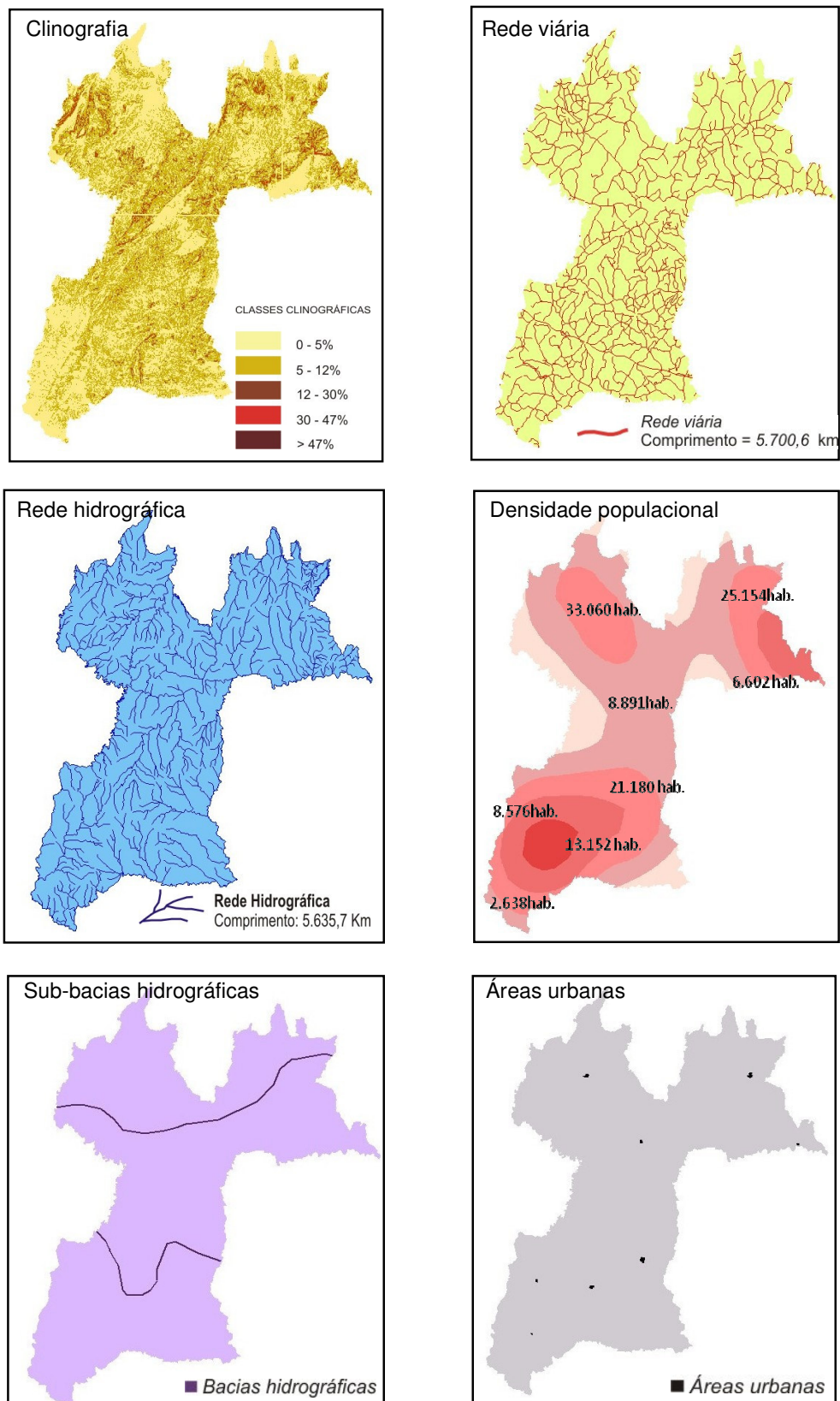


Figura 8 – Mapas de variáveis estáticas na microrregião Serras do Sudeste. Elaborado pela autora.

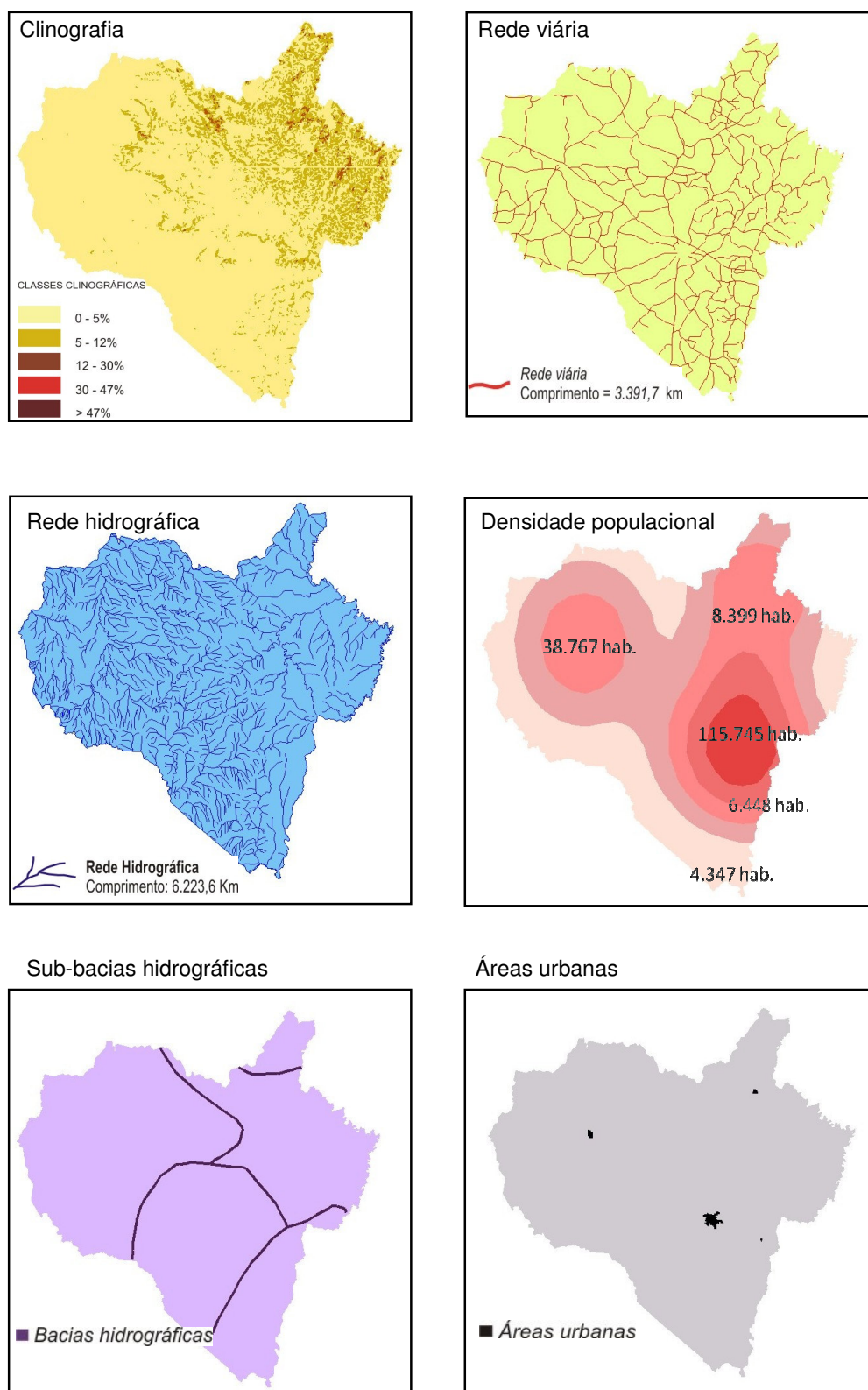


Figura 9 – Mapas de variáveis estáticas na microrregião Campanha Meridional.
Elaborado pela autora.

3.8 Conversões necessárias ao processo de modelagem

O primeiro procedimento adotado no SPRING para a realização das conversões consistiu em reprojetar e registrar todos os mapas gerados anteriormente para o sistema de projeção *Policônica* e o elipsóide de referência *WGS 84*.

Um requisito inicial para o processo de modelagem é que todos os mapas constituintes de variáveis (estáticas ou dinâmicas) apresentem exatamente a mesma resolução espacial e o mesmo “box” de coordenadas, resultando em matrizes de igual valor de colunas e linhas.

Este processo é possível a partir da criação de um novo projeto contendo as informações desejadas e que serão adotadas comumente a todos os planos de informação usados na modelagem.

Para a microrregião Campanha Meridional, adotou-se a resolução espacial 250 metros (compatível com os produtos MODIS), módulo escalar 500.000 e “box” do projeto: 55°10'07” a 53°13'18” de Longitude Oeste e 32°00'47” a 30°21'55” de Latitude Sul.

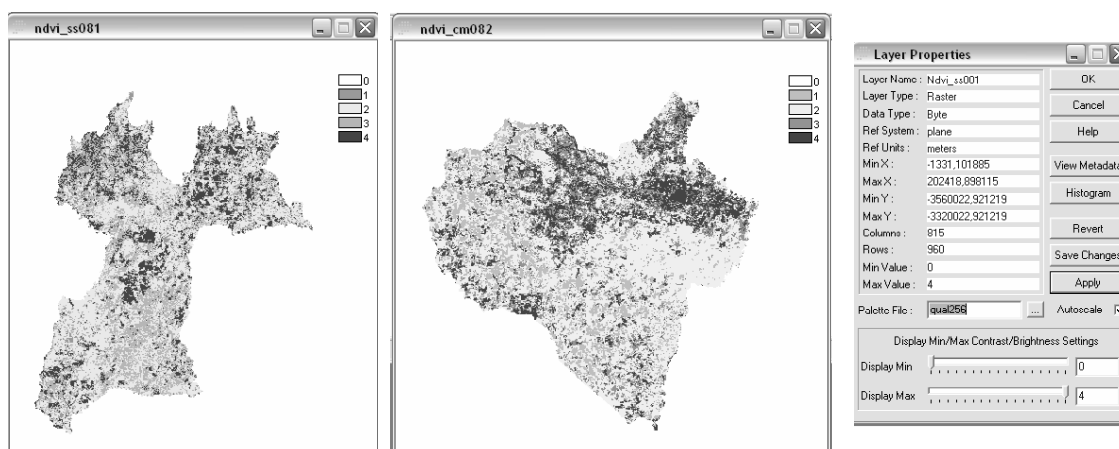
Para a microrregião Serras do Sudeste, adotou-se igualmente a resolução espacial de 250 metros e o módulo escalar 500.000, e “box” do projeto: 55°00'45” a 51°54'01” de Longitude Oeste e 32°08'40” a 29°59'53” de Latitude Sul.

A etapa final no aplicativo SPRING consistiu na exportação de todos os mapas (de variáveis estáticas e dinâmicas) em formato matricial.

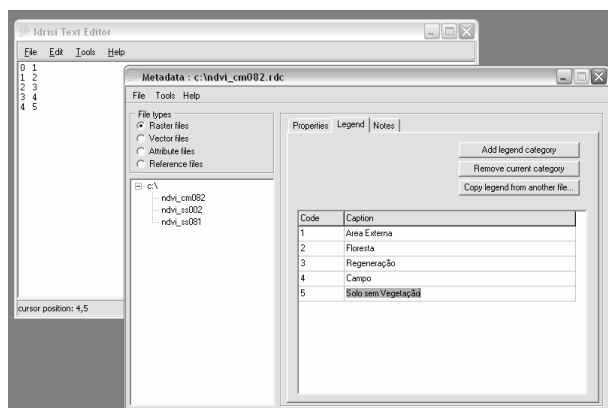
3.8.1 Uso do aplicativo Idrisi

A utilização desse aplicativo foi necessária para a adequação de todos os mapas participantes da modelagem. O processo realizado, a partir das imagens “raster” exportadas, compreendeu as mesmas etapas, tanto para os mapas índice de vegetação como para os mapas de variáveis estáticas, sendo executado na seguinte ordem:

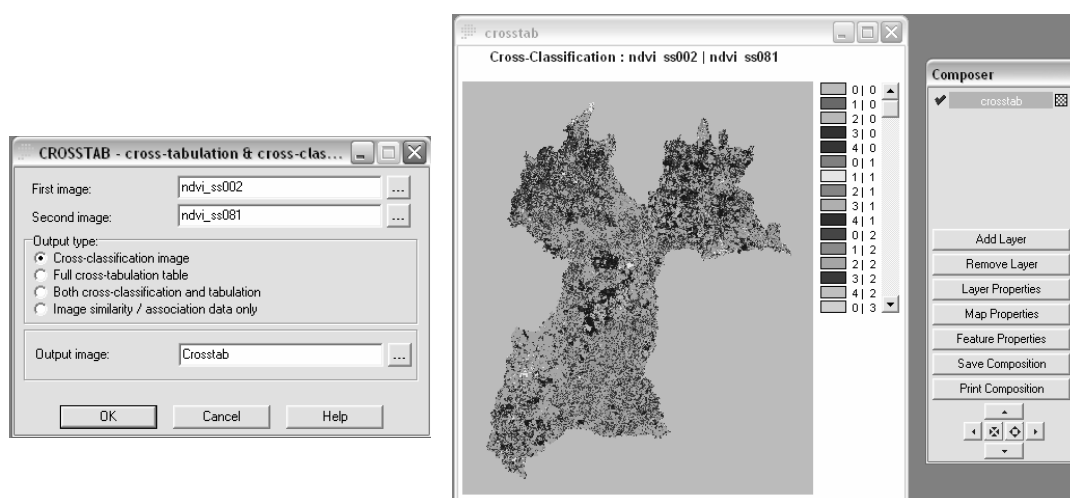
- 1) Importação de imagens no formato *Tiff/GeoTiff* referentes aos mapas das microrregiões de estudo e análise das propriedades de cada *layer*, tais como parâmetros de referência (X e Y), sistema de referência, tamanho da imagem, paleta de cores, entre outros. É requisito obrigatório que os *layers* integrantes do modelo apresentem exatamente as mesmas propriedades quanto aos parâmetros mencionados (Figura 10a).
- 2) Correção do atributo numérico referente às classes temáticas identificadas na imagem através da análise "*Feature Properties*" e da edição manual a partir de uma tabela "*Edit*", na qual são relacionados os valores matriciais originais e os valores a serem assumidos para as classes; todos os *layers* do processo devem apresentar um atributo numérico padronizado para as classes, sendo que estas não podem assumir o valor 0 (zero), e este atributo deve ser mantido até o final do processo de simulação (Figura 10b).
- 3) Análise "*Crosstab*" entre os *layers* para detecção de transições não passíveis de ocorrência entre os mapas temporais, e que não serão admitidas no modelo. Estas transições poderão ser igualmente corrigidas através da edição do atributo numérico da classe, sendo, neste caso, mantido o atributo referente ao mapa inicial (tempo 1). O mapa corrigido é, então, utilizado na simulação (Figura 10c).
- 4) Obtenção dos arquivos *Idrisi Raster Documentation File* (*rdc*) e *Idrisi Raster Format* (*rst*) referentes aos mapas a serem usados no modelo.



(a) importação das imagens *Tiff/GeoTiff* e análise das propriedades dos *layers* das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional;



(b) correção do atributo numérico das classes e edição da legenda;



(c) análise *Crosstab* entre os mapas da microrregião Serras do Sudeste;

Figura 10 – Sequência de procedimentos operacionais realizados para conversão de arquivos no aplicativo IDRISI 32.

Elaborado pela autora.

3.8.2 Uso do aplicativo ErMapper – *Earth Resource Mapping*

Este aplicativo é utilizado para a edição e conversão de todos os *layers* originados no aplicativo Idrisi para um formato compatível com o Dinamica EGO. O procedimento é realizado conforme descrição a seguir:

- 1) Seleção de um diretório com os *layers* de extensões **.rdc* e **.rst*, juntamente com os arquivos texto, contendo o cabeçalho padrão do ErMapper sobre o qual foram alteradas as informações referentes ao nome, sistema de referência, sistema de projeção e coordenadas do mapa. Os cabeçalhos alterados foram mantidos com a mesma nomenclatura, porém com extensão **.rst.ers* e salvas em formato **.txt*.
- 2) Importação dos *layers* referentes às variáveis dinâmicas, com a concomitante verificação dos histogramas de frequência dos níveis de cinza, nos quais devem ser observados os limites atuais de cada classe temática adotada.
- 3) Criação de um “cubo de dados” referente às variáveis estáticas, no qual são incluídos todos os demais *layers* participantes do processo de modelagem, referentes aos mapas temáticos descritos na seção 3.7, para que também seja realizada a verificação dos histogramas de frequência.
- 4) Geração dos *layers* dos mapas “inicial” e “final” e do “cubo de dados” de variáveis estáticas em formato compatível com o processamento na plataforma Dinamica EGO.

3.9 Modelagem de dados espaciais no Dinamica EGO

3.9.1 Seleção das variáveis integrantes do modelo

Como descrito na Seção 2.4.1.1, o método de pesos de evidência baseia-se no teorema da probabilidade condicional de Bayes. A seleção de variáveis para a análise de modelagem deve considerar a avaliação da independência entre pares de variáveis selecionadas para explicar uma mesma transição de uso do solo.

Para avaliar esta condição entre as variáveis pré-selecionadas, foram utilizados os índices de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U); para o cálculo de ambos, é necessário obterem-se valores de áreas a partir da tabulação cruzada entre pares de mapas de variáveis sob análise. O índice de Cramer é definido por Bonham-Carter (1994) pela seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{X^2 / T \cdot M}, \quad (19)$$

em que:

T = totais marginais da matriz de tabulação cruzada entre dois mapas A e B;

X^2 = estatística qui-quadrado;

M = mínimo de $(n-1, m-1)$, em que n é igual ao número de linhas e m é o número de colunas da matriz de tabulação cruzada entre os mapas A e B.

A Incerteza de Informação Conjunta (U) também se baseia na matriz de tabulação cruzada T ; assim, $U(A,B)$ pode ser usada como uma medida de associação, sendo definida por (Bonham-Carter, 1994):

$$U(A,B) = 2 [H(A) + H(B) - H(A,B) / H(A) + H(B)], \quad (20)$$

a qual varia entre 0 e 1, sendo que 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 (ALMEIDA, 2003). Bonham-Carter (1994), reporta que valores inferiores a 0,5 tanto para V quanto para U sugerem menos associação do que mais. Este critério foi adotado para a seleção de variáveis explicativas do modelo.

3.9.2 Processos de calibração e simulação

Um modelo implementado no Dinamica EGO exige a organização de “*containers*”. O primeiro deles é chamado “*Group*”, responsável pelo controle de todo o modelo, o qual permite a execução de procedimentos que envolvem as etapas de calibração, execução do modelo propriamente dito e validação do modelo.

A calibração inicia-se com o cálculo das matrizes chamadas “*Single Step Transition Matrix*” e “*Multiple Step Transition Matrix*”, que conferem valores aos processos de transição ocorridos entre os mapas de uso e cobertura para o instante inicial (tempo 1) e para o instante final (tempo 2).

A matriz “*Single Step*” refere-se aos processos de transição entre as classes durante todo o período de análise. A matriz “*Mult Step*”, por sua vez, indica as transições ocorridas a cada passo de tempo do período analisado (SOARES-FILHO et al., 2009).

As matrizes são geradas a partir da definição dos seguintes parâmetros no *container* “*Group*” (Figura 11a):

a) Parâmetros de entrada (Input):

- a.1) mapa de uso inicial;*
- a.2) mapa de uso final.*

b) Parâmetros do modelo (Determine Transition Matrix):

- b.1) Intervalo de tempo considerado (Time Steps).*

c) Parâmetros de saída (Output):

- c.1) nome para o arquivo de matriz single - “single step.csv”;*
- c.2) nome para o arquivo de matriz mult step - “multiple step.csv”.*

O processo seguinte da calibração consiste em realizar o chamado “fatiamento” dos mapas de variáveis estáticas e dinâmicas contínuas, no qual são determinadas faixas de distância em relação a cada classe temática considerada.

Para a geração das faixas de distância deverão ser determinados no “*Group*” (Figura 11b):

a) Parâmetros de entrada (Input):

- a.1) *mapa de variáveis estáticas;*
- a.2) *mapa de uso inicial;*
- a.3) *mapa de uso final.*

b) Parâmetros do modelo (Determine Weights of Evidence Ranges):

b.1) cálculo do mapa de distância, com inserção do número de classes consideradas;

b.2) classificação das variáveis em categóricas (discretas) e não-categóricas contínuas, (estáticas ou dinâmicas, por ex.: faixas de distância para cada uso), para cada transição analisada e, ainda, definição da resolução espacial adotada.

c) Parâmetros de saída (Output):

c.1) nome para o arquivo de fatias - "skeleton.dcf".

b) Parâmetros do modelo (Determine Weights of Evidence Coefficients):

neste procedimento os parâmetros adotados são os mesmos da etapa anterior, portanto, nenhuma alteração deverá ser realizada.

Posteriormente, deve-se proceder ao cálculo dos coeficientes pelo método dos pesos de evidência, em que foram definidos os seguintes itens (Figura 11c):

b) Parâmetros de entrada (Input):

- b.1) mapa de uso inicial;*
- b.2) mapa de uso final;*
- b.3) mapa de variáveis estáticas;*
- b.4) arquivo de "fatias", (Skeleton).*

c) Parâmetros de saída (Output):

c.1) nome para o arquivo dos coeficientes de pesos de evidência: "weights.dcf".

A calibração do modelo é finalizada pela obtenção dos "mapas de correlação", nos quais são calculados os índices Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U), descritos na Seção 3.9.1.

Estes índices colaboram para a seleção de variáveis intervenientes ao modelo. Em ambos os casos, é necessário obterem-se valores de áreas, tomados a partir da tabulação cruzada entre os pares de mapas analisados.

Este cálculo possibilita a percepção de quais variáveis devem permanecer ou ser retiradas do modelo, em função de sua elevada associação ou dependência espacial.

Nesta etapa deverão ser discriminados os itens abaixo (Figura 11d):

a) Parâmetros de entrada (Input):

a.1) mapa de uso inicial;

a.2) mapa de variáveis estáticas;

a.3) arquivo de pesos de evidência “weights”.

b) Parâmetros do modelo (Determine Weights of Evidence Correlation):

b.1) cálculo do mapa de distância, com inserção do número de classes de uso consideradas;

b.2) inserção das transições de uso consideradas.

c) Parâmetros de saída (Output):

c.1) nome para o arquivo de correlação dos pesos de evidência.

A execução do modelo propriamente dita requer a organização de um novo *container* denominado “Repeat”. Este é responsável por executar os seus operadores por quatro iterações, correspondentes ao número de passos de cada período de simulação.

Esta etapa compõe-se de algumas fases, para as quais são definidos parâmetros individuais, cujas caracterizações são descritas a seguir (Figura 11e):

a) Parâmetros de entrada (Input):

a.1) arquivo de matriz mult step (Multiple Step);

a.2) mapa de uso inicial;

a.3) mapa de variáveis estáticas;

a.4) arquivo de pesos de evidência (weights).

b.1) Etapas do processo que não sofrem alterações em suas definições, mas são essenciais ao funcionamento do modelo:

b.1.1) *Mux Categorical Map*: esse “functor” reinjeta mapas produzidos em uma iteração na iteração seguinte, permitindo a retroalimentação dos mapas;

b.1.2) *Calc Change Matrix*: transforma a taxa de mudança de uso em um número absoluto de mudanças (quantidade de células); a quantidade de células é então dividida entre as funções de transição (*expander* e *patcher*), através do “functor” *Change Matrix*.

b.1.3) *Calc Distance*: usado para calcular o mapa de distâncias.

b.2) *Modulate Change Matrix*, em que são definidas as taxas percentuais de mudança para as transições consideradas.

b.3) *Expander*: nesse algoritmo são definidas as características espaciais das transições das manchas de uso e cobertura previamente existentes, para as quais são adotados valores de área em hectare para média e variância e grau de isometria.

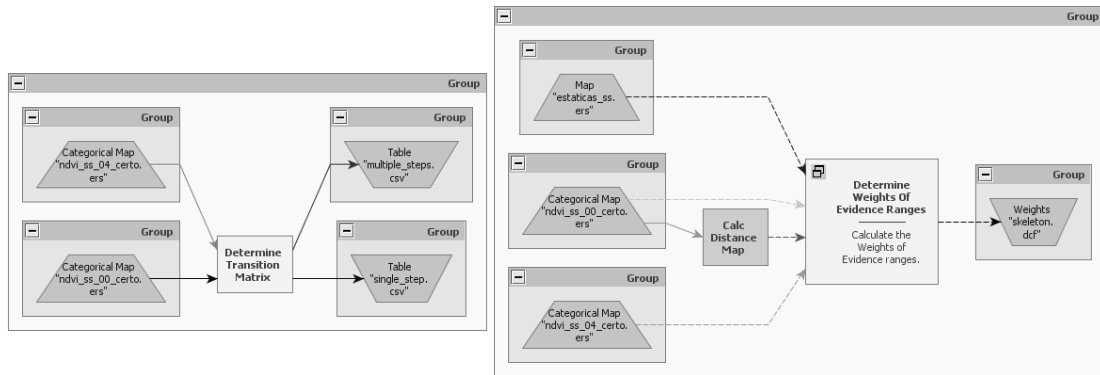
b.4) *Patcher*: nesse algoritmo de transição, são definidos valores destinados à geração de novas manchas, para os quais são igualmente adotados os valores de área em hectare para média e variância e valor de isometria. A isometria corresponde ao valor pelo qual se multiplica as probabilidades de células vizinhas à célula central, para induzir a variações na configuração espacial das manchas. Normalmente são utilizados valores entre zero e dois, sendo valores próximos a zero ou zero responsáveis pela formação de manchas mais dendríticas, e valores próximos a dois, pela formação de manchas mais compactas.

b.5) Inserção das transições consideradas na execução do “*Calc. Weights of Evidence Probability Map*”.

c) *Parâmetros de saída (Output)*:

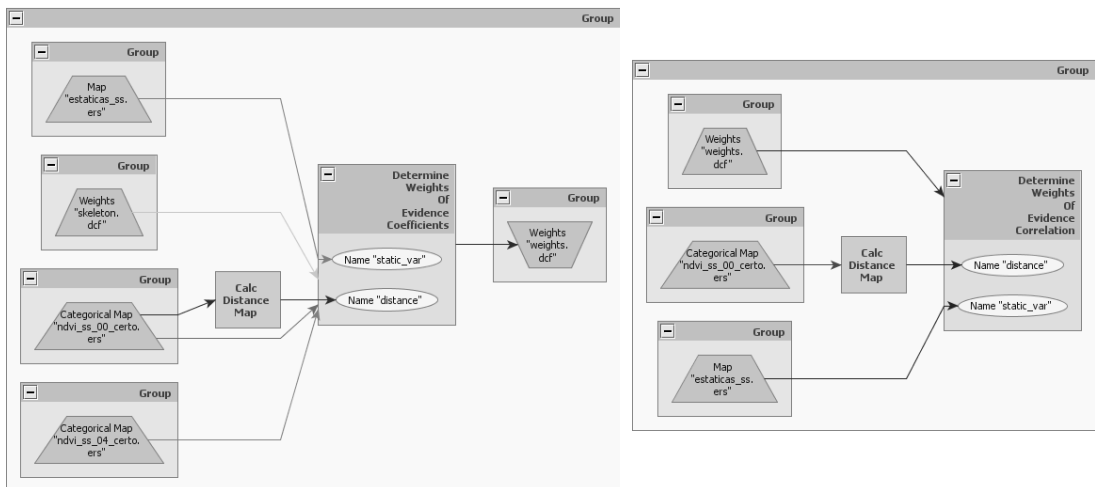
c.1) nome para a geração dos mapas de paisagem anual - “*landscape.ers*”;

c.2) nome para a geração dos mapas de probabilidade de mudanças de uso e cobertura anual - “*probs.tiff*”.



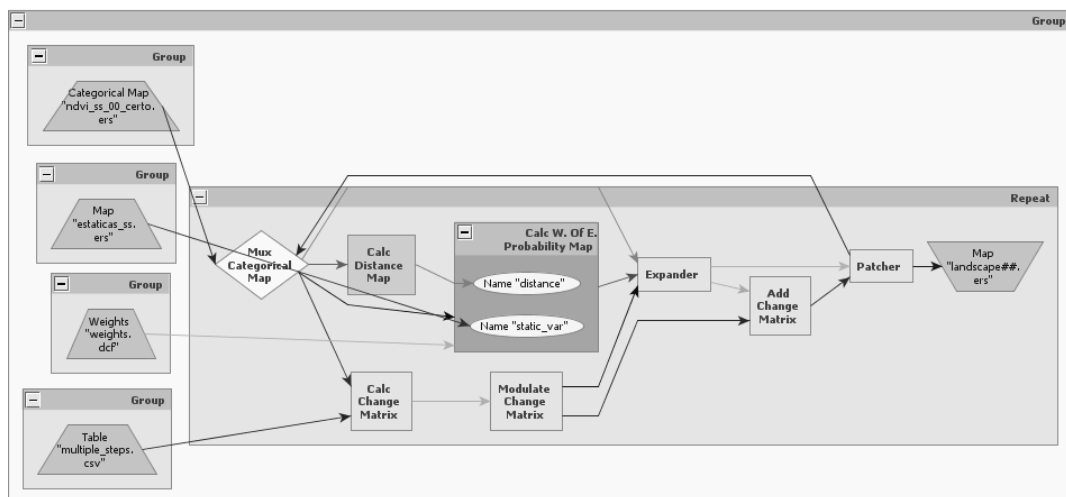
(a) cálculo das matrizes de transição;

(b) geração de faixas de distâncias às variáveis;



(c) cálculo dos pesos de evidência;

(d) análise de correlação entre os mapas;



(e) execução do modelo de simulação;

Figura 11 – Sequência de procedimentos operacionais realizados no processo de modelagem na plataforma Dinamica EGO.

Elaborado pela autora.

3.9.3 Teste de validação estatística dos modelos

Esta etapa foi realizada com o objetivo de avaliar os resultados obtidos durante a simulação. O processo de validação do modelo no Dinamica é dado pela aplicação dos algoritmos “função de decaimento constante” e “função de decaimento exponencial” sobre os “mapas diferença”, resultantes de subtração algébrica específica entre os mapas real e inicial, e entre o mapa simulado e o mapa inicial.

Esse processo constitui uma adaptação do método de Hagen (2003) por Soares-Filho et al., (2005), que considera medidas de similaridade por lógica *fuzzy*, aplicadas em contexto de vizinhança local sobre os mapas reais e os mapas simulados, como ilustra a Figura 12.

No método “*fuzziness of location*” – dubiedade de localização – a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas. Um vetor “exato” é associado a cada célula do mapa, sendo que esse vetor possui tantos elementos quantos forem as classes temáticas adotadas, assumindo 1 para categoria= i e 0 para as categorias diferentes de i . Dessa forma, o vetor de vizinhança *fuzzy* (V_{nbhood}) para cada célula é dado por:

$$V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ M \\ \mu_{nbhood\ C} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$\mu_{nbhood\ i} = \mu_{crisp\ i,1} * m_1, \mu_{crisp\ i,2} * m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,n} * m_n \quad Max \quad . \quad (22)$$

Em que:

$\mu_{nbhood\ i}$ representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N células (normalmente $N=n^2$);

$\mu_{crisp\ ij}$ 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 ;

m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , em que m refere-se a uma função de decaimento exponencial ($m = 2^{-d/2}$), sendo d a distância unitária entre células, medida de centróide a centróide.

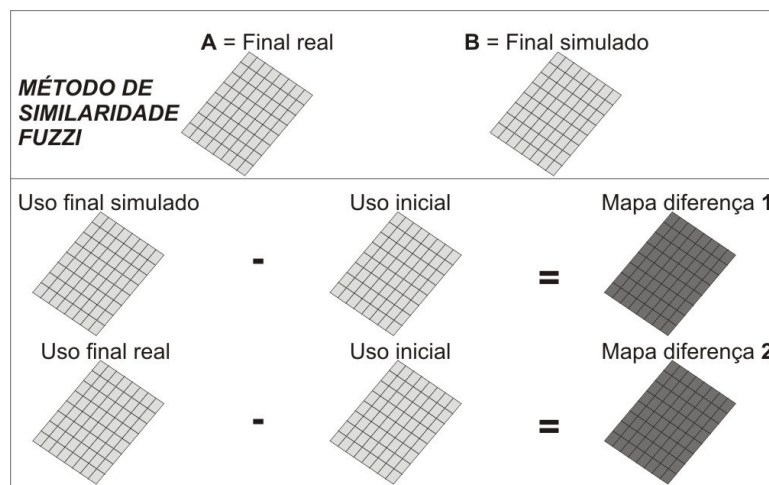


Figura 12 – Obtenção dos “mapas diferença 1 e 2” para aplicação do método de similaridade *fuzzy*.

Fonte: Soares-Filho et al. (2005). Adaptado pela autora.

No Dinâmica EGO, a medida de similaridade foi obtida separadamente pela aplicação das duas funções, sendo definidos os seguintes parâmetros de entrada no modelo:

a) *Parâmetros de entrada:*

a.1) *mapa de uso inicial;*

a.2) *mapa de uso final;*

a.3) *mapa simulado.*

Os parâmetros de entrada no modelo constituem os mesmos, tanto para a função constante quanto para exponencial, devendo ainda ser definidos os parâmetros de saída, que se referem às tabelas de máxima e mínima similaridade entre os mapas para as janelas de 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11.

Os mapas de similaridade demonstram os erros e acertos para os resultados simulados. Portanto, após este processo de validação, realizado com relativos índices de aceitação, é possível efetuar simulações relativas ao período analisado pelo modelador. Considerando-se a resolução temporal adotada nesse estudo, objetivou-se a projeção de cenários posteriores até oito anos.

4 RESULTADOS

4.1 Análise amostral

A obtenção dos valores do NDVI sob as imagens possibilitou verificar o comportamento espectral dos temas em estudo com relação a este índice de vegetação. A correlação com a respectiva classe temática foi estabelecida pela definição de uma poligonal de 9 *pixels* sobre as imagens Landsat, que posteriormente foram sobrepostas às grades numéricas MOD13Q1 para leitura do NDVI. O valor adotado por unidade amostral correspondeu à média aritmética simples tomada entre as imagens mensais (relativas ao período de agosto a novembro), sendo esse valor extraído das imagens por meio da rotina “estatística da imagem por polígonos” do aplicativo SPRING.

O procedimento adotado foi realizado, sucessivamente, para as quatro imagens mensais de cada um dos anos (2000, 2004 e 2008), no intuito de se obterem limiares de referência para o respectivo ano.

Nessa etapa, foram analisadas quatrocentas unidades amostrais para cada ano, totalizando mil e duzentas leituras ao longo da série temporal. No entanto, para a definição dos valores de referência anual, foi adotada a média aritmética obtida entre as imagens.

Os APÊNDICES A, B e C apresentam os valores médios do NDVI contabilizados como limiares de referência para os anos 2000, 2004 e 2008 na microrregião Serras do Sudeste. A organização da tabela é dada pela relação dos quatro temas analisados: cobertura florestal, regeneração, campo e solo sem vegetação e seu correspondente índice de vegetação. Nos APÊNDICES D, E e F, encontram-se os valores médios do NDVI calculados com base nas mesmas imagens, com referência à área da microrregião Campanha Meridional.

Parâmetros de avaliação sobre o comportamento dos valores NDVI para um dado tema, ao longo da série temporal, encontram-se relacionados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Tabela 7 – Parâmetros calculados para o conjunto amostral dos valores do NDVI na microrregião Serras do Sudeste.

Parâmetros	Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000			
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
Média	250,015	242,770	223,075	175,635
Variância	11,759	1,219	13,618	103,348
Desvio P.	3,429	1,104	3,690	10,166
CV%	4,704	0,502	6,107	58,842
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004				
Média	250,803	243,010	222,900	177,360
Variância	8,177	1,550	12,500	109,172
Desvio P.	2,859	1,245	3,535	10,497
CV%	3,280	0,628	5,621	61,864
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008				
Média	250,355	242,21	222,04	174,19
Variância	8,981	1,882	15,392	86,825
Desvio P.	2,997	1,372	3,923	9,318
CV%	3,587	0,777	6,932	49,845

Tabela 8 – Parâmetros calculados para o conjunto amostral dos valores do NDVI na microrregião Campanha Meridional.

Parâmetros	Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000			
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
Média	247,444	237,350	225,700	175,99
Variância	17,735	2,361	8,787	88,230
Desvio P.	4,211	1,536	2,964	9,393
CV%	7,167	0,981	3,893	50,133
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004				
Média	248,09	238,36	222,38	173,03
Variância	15,748	4,042	16,381	96,908
Desvio P.	3,968	2,010	4,047	9,844
CV%	6,347	1,696	7,366	56,006
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008				
Média	250,515	242,85	223,27	171,72
Variância	6,168	2,523	15,894	73,888
Desvio P.	2,483	1,588	3,986	8,595
CV%	2,462	1,038	7,119	43,028

De acordo com os resultados demonstrados nas Tabelas 7 e 8, é possível inferir sobre o comportamento deste índice de vegetação para as diferentes classes ao longo do tempo.

A floresta, na microrregião Serras do Sudeste, apresentou um NDVI médio em torno de 250 em todos os períodos analisados, o que indica uma resposta espectral semelhante dessa classe ao longo do tempo, desde que considerado o mesmo período do ano para a tomada das imagens. Esse resultado também sugere que condições estruturais do dossel e de seu estágio vegetativo foram mantidas, de modo geral, ao longo do período.

Os valores de variância, desvio padrão e coeficiente de variação encontrados para essa classe indicam bons resultados quanto à resposta das unidades amostrais analisadas.

Na microrregião da Campanha Meridional, o valor médio encontrado para o NDVI da floresta não apresentou um valor padronizado, pois, em cada data, analisada a média difere-se das demais, embora os parâmetros estatísticos calculados denotem igualmente bons resultados com relação às amostras adotadas.

Deve-se considerar que, no caso da regeneração, embora tenha apresentado um intervalo mais limitado para os valores NDVI, apresenta valores muito próximos aos da classe floresta, o que indica um comportamento espectral semelhante para as duas classes em todos os períodos.

A classe campo de formação vegetal reduzida e a classe solo sem vegetação apresentam valores inferiores para o NDVI. Observam-se nessas classes, maiores valores relativos à variância, desvio padrão e coeficiente de variação; tal fato pode ser justificado pela maior variabilidade encontrada para o NDVI nesses temas, que apresentam uma resposta espectral mais diversificada devido à sua composição, por exemplo: nas áreas de campo, maior ou menor presença de cobertura vegetal; no solo, maior ou menor presença de umidade.

A definição dos índices de vegetação indicativos de cada classe requer a comprovação da heterogeneidade entre as amostras e, para tal, foi aplicada uma análise de variância (ANOVA) juntamente com o teste de *Tukey* HSD sobre os respectivos valores do NDVI para as unidades amostrais.

As análises consideram o NDVI médio observado para os anos 2000, 2004 e 2008, respectivamente. A Tabela 9 apresenta os resultados preliminares para o teste de homogeneidade de variâncias entre classes, em uma mesma data, respectivamente, para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Tabela 9 – Teste F aplicado aos valores médios do NDVI, considerando um mesmo período de análise, nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião Serras do Sudeste			
Data	Maior variância	Menor variância	Teste F
	Classe	Classe	
2000	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 102,763; 99gl >p\text{-value} < 2,220e-16; \alpha \leq 5\%^*$
2004	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 71,060; 99gl >p\text{-value} < 2,220e-16; \alpha \leq 5\%^*$
2008	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 49,062; 99gl >p\text{-value} < 2,220e-16; \alpha \leq 5\%^*$
Microrregião Campanha Meridional			
2000	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 38,859; 99gl >p\text{-value} < 2,220e-16; \alpha \leq 5\%^*$
2004	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 24,203; 99gl >p\text{-value} < 1,308e-11; \alpha \leq 5\%^*$
2008	Solo	Regeneração	$F_{calc} = 12,856; 99gl >p\text{-value} < 2,220e-16; \alpha \leq 5\%^*$

*Signific. codes: 0 '****' 0.001 '**'* 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Os resultados obtidos indicam que os valores de NDVI calculados para as classes diferem entre si, com intervalo de confiança igual a 95%.

Uma análise prévia à ANOVA, no intuito de verificar a normalidade dos valores médios do NDVI amostrados para cada ano, foi realizada através do teste de Shapiro-Wilks. (W) (SCHNEIDER et al., 2009).

Os resultados obtidos para os anos 2000, 2004 e 2008 encontram-se relacionados na Tabela 10 e demonstram que, para as quatro classes analisadas, o valor calculado W é superior ao valor tabelado ($p\text{-value}$), portanto, é aceita a normalidade das observações no período avaliado.

A ANOVA foi, então, aplicada para testar a heterogeneidade dos valores NDVI entre as classes de vegetação em uma mesma data de análise. Os resultados para o teste são demonstrados na Tabela 11.

Tabela 10 – Teste de Shapiro-Wilks. aplicado aos valores médios do NDVI referentes a 2000, 2004 e 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião Serras do Sudeste		
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000		
Classe	Índice Shapiro-Wilks. (<i>W</i>)	<i>p-value</i>
Floresta	0,8715	8,06e-08
Regeneração	0,8603	2,899e-08
Campo	0,9460	0,0004534
Solo	0,9445	0,0003682
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004		
Floresta	0,9081	3,458e-06
Regeneração	0,9318	6,279e-05
Campo	0,9499	0,0008177
Solo	0,8862	3,363e-07
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008		
Floresta	0,9431	0,0002977
Regeneração	0,9075	3,257e-06
Campo	0,9400	0,0001929
Solo	0,9367	0,0001214
Microrregião Campanha Meridional		
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000		
Classe	Índice Shapiro-Wilks. (<i>W</i>)	<i>p-value</i>
Floresta	0,9577	0,002769
Regeneração	0,8556	1,921e-08
Campo	0,9222	1,853e-05
Solo	0,9099	4,239e-06
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004		
Floresta	0,9264	3,142e-05
Regeneração	0,9269	3,313e-05
Campo	0,9327	7,128e-05
Solo	0,8895	4,681e-07
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008		
Floresta	0,9501	0,0008363
Regeneração	0,6609	7,25e-14
Campo	0,9552	0,001869
Solo	0,9257	2,848e-05

Tabela 11 – ANOVA aplicada aos valores médios do NDVI em 2000, 2004 e 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião Serras do Sudeste					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	339246	113082	2977,9	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	15038	38		
<i>Residual standard error: 6,162</i>					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	325535	108512	3278,3	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	13108	33		
<i>Residual standard error: 5,753</i>					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	351063	117021	3940,3	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	11761	30		
<i>Residual standard error: 5,450</i>					
Microrregião Campanha Meridional					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	301002	100334	3290,5	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	12075	30		
<i>Residual standard error: 5,522</i>					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	333601	111200	3338,9	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	13189	33		
<i>Residual standard error: 5,771</i>					
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
<i>Medias</i>	3	376921	125640	4891,8	< 2,2e-16 ***
<i>Residuals</i>	396	10171	26		
<i>Residual standard error: 5,068</i>					

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

O teste de *Tukey* HSD foi aplicado posteriormente para verificar entre quais classes ocorrem as diferenças significativas detectadas na ANOVA. As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados obtidos na comparação pareada entre as médias. É possível comprovar, devido ao limite inferior positivo calculado, que entre todas as classes ocorrem diferenças significativas em nível $\alpha \leq 5\%$. Os maiores valores, quanto aos limite inferior (*lwr*) e superior (*upr*), indicam maior distinção entre as classes. Para a interpretação dos resultados, deve-se considerar (1) floresta, (2) regeneração, (3) campo e (4) solo sem vegetação.

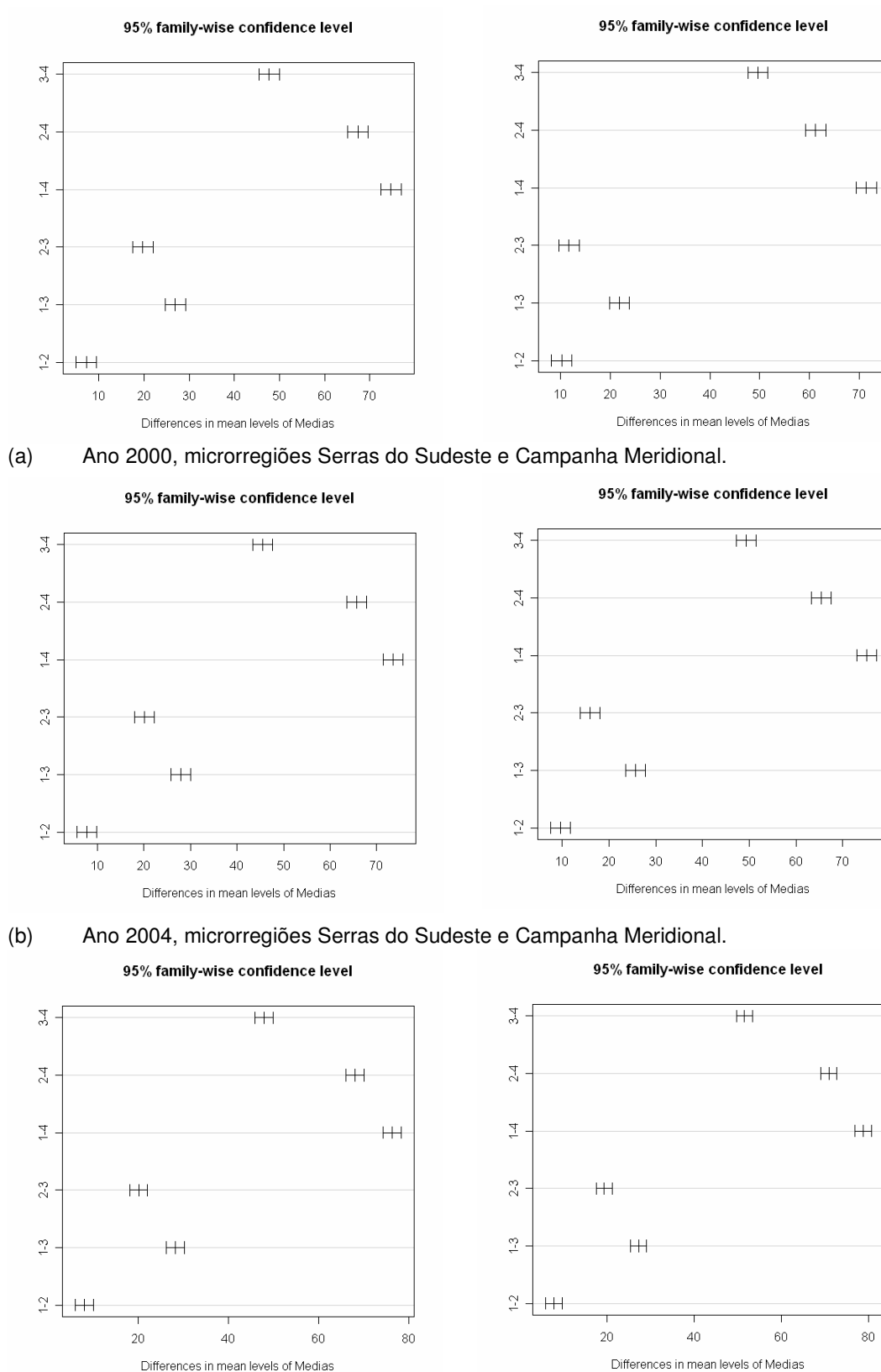
Tabela 12 – Comparação pareada entre as classes, através do teste de *Tukey* HSD nos diferentes períodos, para a microrregião Serras do Sudeste.

Microrregião Serras do Sudeste				
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000				
<i>Classe</i>	<i>Diff</i>	<i>lwr</i>	<i>upr</i>	<i>P adj</i>
3-4	47,740	45,492	49,988	0
2-4	67,435	65,187	69,684	0
1-4	74,680	72,432	76,928	0
2-3	19,695	17,447	21,943	0
1-3	26,940	24,692	29,188	0
1-2	7,245	4,997	9,493	0
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004				
3-4	45,540	43,441	47,639	0
2-4	65,650	63,551	67,749	0
1-4	73,443	71,344	75,542	0
2-3	20,110	18,010	22,209	0
1-3	27,903	25,804	30,002	0
1-2	7,793	5,694	9,892	0
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008				
3-4	47,96	45,972	49,948	0
2-4	68,13	66,142	70,118	0
1-4	76,31	74,322	78,298	0
2-3	20,17	18,182	22,158	0
1-3	28,35	26,362	30,338	0
1-2	8,18	6,192	10,168	0

Tabela 13 – Comparação pareada entre as classes, através do teste de *Tukey* HSD nos diferentes períodos, para a microrregião Campanha Meridional.

Microrregião Campanha Meridional				
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2000				
<i>Classe</i>	<i>Diff</i>	<i>lwr</i>	<i>upr</i>	<i>P adj</i>
3-4	49,620	47,605	51,635	0
2-4	61,270	59,255	63,285	0
1-4	71,464	69,449	73,479	0
2-3	11,650	9,635	13,665	0
1-3	21,844	19,829	23,859	0
1-2	10,194	8,179	12,209	0
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2004				
3-4	49,35	47,244	51,455	0
2-4	65,33	63,224	67,435	0
1-4	75,04	72,934	77,145	0
2-3	15,98	13,874	18,085	0
1-3	25,69	23,584	27,795	0
1-2	9,71	7,604	11,815	0
Produto MOD13Q1: NDVI do ano 2008				
3-4	51,550	49,701	53,399	0
2-4	70,930	69,081	72,779	0
1-4	78,795	76,946	80,644	0
2-3	19,380	17,531	21,229	0
1-3	27,245	25,396	29,094	0
1-2	7,865	6,016	9,714	0

Na Figura 13, é ilustrada a plotagem dos dados calculados através do teste *Tukey* HSD. De acordo com os gráficos, é possível visualizar que todas as classes avaliadas em um mesmo período diferem entre si em nível $\alpha \leq 5\%$. A ordem estabelecida no gráfico refere-se aos pares com maiores contrastes em relação ao valor médio do NDVI. Os resultados indicam que, para as duas microrregiões, as observações encontradas são distintas em relação ao comportamento espectral de cada classe, sendo, portanto, passível seu uso como indicadores do comportamento da respectiva classe em toda a imagem.



(c) Ano 2008, microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Figura 13 – Plotagem da comparação pareada entre as classes, obtida pelo teste *Tukey HSD*, para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional. Elaborado pela autora.

4.2 Mapeamento através da classificação digital de imagens

A técnica de classificação digital aplicada às imagens MODIS possibilitou o mapeamento temático das microrregiões em cada data analisada. Optou-se pelo uso da imagem de 15 de outubro, respectivamente para os anos 2000, 2004 e 2008, como representativa do período anual considerado (agosto a novembro).

Os resultados obtidos pelo intermédio da classificação digital possibilitam a inferência sobre a distribuição espacial e a quantificação das classes, sendo a confiabilidade de tais informações avaliada pelo índice *Kappa* (LANDIS e KOCH, 1977).

O *Kappa* é calculado a partir dos dados de referência da matriz de erros gerada no processo de classificação digital. Os coeficientes determinados para a microrregião Serras do Sudeste são apresentados, consecutivamente, nas Tabelas 14, 15 e 16. Para todas as avaliações, foram obtidos resultados considerados excelentes, segundo a qualificação apresentada na literatura. Os elevados valores desse índice, podem ser justificados em função da baixa resolução espacial da imagem e do reduzido número de classes avaliadas.

Tabela 14 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2000 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2000							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	Σ Linha
Floresta	274	13	0	0	0	0	287
Regen.	6	163	1	0	0	0	170
Campo	0	0	145	0	0	0	145
Solo	0	0	0	188	0	0	188
Água	0	0	0	0	28	0	28
Σ Coluna	280	176	146	188	28	0	818
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
Σ Linha x Coluna	818						
Σ Linha ²	168422						
Σ Diagonal	798						
Índice <i>Kappa</i>	0,967						

Tabela 15 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2004 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2004							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	Σ Linha
Floresta	268	0	0	0	1	0	269
Regen.	2	136	0	0	0	0	138
Campo	0	4	150	3	0	0	157
Solo	0	0	3	150	1	0	154
Água	0	0	0	0	21	0	21
Σ Coluna	270	140	153	153	23	0	739
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
Σ Linha x Coluna	739						
Σ Linha ²	140211						
Σ Diagonal	725						
Índice <i>Kappa</i>	0,974						

Tabela 16 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2008 para a microrregião Serras do Sudeste, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2008							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	Σ Linha
Floresta	281	1	0	0	0	0	282
Regen.	0	136	18	0	0	0	154
Campo	0	4	143	0	0	0	147
Solo	0	0	0	153	0	0	153
Água	0	0	0	0	14	0	14
Σ Coluna	281	141	161	153	14	0	750
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
Σ Linha x Coluna	750						
Σ Linha ²	148454						
Σ Diagonal	727						
Índice <i>Kappa</i>	0,958						

As análises de exatidão para os resultados da classificação digital aplicada às imagens da microrregião Campanha Meridional estão relacionadas nas Tabelas 17, 18 e 19. Como nas matrizes anteriores, os valores das colunas constituem dados de referência, obtidos com base nas amostras tomadas durante a fase de “treinamento”

da classificação digital, no qual é produzida a amostragem referente a cada classe temática a ser considerada.

Tabela 17 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2000 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2000							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	Σ Linha
Floresta	227	0	0	0	0	0	227
Regen.	0	139	2	0	0	0	141
Campo	0	1	128	0	0	0	129
Solo	0	0	0	218	0	0	218
Água	0	0	0	0	14	0	14
Σ Coluna	227	140	130	218	14	0	729
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
Σ Linha x Coluna	729						
Σ Linha ²	135771						
Σ Diagonal	726						
Índice <i>Kappa</i>	0,994						

Tabela 18 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2004 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2004							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	Σ Linha
Floresta	238	4	2	0	0	0	244
Regen.	0	133	9	0	0	0	142
Campo	0	11	119	0	0	0	130
Solo	0	0	0	228	0	0	228
Água	0	0	0	0	19	0	19
Σ Coluna	238	148	130	228	19	0	763
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
Σ Linha x Coluna	763						
Σ Linha ²	148945						
Σ Diagonal	737						
Índice <i>Kappa</i>	0,954						

Tabela 19 – Qualidade da classificação digital de 15/10/2008 para a microrregião Campanha Meridional, avaliada pelo índice *Kappa*.

MATRIZ DE ERROS DA CLASSIFICAÇÃO – Imagem 15/10/2008							
	Floresta	Regeneração	Campo	Solo	Água	Abstenção	∑ Linha
Floresta	281	1	0	0	0	0	282
Regen.	0	136	18	0	0	0	154
Campo	0	4	143	0	0	0	147
Solo	0	0	0	153	0	0	153
Água	0	0	0	0	14	0	14
∑ Coluna	281	141	161	153	14	0	750
Cálculo do coeficiente <i>Kappa</i> das amostras							
∑ Linha x Coluna	788						
∑ Linha²	163020						
∑ Diagonal	782						
Índice <i>Kappa</i>	0,987						

A classificação digital é usada, neste estudo, no intuito de subsidiar a análise dos resultados obtidos nos mapas índice de vegetação, descritos na Seção 4.3 a seguir, sendo, posteriormente, efetuada a comparação entres tais resultados.

O método de mapeamento temático validado nessa etapa permite visualizar a distribuição espacial das classes temáticas nas duas microrregiões, bem como quantificá-las nos diferentes períodos, tornando possível uma análise preliminar sobre a evolução do comportamento das classes com relação aos processos de expansão e redução.

Nas Figuras 14 e 15 apresentam-se os mapas obtidos pelo processo de classificação digital supervisionada – algoritmo *MaxVer*, para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.

Quando comparados diretamente aos mapas índice de vegetação, deve-se considerar que nessa etapa foi alocada a classe temática “água”, a qual foi posteriormente incorporada à classe “solo sem vegetação”, para posterior extração de informações com base no produto NDVI.

As Tabelas 20 e 21 quantificam os resultados obtidos por meio do processo de classificação digital.

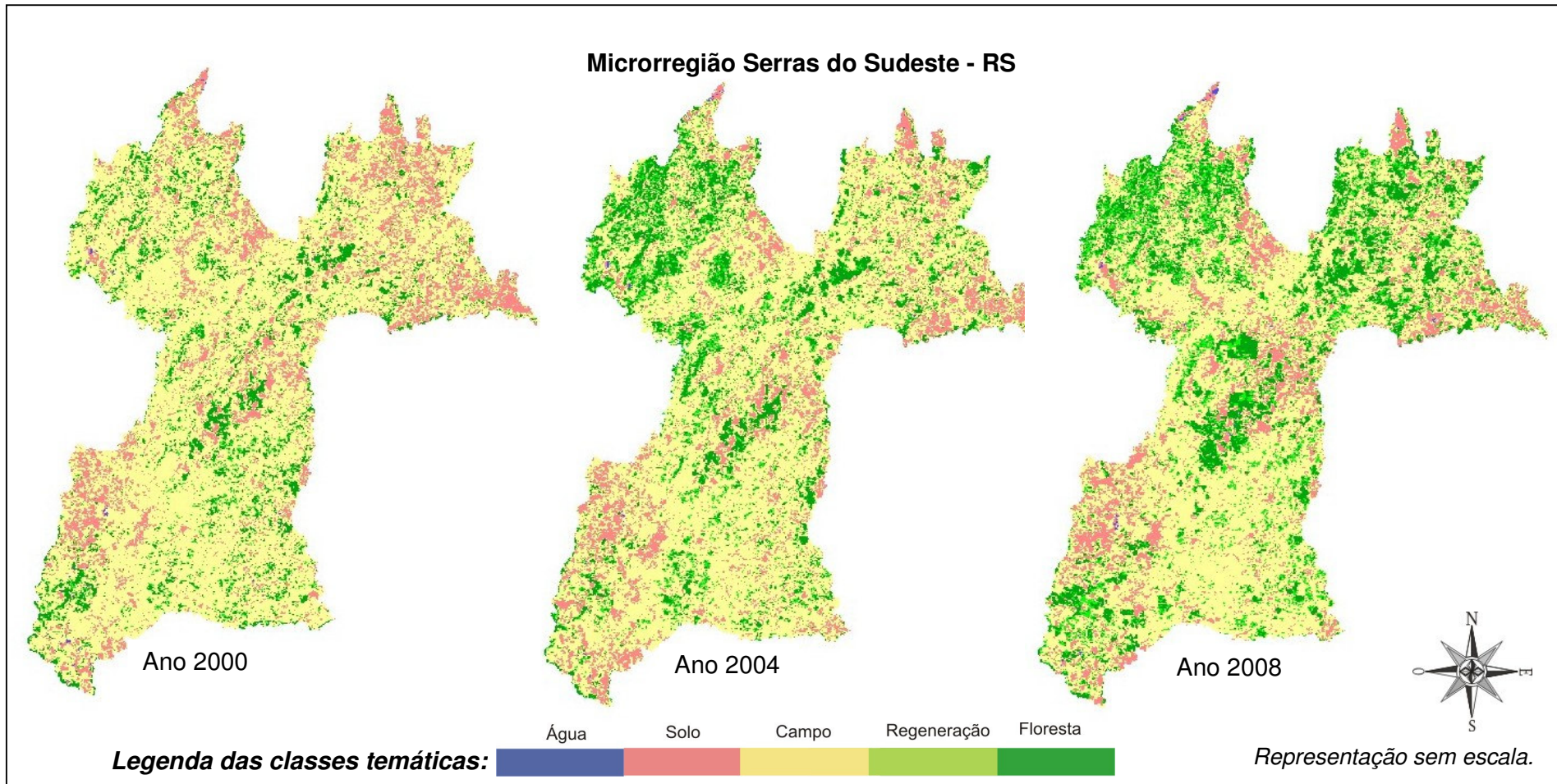


Figura 14 – Mapeamento temático obtido pelo processo de classificação digital, microrregião Serras do Sudeste em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.

Elaborado pela autora.

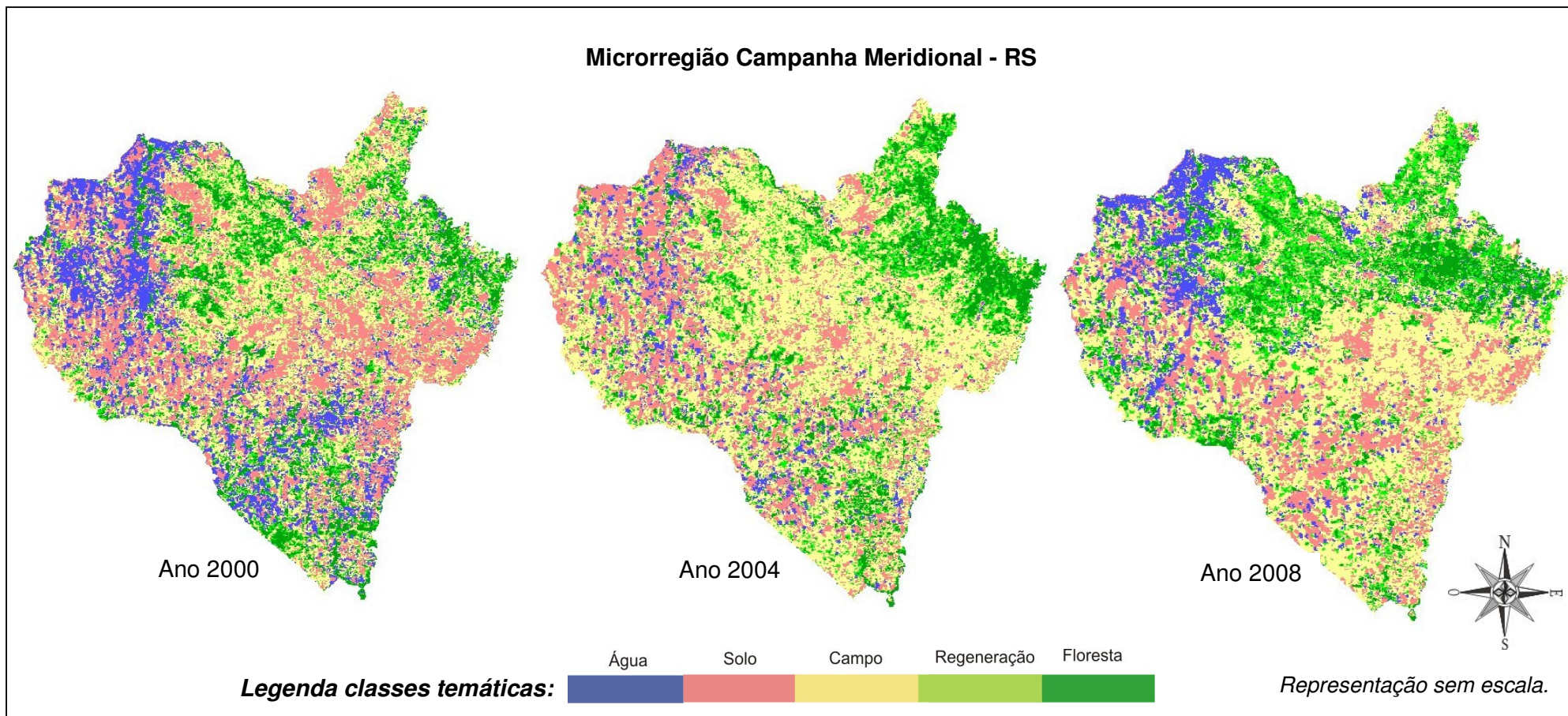


Figura 15 – Mapeamento temático obtido pelo processo de classificação digital, microrregião Campanha Meridional em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.

Elaborado pela autora.

Tabela 20 – Quantificação das classes temáticas por meio da classificação digital na microrregião Serras do Sudeste em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.

Classe	Área 2000 (ha)	Área 2004 (ha)	Área 2008 (ha)
Água	1.108,5	1.204,25	1935,25
Solo	275.985,25	254.902,0	247.096,0
Campo	1.181.038,0	1.083.206,25	992.018,75
Regeneração	52.468,75	120.950,0	175.143,75
Floresta	141.681,25	192.018,75	236.087,5
Total	1.652.281,25	1.652.281,25	1.652.281,25

Tabela 21 – Quantificação das classes temáticas por meio da classificação digital na microrregião Campanha Meridional em 15/10/2000, 15/10/2004 e 15/10/2008.

Classe	Área 2000 (ha)	Área 2004 (ha)	Área 2008 (ha)
Água	196.443,25	108.093,75	149.168,25
Solo	353.656,75	268.581,25	200.619,25
Campo	586.900,0	725.531,25	707.525,0
Regeneração	131.293,75	164.800,0	203.487,5
Floresta	157.812,5	159.100,0	165.306,25
Total	1.426.106,25	1.426.106,25	1.426.106,25

Os resultados obtidos no processo de classificação digital permitem analisar a distribuição espacial bem como quantificar as classes de uso e cobertura da terra nas áreas de estudo. Uma característica comum às duas microrregiões é a predominância da classe campo e, na mesma ordem, seguem as classes regeneração e floresta. No entanto, a ocorrência das áreas de solo e água é distinta para as duas microrregiões. Nas Serras do Sudeste, as áreas de solo compreendem áreas de agricultura em pousio nesse período do ano, mas muitas vezes constituem áreas impróprias ao uso agrícola devido à ocorrência de solos pobres e de afloramentos rochosos. Já na microrregião Campanha Meridional, quase que a totalidade das áreas de solo e água compreendem áreas de agricultura irrigada também em pousio. O plantio do arroz irrigado compreende a principal atividade econômica microrregional. É possível inferir, com relação à cobertura florestal, que nessa microrregião, de maior potencial às atividades agrícolas, a expansão das classes regeneração e floresta mostra-se menos expressiva.

4.3 Mapas índice de vegetação

Os mapas índice de vegetação foram gerados pelo processo de “fatiamento” das grades numéricas do tipo MDT (Modelo Numérico do Terreno) correspondentes às respectivas imagens NDVI do produto MOD13Q1. Os limiares usados para essa operação foram calculados em função dos limites mínimos e máximos observados para o conjunto amostral representativo de cada classe nos períodos analisados. Os respectivos valores são demonstrados nas Tabelas 22 e 23.

O coeficiente calculado para o índice de vegetação, no entanto, deve variar em uma escala compreendida entre -1 e +1, sendo que para adequação do resultado final quanto a esse índice, foi necessário normalizar as leituras obtidas na imagem, as quais compreendem valores aleatórios entre 0 e 255 níveis de cinza.

A relação de equivalência, calculada automaticamente através de uma planilha eletrônica, define que o valor de reflectância 0 equivale a um NDVI igual a -1, e o valor de reflectância 255 equivale a um NDVI igual a +1, sendo os demais valores distribuídos nesse intervalo.

Tabela 22 – Índices calculados para o fatiamento das imagens MOD13Q1 produto NDVI, microrregião Serras do Sudeste em 2000, 2004 e 2008.

Microrregião Serras do Sudeste				
	Florestas	Regeneração	Campo	Solo
Limiares de Fatiamento: NDVI ano 2000	255 a 245	244 a 241	229 a 216	190 a 160
NDVI normalizado	1,0 a 0,91	0,90 a 0,88	0,79 a 0,69	0,48 a 0,25
Limiares de Fatiamento: NDVI 2004	255 a 246	245 a 241	229 a 217	191 a 160
NDVI normalizado	1,0 a 0,92	0,91 a 0,88	0,79a 0,69	0,49 a 0,25
Limiares de Fatiamento: NDVI 2008	255 a 245	244 a 240	229 a 216	188 a 159
NDVI normalizado	1,0 a 0,91	0,90 a 0,87	0,79 a 0,69	0,47 a 0,24

Tabela 23 – Índices calculados para o fatiamento das imagens MOD13Q1 produto NDVI, microrregião Campanha Meridional em 2000, 2004 e 2008.

Microrregião Campanha Meridional				
	Florestas	Regeneração	Campo	Solo
Limiares de Fatiamento: NDVI ano 2000	255 a 240	239 a 235	231 a 221	189 a 163
NDVI normalizado	1,0 a 0,87	0,86 a 0,83	0,80 a 0,73	0,48 a 0,27
Limiares de Fatiamento: NDVI 2004	255 a 241	241 a 235	229 a 216	187 a 160
NDVI normalizado	1,0 a 0,89	0,88 a 0,83	0,79 a 0,69	0,46 a 0,25
Limiares de Fatiamento: NDVI 2008	255 a 245	244 a 240	230 a 216	185 a 159
NDVI normalizado	1,0 a 0,91	0,90 a 0,87	0,79 a 0,69	0,44 a 0,24

Segundo os resultados indicados nas Tabelas 22 e 23, observa-se que os índices definidos para as classes são distintos e podem ser usados para caracterizar diferentes tipologias de vegetação. Trabalhos de Anderson e Shimabukuro (2007) relatam um índice de vegetação (NDVI) de 0,86 para áreas florestais. De acordo com a literatura, os valores encontrados são elevados e denotam a atividade fotossintética da vegetação. Convém ressaltar que os limiares de fatiamento são definidos pelo valor médio resultante da observação das imagens referentes a um período anual e que não expressam uma única resposta espectral da célula referente à imagem de uma única data.

Embora os valores tenham sido obtidos por meio de amostragem, é possível comprovar que o comportamento de uma mesma classe é semelhante em todas as datas, e que o fatiamento das grades deu-se praticamente pelos mesmos limiares ao longo do tempo. Essa observação é válida para as duas microrregiões de estudo.

Uma consideração pertinente é a sensível diferença entre os limiares de fatiamento dos temas floresta e regeneração. Embora sejam distintos estatisticamente, esse intervalo se sobrepôs em dado momento na Campanha Meridional (0,87 para floresta em 2000 e para regeneração em 2004) o que justifica a escolha de limiares independentes para cada ano, não sendo possível a adoção de um índice NDVI genérico para uma dada classe.

Com base nesse procedimento, foram elaborados os mapas temáticos para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional. Os resultados quantificados são demonstrados nas Tabelas 24 e 25, as quais comparam, por meio da diferenças em hectares, tais valores com os resultados obtidos por meio da classificação digital.

Tabela 24 – Área total das classes de vegetação na microrregião Serras do Sudeste.

Classe	Área 2000 (ha)	Diferença (ha)	Área 2004 (ha)	Diferença (ha)	Área 2008 (ha)	Diferença (ha)
Solo s/ veget.	276.643,75	-450	256.781,25	675	249.631,25	600
Campo	1.180.112,5	-925	1.083.706,3	500	991.193,75	-825
Regeneração	53.193,75	725	120.625,0	-325	174.593,75	-550
Floresta	142.331,25	650	191.168,75	-850	236.862,5	775
Total	1.652.281,25		1.652.281,25		1.652.281,25	

Tabela 25 – Área total das classes de vegetação na microrregião Campanha Meridional.

Classe	Área 2000 (ha)	Diferença (ha)	Área 2004 (ha)	Diferença (ha)	Área 2008 (ha)	Diferença (ha)
Solo s/ veget.	550.875,0	775	377.150,0	475	349.237,5	-550
Campo	586.075,0	-825	724.906,25	-625	708.250,0	725
Regeneração	130.618,75	-675	164.150,0	-650	203.962,5	475
Floresta	158.537,5	725	159.900,0	800	164.656,25	-650
Total	1.426.106,25		1.426.106,25		1.426.106,25	

Os resultados apresentados nas Tabelas 24 e 25 permitem verificar que a quantificação das áreas, calculadas através do processo de “fatiamento” com base no índice de vegetação, apresenta valores muito próximos àqueles calculados por meio da classificação digital, se considerada a dimensão das áreas de estudo e a baixa resolução espacial do *pixel*, que representa 6,25 hectares de área no terreno.

O monitoramento dos valores do índice de vegetação ao longo da série temporal e sua respectiva associação às classes temáticas permitiram igualmente quantificar e verificar a distribuição espacial da vegetação nas duas microrregiões.

Os resultados obtidos demonstram processos de expansão na cobertura florestal bem como nas áreas de regeneração das Serras do Sudeste e Campanha Meridional. Na primeira microrregião, observa-se um acréscimo mais expressivo nas classes regeneração e floresta, se comparada à Campanha Meridional, provavelmente, devido à maior influência das atividades agropecuárias nessa última microrregião.

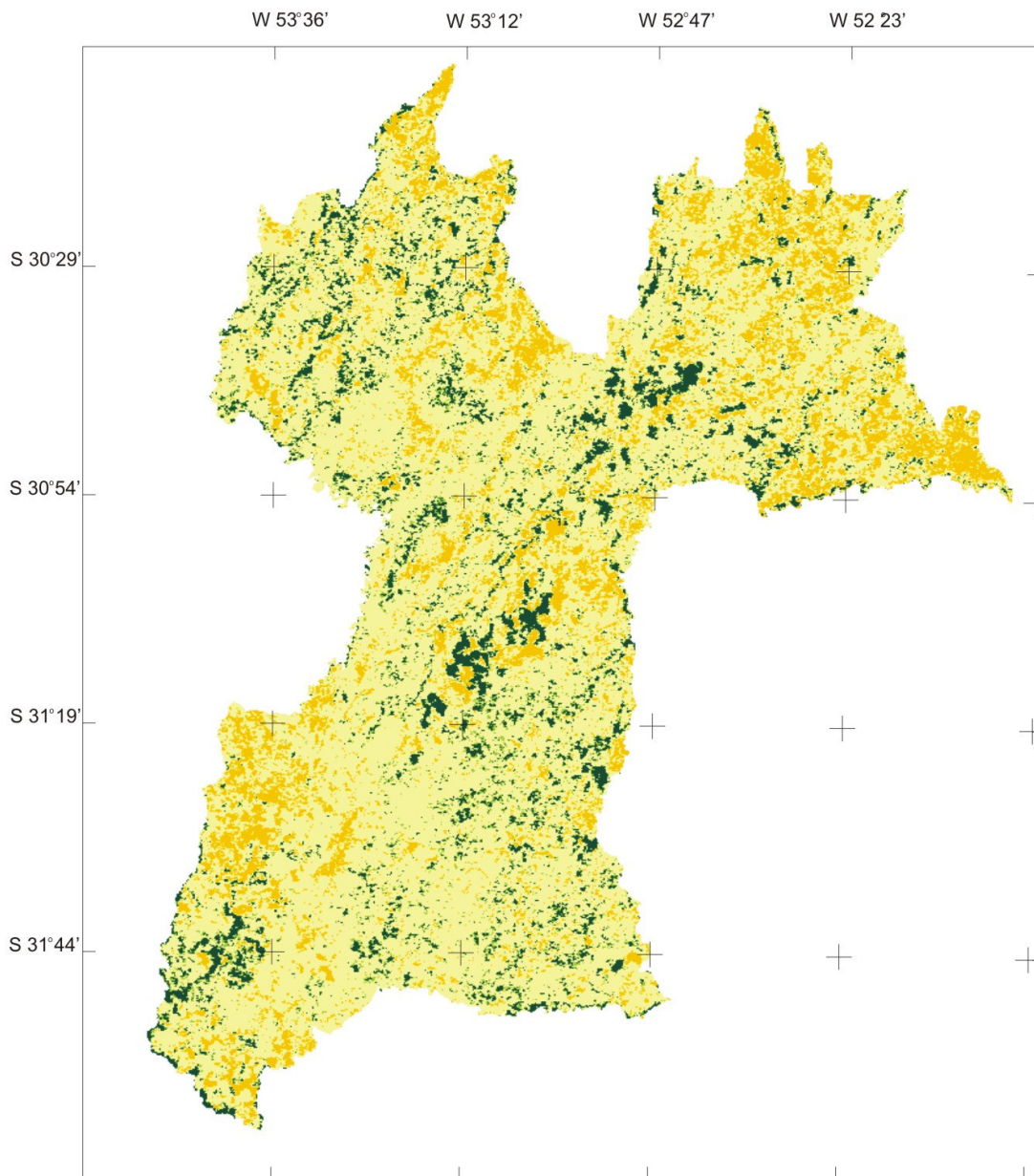
Nos mapas índice de vegetação, ilustrados nas Figuras 16, 17 e 18 para a microrregião Serras do Sudeste e nas Figuras 19, 20 e 21 para a microrregião Campanha Meridional é possível observar a espacialização da cobertura florestal.

No início do período, as duas microrregiões têm suas principais áreas florestais junto a cursos de água, caracterizando a presença de mata ciliar, e ainda em áreas de maiores declives, como nas porções noroeste das Serras do Sudeste e nas porções nordeste da Campanha Meridional.

Ao longo da série temporal é notável, através das ilustrações, a expansão das áreas de floresta; observa-se, nos anos de 2004 e principalmente 2008, o incremento em áreas de floresta plantada na porção central das Serras do Sudeste e a expressiva evolução da floresta e da regeneração na porção norte dessa mesma microrregião.

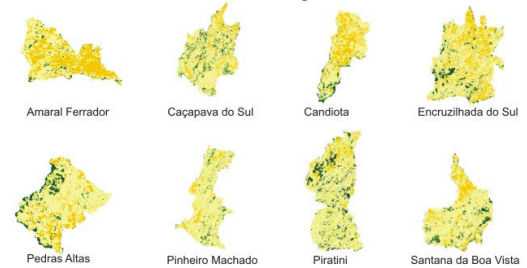
É possível observar a maior concentração da cobertura florestal e das áreas de regeneração na parte norte da microrregião Campanha Meridional; é também nessas imediações que se concentra a maior parte das florestas plantadas.

A quantificação das classes permite inferir sobre a redução das áreas de solo e campo ao longo do período, devendo, portanto, ocorrer processos de conversão de uso da terra entre tais classes, e esses serão posteriormente analisados com base no cálculo das matrizes de transição para os períodos de análise.



MICRORREGIÃO SERRAS DO SUDESTE - RS

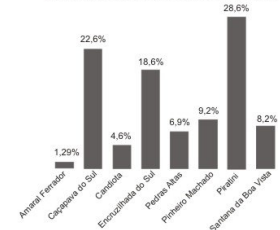
MAPA ÍNDICE DE VEGETAÇÃO: AGO - NOV/2000







LOCALIZAÇÃO DOS MUNICÍPIOS



COBERTURA FLORESTAL PERCENTUAL



DESCRIÇÃO DAS CLASSES TEMÁTICAS

DESCRIÇÃO DAS CLASSES TEMÁTICAS	ÁREAS (ha)
 classe 2: sem cobertura vegetal; solo agrícola em pousio.	276.643,75
 classe 3: gramíneas; campo nativo; pastagem extensiva.	1.180.112,5
 classe 4: regeneração e implantação florestal.	53.193,75
 classe 5: cobertura florestal de porte arbóreo.	142.331,25

SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Referência: *World Geodetic System*

ESCALA NUMÉRICA: 1:1.250.000



ESCALA EQUIVALENTE:
1 cm equivale a 50 km cinquenta quilômetros

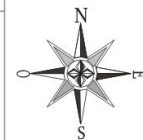


Figura 16 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2000.

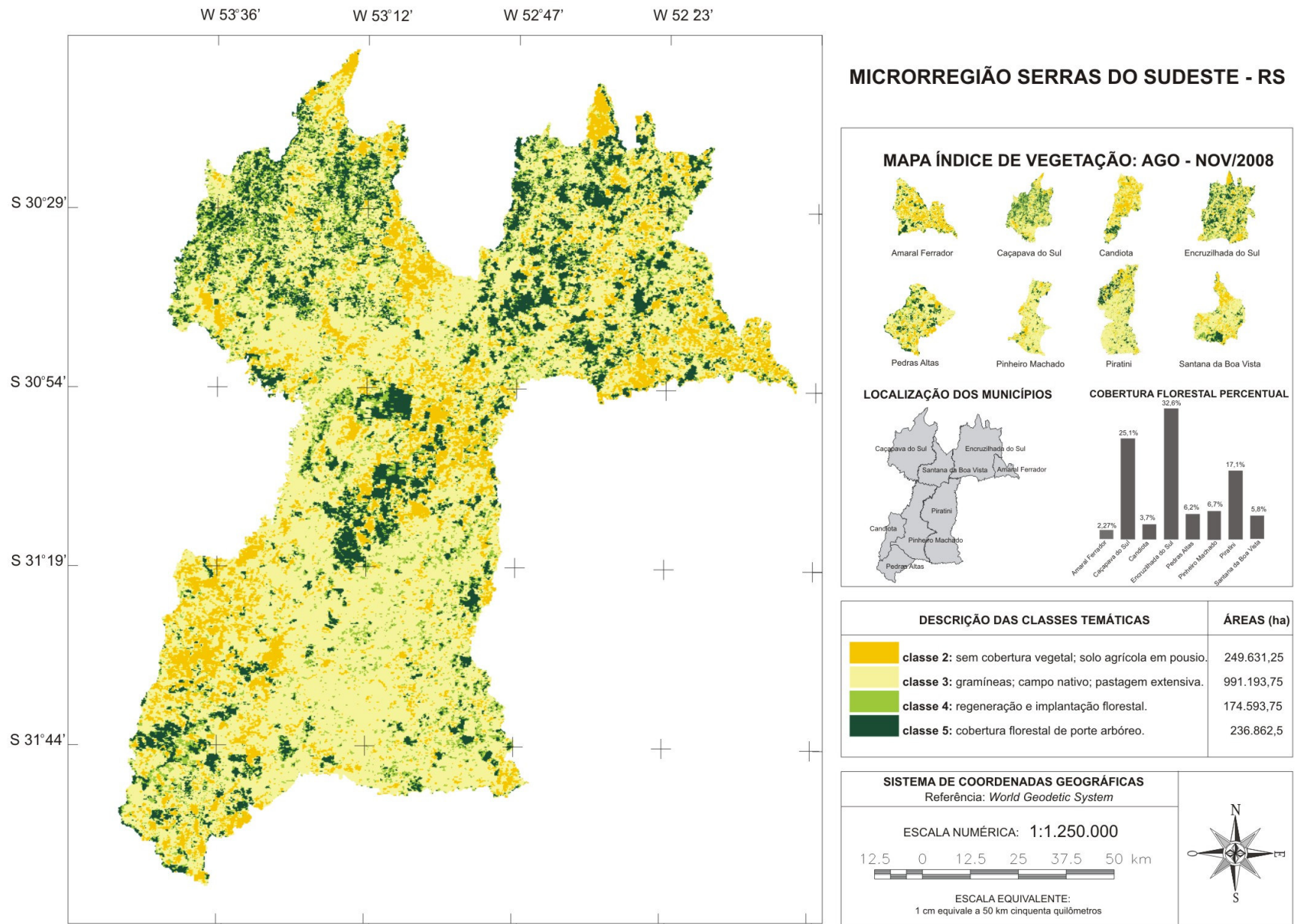


Figura 17 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2004.

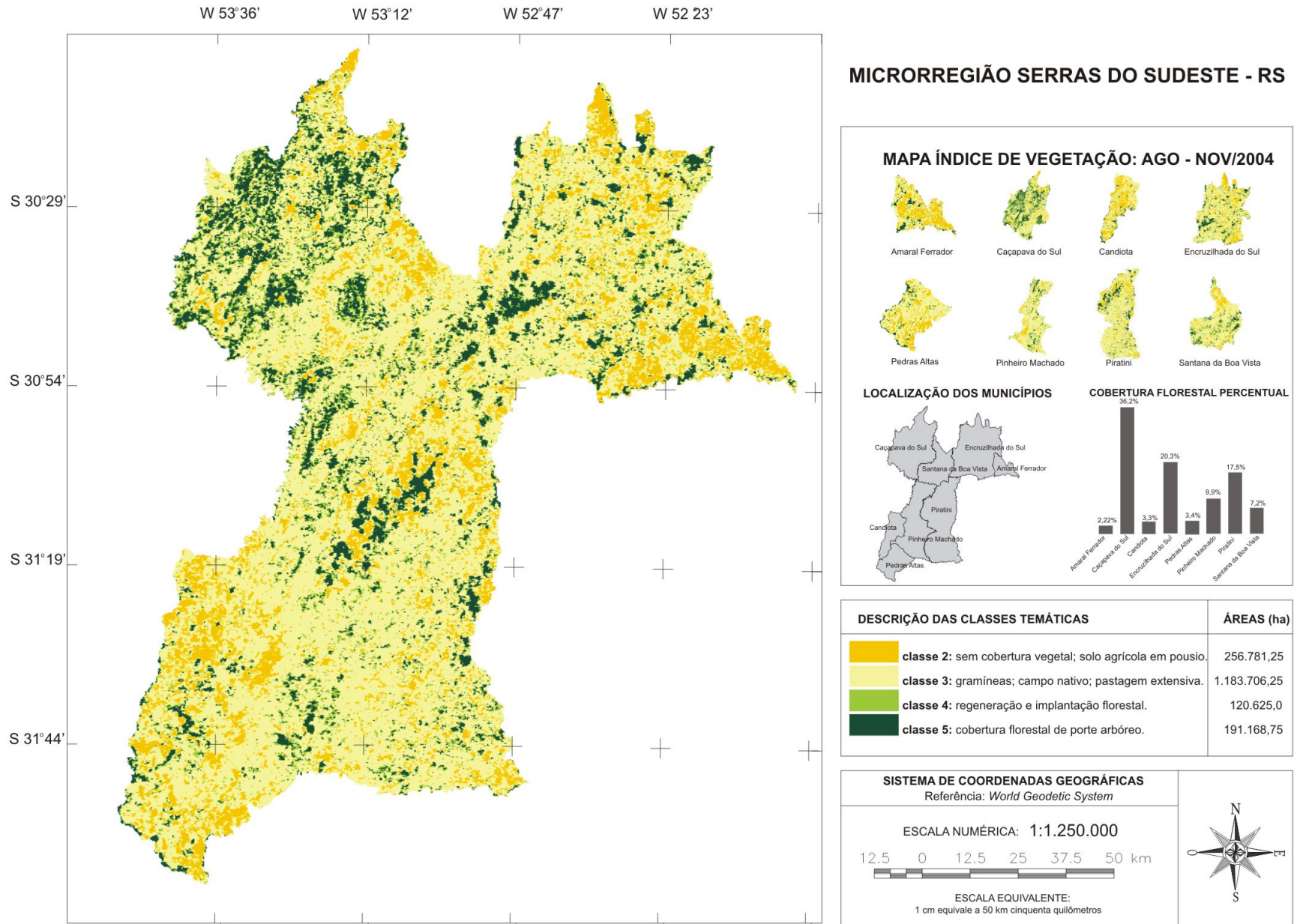
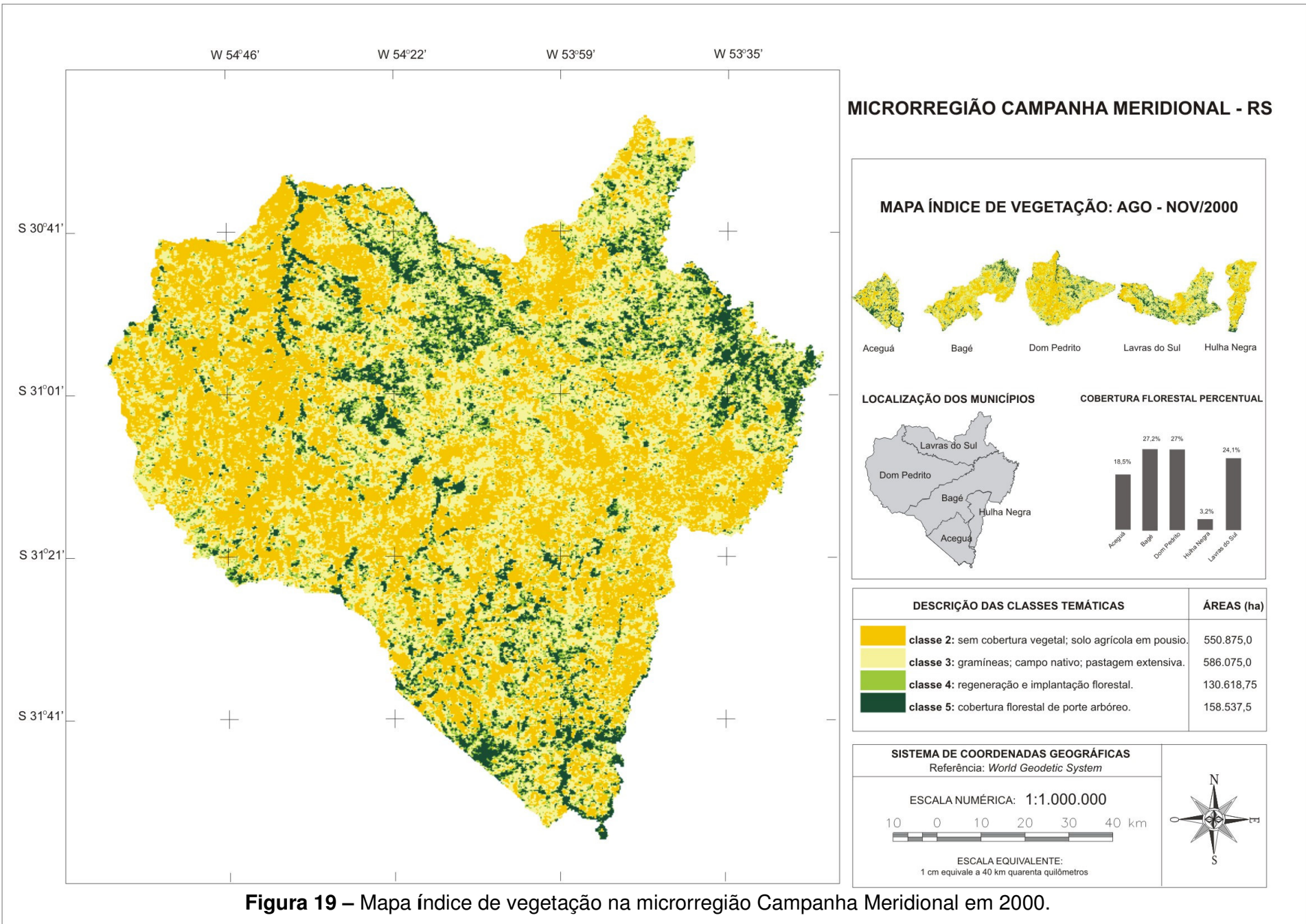
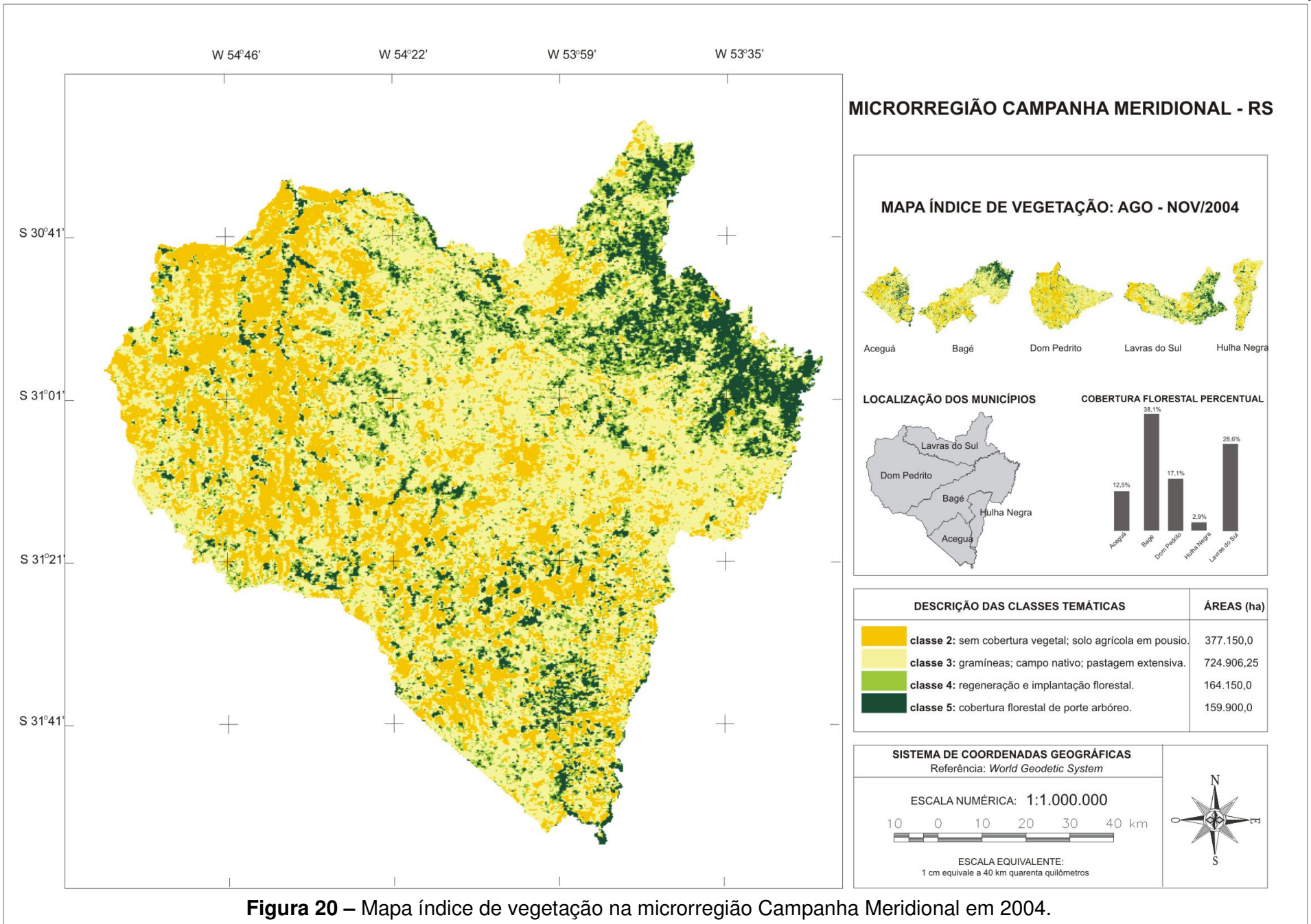


Figura 18 – Mapa índice de vegetação na microrregião Serras do Sudeste em 2008.





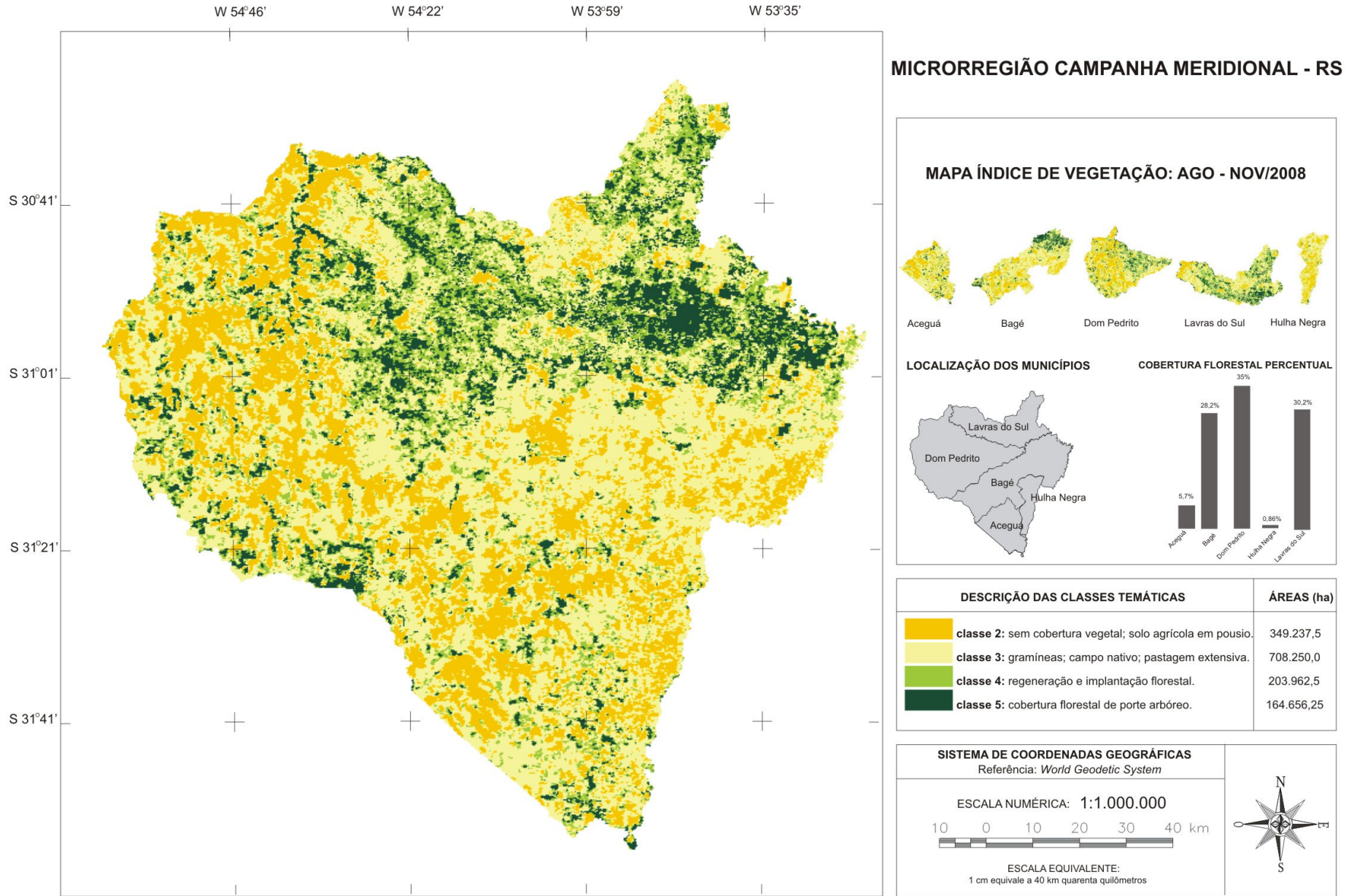


Figura 21 - Mapa índice de vegetação na microrregião Campanha Meridional em 2008.

4.4 Transições nas classes de vegetação

O processo de transição entre as classes foi analisado através de matrizes geradas no simulador Dinamica EGO. Essa etapa constitui o passo inicial para o processo de modelagem, pois ela determina os percentuais de mudança de estado de uma célula de uma determinada classe para outra classe. Embora o foco desta pesquisa esteja na análise dos processos de conversão da cobertura florestal, foram também contabilizados os processos de transição ocorridos entre as demais classes. A Tabela 26 apresenta a “*single step transition matrix*” para os dois intervalos de simulação, 2000 a 2004 e 2004 a 2008, tanto para Serras do Sudeste como para Campanha Meridional. Nessa matriz, são indicadas as taxas percentuais ao longo de todo o período de simulação (Soares-Filho et al., 2009), correspondente, nesse estudo, a quatro anos.

Tabela 26 – “*Single step transition matrix*” para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião Serras do Sudeste: 2000 – 2004				
De \ Para	Solo	Campo	Regen.	Floresta
Solo		0,475	0,012	0,025
Campo	0,099		0,075	0,069
Regen.	0,026	0,481		0,311
Floresta	0,028	0,243	0,131	

Microrregião Serras do Sudeste: 2004 – 2008				
De \ Para	Solo	Campo	Regen.	Floresta
Solo		0,419	0,038	0,085
Campo	0,112		0,085	0,095
Regen.	0,032	0,539		0,193
Floresta	0,031	0,275	0,231	

Microrregião Campanha Meridional: 2000 – 2004				
De \ Para	Solo	Campo	Regen.	Floresta
Solo		0,448	0,034	0,027
Campo	0,152		0,137	0,074
Regen.	0,066	0,458		0,236
Floresta	0,060	0,281	0,212	

Microrregião Campanha Meridional: 2004 – 2008				
De \ Para	Solo	Campo	Regen.	Floresta
Solo		0,372	0,046	0,031
Campo	0,165		0,145	0,086
Regen.	0,076	0,477		0,220
Floresta	0,060	0,327	0,274	

De acordo com a Tabela 26, é possível observar na microrregião Serras do Sudeste as seguintes taxas líquidas de expansão florestal: 2,5%, 6,9% e 31,1% entre 2000 e 2004 e 8,5%, 9,5% e 19,3% entre 2004 e 2008. Na microrregião Campanha Meridional, as taxas de expansão florestal correspondem a 2,7%, 7,4% e 23,6% entre 2000 e 2004; 3,1%, 8,6% e 22% entre 2004 e 2008. Tais percentuais se referem respectivamente às conversões de solo, campo e regeneração para floresta.

Através das matrizes de transição, foram também calculados os valores de área referentes aos processos de conversão (redução e expansão) ocorridos entre as classes durante os dois períodos de análise. Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 27.

Tabela 27 – Processos de conversão entre as classes de vegetação nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional, nos dois períodos de análise, em valores de área (ha).

Microrregião Serras do Sudeste: 2000 – 2004				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		131.418,8	3.418,75	7.025,0
Campo	116.562,5		88.843,75	82.550,0
Regen.	1.387,5	25.575,0		16.568,75
Floresta	4.050,0	3.556,25	18.700,0	

Microrregião Serras do Sudeste: 2004 – 2008				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		107.600,0	9.756,25	21.918,75
Campo	122.331,25		92.281,25	103.193,75
Regen.	3.881,25	65.087,5		23.331,25
Floresta	5.912,5	52.606,25	44.231,25	

Microrregião Campanha Meridional: 2000 – 2004				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		247.081,25	19.068,75	14.787,5
Campo	89.062,5		80.237,5	43.387,5
Regen.	8.675,0	59.887,5		30.831,25
Floresta	9.475,0	44.550,0	33.618,75	

Microrregião Campanha Meridional: 2004 – 2008				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		140.306,3	17.543,75	11.587,5
Campo	119.518,8		105.393,8	62.625,0
Regen.	12.437,5	78.243,75		36.262,5
Floresta	9.568,75	52.331,25	43.818,75	

A análise das matrizes demonstradas na Tabela 27 permite verificar a ocorrência de processos de conversão entre todas as classes durante o período de análise.

Na microrregião Serras do Sudeste, entre 2000 e 2004, segundo a matriz de transição, a redução de áreas florestais – dada pela conversão dessa classe para outras classes – totalizou 57.306,25 ha, no entanto, sua expansão compreendeu 106.143,75 ha. Na mesma microrregião, entre 2004 e 2008, a redução florestal foi quantificada em 102.750 ha, e a expansão novamente obteve área superior, sendo quantificada em 148.443,8 ha.

Na microrregião da Campanha Meridional, foi quantificada, no primeiro período, uma redução de áreas florestais de 87.643,75 ha, sendo o acréscimo calculado em 89.006,25 ha. No segundo período, entre 2004 e 2008, a redução da cobertura florestal totalizou 105.718,8 ha, sendo o seu acréscimo contabilizado em 110.475 ha.

Os valores de expansão florestal, quando agregados às áreas de manutenção florestal, representam a totalidade dessa classe em cada data de análise, comprovando o processo de evolução da cobertura florestal nas duas microrregiões.

Dentre os processos observados, destaca-se, nas duas microrregiões, as conversões da classe campo para regeneração e para floresta, denotando ser esta classe a maior responsável pela ocorrência dos processos de expansão quantificados.

Uma consideração deve ser feita com relação à classe regeneração, pois, segundo as matrizes de transição demonstradas anteriormente na Tabela 26, essa classe apresenta elevados percentuais de conversão, tanto para a classe campo, como para a classe floresta. Essa ocorrência pode ser explicada pelo fato de que parte das áreas de regeneração completam seu estágio evolutivo convertendo-se em cobertura florestal, mas parte dessas áreas sofrem interferência, sendo convertidas para áreas de campo e sendo provavelmente utilizadas para o pastoreio extensivo do gado. Ainda, verificam-se baixos índices de conversão entre regeneração e solo, e tais processos não são quantificados na matriz percentual. Essa constatação deve ser tomada com cautela, visto que a análise é realizada com base em imagens de baixa resolução espacial, mas é possível inferir que, em nível de grandes dimensões, a área ocupada pelas atividades agrícolas não cede lugar à formação vegetal sucessora nem mesmo às atividades de implantação florestal.

4.5 Modelagem dinâmica e simulações anuais

Nesta seção, é feita uma descrição sobre os principais resultados obtidos durante o processo de modelagem desenvolvido no aplicativo Dinamica EGO.

O pressuposto para a alimentação do modelo dinâmico constitui-se nos dados de entrada, os quais são: o mapa inicial, o mapa final, um arquivo de pesos de evidência e ainda um “cubo” de dados contendo os mapas de variáveis estáticas que poderão influenciar o modelo. De posse dos mapas temporais do índice de vegetação, optou-se por conduzir o processo de modelagem segmentado em dois períodos distintos, 2000 a 2004 e 2004 a 2008. Nessa concepção, foram obtidos resultados independentes para os períodos analisados bem como para as duas microrregiões. Na Seção 4.4, apresentou-se o resultado encontrado para as matrizes de transição entre as classes, calculado por meio de tabulação cruzada. Essa etapa constitui o primeiro passo para o desenvolvimento do modelo, que compreendeu seis etapas fundamentais.

O segundo processo implementado no modelo constituiu-se na geração das chamadas “faixas de distância” em relação às transições previamente determinadas nas matrizes “*single step*” e “*mult step*”. A “faixa de distância” foi, nesse caso, contabilizada de acordo com a resolução espacial do *pixel*, sendo, portanto, alocada em um intervalo de 250 metros, os quais definiram um incremento no eixo “x”.

A finalidade dessa etapa constitui-se então, na criação de faixas para as quais serão definidos pesos de evidência. Dessa forma, é estabelecida uma relação espacial entre a transição (*por ex., classe regeneração para classe floresta*) e as variáveis utilizadas no modelo, as quais compreendem as próprias classes (variáveis dinâmicas), uma vez que mudam no tempo e no espaço, e as variáveis estáticas (categóricas e contínuas).

A terceira etapa refere-se à aplicação do método dos pesos de evidência. Nessa fase, são calculados os pesos positivos de evidência (W^+) atribuídos a cada “faixa de distância”.

Os APÊNDICES G e H apresentam os valores de *W* calculados para os dois períodos de simulação para a microrregião Serras do Sudeste. Nos APÊNDICES I e J, apresenta-se o resultado obtido no mesmo procedimento para a microrregião Campanha Meridional.

O valor calculado para o peso de evidência em cada faixa de distância em relação à dada variável permite inferir sobre sua contribuição na ocorrência de uma transição. Pesos positivos de evidência favorecem a ocorrência da transição e pesos negativos, por sua vez, a repelem. Valores de pesos nulos (iguais a zero) podem ser desconsiderados, uma vez que não constituem variáveis explicativas para o modelo (SOARES-FILHO et al., 2009).

A análise dos pesos de evidência deve ser feita de forma individual para cada transição. Desse modo, sua influência pode ser visualizada com relação à distância para cada variável. Nas Tabelas 28 e 29, encontram-se relacionadas as variáveis de maior significância em relação às transições que envolvem a classe floresta nas duas microrregiões durante o período de análise, segundo o método dos pesos de evidência.

Tabela 28 – Descrição das variáveis dinâmicas e estáticas de maior influência nas transições da classe floresta na microrregião Serras do Sudeste.

Microrregião Serras do Sudeste: 2000 – 2004	
Transição	Variáveis locais (0:250m)
Solo → Floresta	<i>Distância à floresta e clinografia</i>
Campo → Floresta	<i>Distância à floresta e clinografia</i>
Regeneração → Floresta	<i>Distância à floresta e clinografia</i>
Floresta → Solo s/ veget.	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Campo	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Regeneração	<i>Distância à regeneração</i>
Microrregião Serras do Sudeste: 2004 – 2008	
Solo → Floresta	<i>Distância à floresta e rede viária</i>
Campo → Floresta	<i>Distância à floresta e clinografia</i>
Regeneração → Floresta	<i>Distância a solo s/ vegetação e clinografia</i>
Floresta → Solo s/ veget.	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Campo	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Regeneração	<i>Distância à regeneração e rede hidrográfica</i>

Tabela 29 – Descrição das variáveis dinâmicas e estáticas de maior influência nas transições da classe floresta na microrregião Campanha Meridional.

Microrregião Campanha Meridional: 2000 – 2004	
Transição	Variáveis locais (0:250m)
Solo → Floresta	<i>Distância à floresta e rede hidrográfica</i>
Campo → Floresta	<i>Distância à floresta e rede hidrográfica</i>
Regeneração → Floresta	<i>Distância à floresta e rede hidrográfica</i>
Floresta → Solo s/ Veget.	<i>Distância a solo s/ vegetação e densidade populacional</i>
Floresta → Campo	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Regeneração	<i>Distância à regeneração</i>
Microrregião Campanha Meridional: 2004 – 2008	
Solo → Floresta	<i>Distância à floresta e rede hidrográfica</i>
Campo → Floresta	<i>Distância à floresta e rede viária</i>
Regeneração → Floresta	<i>Distância à floresta e rede hidrográfica</i>
Floresta → Solo s/ Veget.	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>
Floresta → Campo	<i>Distância a solo s/ vegetação e densidade populacional</i>
Floresta → Regeneração	<i>Distância a solo s/ vegetação e rede viária</i>

Os demais resultados demonstrados em anexo mostram os valores do peso de evidência em determinada faixa de distância para cada transição considerada. Valores nulos ou não fatiados indicam a ausência de poder explicativo para a ocorrência de certa transição. Nesse sentido, ressalta-se a menor contribuição das variáveis estáticas áreas urbanas e limite de sub-bacias hidrográficas nas duas áreas de estudo.

Os resultados obtidos no processo de modelagem para as duas microrregiões, nessa etapa, foram semelhantes e indicaram que as variáveis clinografia, rede viária e rede hidrográfica são as que mais contribuem para a ocorrência das conversões que envolvem a classe floresta.

Nas conversões da classe floresta para regeneração, ocorridas no período entre 2000 e 2004 nas duas microrregiões, não foi verificada a presença de uma variável estática favorável (com peso positivo de evidência) à ocorrência dessa transição.

O quarto passo realizado no simulador Dinamica EGO constitui um processo decisivo na seleção das variáveis que constituirão o modelo, uma vez que o método implementado no aplicativo verifica a eventual dependência espacial entre as

variáveis com base nos índices de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U). Tais índices operam com valores de áreas de sobreposição entre diferentes variáveis de dois mapas, visando avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre ambos.

As tabelas a seguir apresentam os valores encontrados para os índices mencionados na modelagem das duas microrregiões. Na Tabela 30 constam as variáveis que apresentaram maiores valores quanto aos índices V e U . A decisão quanto à exclusão de uma variável do modelo teve como principal indicativo o U , pois geralmente apresenta valores superiores em relação a V .

Tabela 30 – Valores dos índices Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U) calculados para os modelos de simulação.

Microrregião Serras do Sudeste: 2000 - 2004		
Correlação entre variáveis	Cramer (V)	I. I. Conjunta (U)
<i>distance_to_3 - clinografia</i>	0,477487	0,631055
<i>distance_to_3 – dens. populacional</i>	0,436355	0,610458
<i>clinografia – dens. populacional</i>	0,491095	0,582484
Microrregião Serras do Sudeste: 2004 – 2008		
<i>distance_to_3 - clinografia</i>	0,475692	0,608879
<i>distance_to_3 – dens. populacional</i>	0,434553	0,589614
<i>clinografia – dens. populacional</i>	0,491095	0,582484
Microrregião Campanha Meridional: 2000 – 2004		
<i>distance_to_3 - clinografia</i>	0,471878	0,584026
<i>distance_to_4 - distance_to_5</i>	0,616886	0,603320
<i>clinografia – dens. populacional</i>	0,491676	0,580049
Microrregião Campanha Meridional: 2004 – 2008		
<i>distance_to_3 - distance_to_4</i>	0,496786	0,578331
<i>distance_to_3 - clinografia</i>	0,470390	0,564958
<i>clinografia – dens. populacional</i>	0,491676	0,580049

Devido aos elevados valores de Incerteza de Informação Conjunta (U), optou-se pela exclusão das variáveis *distance_to_3* (distância a campo) e *densidade populacional* do processo de modelagem da microrregião Serras do Sudeste. Para a modelagem da Campanha Meridional, foram excluídas as variáveis *distance_to_3* e *clinografia*.

A etapa final da modelagem dinâmica compreendeu gerar, com base nos processos anteriores, um mapa final simulado a partir de um mapa inicial e das demais variáveis relevantes ao modelo. Desse modo, foram gerados mapas finais “artificiais”, os quais foram equiparados aos mapas finais “reais” dos anos 2004 e 2008 (que representam o fim de cada período) e, posteriormente, comparados no cálculo de validação do modelo.

O resultado da simulação no Dinamica EGO é determinado pelos algoritmos de transição *expander* e *patcher*. O primeiro é responsável pela expansão e contração de manchas de células de uma determinada classe, já o segundo é responsável pelo surgimento de novas manchas.

Tais algoritmos são diretamente responsáveis pela alocação das classes no mapa simulado, e é de fundamental importância a calibração de seus parâmetros, que compreendem: tamanho médio de manchas, variância das manchas e isometria. Os dois primeiros são dados em unidade de área (ha) e podem ser calculados através da média aritmética simples e do cálculo da variância entre o total de manchas (polígonos) de uma determinada classe.

O índice de isometria representa um valor numérico a ser multiplicado pelo valor de probabilidade das oito células de uma dada janela de vizinhança (*por ex., de dimensão 3x3 células*), utilizada pelos algoritmos *expander* e *patcher*, antes da aplicação da regra de transição. A elevação desse índice define manchas mais compactas, em contrapartida, um índice próximo a zero ocasiona maior fragmentação. Deve-se, portanto, buscar um equilíbrio entre a compacidade e a fragmentação das mesmas.

A Tabela 31 mostra os valores calibrados para os algoritmos *expander* e *patcher* para os modelos de simulação referentes aos dois períodos analisados, bem como para as duas microrregiões.

Os valores relativos ao tamanho médio das manchas das classes foram determinados também com base na função “estatística de imagem por polígonos” implementada no aplicativo SPRING. Os valores encontrados para a variância foram desconsiderados devido à sua exorbitância. Tal fato deve-se à existência de um grande número de polígonos de valores de áreas diferentes, considerando-se a ocorrência de polígonos de apenas uma célula (6,25 ha), em vista da resolução espacial do *pixel*, e até da existência de milhares células.

Tabela 31 - Parâmetros calibrados nos algoritmos *expander* e *patcher* nos modelos de simulação para os períodos 2000 a 2004 e 2004 a 2008 nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional.

Microrregião Serras do Sudeste: 2000 - 2004					
Classe Resultante	Expander		Patcher		Isometria
	Média (ha)	Variância (ha)	Média (ha)	Variância (ha)	
Solo	71	50	71	50	1,7
Campo	60	50	60	50	1,7
Regeneração	15	50	15	50	1,7
Floresta	59	50	59	50	1,7
Microrregião Serras do Sudeste: 2004 - 2008					
Solo	64	50	64	50	1,7
Campo	64	50	64	50	1,7
Regeneração	10	50	10	50	1,7
Floresta	60	50	60	50	1,7
Microrregião Campanha Meridional: 2000 - 2004					
Classe Resultante	Expander		Patcher		Isometria
	Média (ha)	Variância (ha)	Média (ha)	Variância (ha)	
Solo	275	35	275	50	1,7
Campo	119	35	119	50	1,7
Regeneração	27	35	27	50	1,7
Floresta	53	35	53	50	1,7
Microrregião Campanha Meridional: 2004 - 2008					
Solo	195	35	195	35	1,7
Campo	148	35	148	35	1,7
Regeneração	40	35	40	35	1,7
Floresta	54	35	54	35	1,7

Para a definição de tais valores, foi também considerada a análise visual do mapa final simulado “artificial” quando comparado ao mapa final “real”. Optou-se pela manutenção dos mesmos parâmetros (em hectares) tanto para *expander* quanto para *patcher*, visto que os processos de transição (acréscimo ou redução de uma determinada classe) apresentavam comportamento semelhante quanto aos dois algoritmos. A coerência dos valores definidos pôde ser validada pelo índice de similaridade *fuzzy*, descrito na seção a seguir.

4.6 Validação do modelo de simulação

Os resultados do processo de simulação foram avaliados com base no método adaptado de similaridade *fuzzy*, no qual se calcula o índice de similaridade baseado na diferença resultante entre dois produtos: o mapa real subtraído do mapa inicial e o mapa simulado subtraído do mapa inicial. Os algoritmos compreendem a função de decaimento constante e a de decaimento exponencial. A diferença calculada deve espacializar os erros, que incluem omissões (áreas em que houve mudanças, porém não aparecem na simulação) e comissões (áreas em que não houve mudanças, mas que aparecem como tal no mapa simulado). Com base nos índices de similaridade, é definida a utilização ou não do modelo para a simulação de prognósticos.

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 ser superiores quando comparados aos índices de concordância rígida. O índice tende a ser maior quanto maior 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 (FERRARI, 2008).

O uso de índices de concordância por múltiplas resoluções para avaliação da qualidade de modelos dinâmicos justifica-se pela impossibilidade de reproduzir situações passadas com total exatidão espacial, devido à aleatoriedade inerente a alguns processos de transição das classes da paisagem.

Almeida (2008) encontrou valores de similaridade *fuzzy* entre 0,83 e 0,85 para avaliação por múltiplas resoluções em modelos de simulação de dinâmica em áreas urbanas. Ximenes et al. (2008) ao validar em modelos dinâmicos para a simulação de desmatamento na Amazônia, encontram índices entre 0,87 e 0,9 para resoluções entre 3x3 e 13x13. Já Ferrari (2008) obteve, para o mesmo método, valores de similaridade entre 0,44 e 0,84 para modelos de simulação da dinâmica de uso e cobertura da terra.

Na Tabela 32, estão relacionados os índices de similaridade obtidos pelo método de *fuzzy* na avaliação dos resultados simulados para os mapas finais referentes aos dois períodos nas duas microrregiões consideradas.

Tabela 32 – Índices de similaridade *fuzzy* calculados através das funções de decaimento constante e decaimento exponencial para distintos tamanhos de janela.

Modelo de Simulação	Janelas (<i>pixels</i>)	Índice de Similaridade (<i>fuzzy Location</i>)	
Microrregião Serras do Sudeste			
	<i>Função de Decaimento</i>	<i>Constante</i>	<i>Exponencial</i>
2000 – 2004	3 x 3	0,762676	0,640118
	5 x 5	0,917401	0,712383
	7 x 7	0,975643	0,730954
	9 x 9	0,994111	0,735038
	11 x 11	0,998692	0,735753
2004 – 2008	3 x 3	0,816313	0,693575
	5 x 5	0,946071	0,754280
	7 x 7	0,986544	0,767219
	9 x 9	0,996626	0,769452
	11 x 11	0,999242	0,769855
Microrregião Campanha Meridional			
	<i>Função de Decaimento</i>	<i>Constante</i>	<i>Exponencial</i>
2000 – 2004	3 x 3	0,874396	0,756833
	5 x 5	0,973913	0,803786
	7 x 7	0,995317	0,810747
	9 x 9	0,999128	0,811613
	11 x 11	0,999789	0,811720
2004 – 2008	3 x 3	0,863741	0,741647
	5 x 5	0,968742	0,791208
	7 x 7	0,994082	0,799416
	9 x 9	0,999102	0,800560
	11 x 11	0,999777	0,800678

De acordo com a literatura, os resultados obtidos são considerados satisfatórios, tanto para os períodos avaliados como para as duas áreas de estudo.

Essa afirmativa é plausível, sobretudo, porque o método de validação implementado no Dinamica EGO desconsidera as células que não sofrem alteração de estado. Assim sendo, constitui-se em um método rigoroso de avaliação, pois se elimina a possibilidade de superestimar esse índice em função da grande quantidade de células que não sofrem mudança de estado no fim do período.

4.7 Simulação de cenários futuros

A simulação de mapas *a posteriori*, ou a geração de cenários futuros, através do Dinamica EGO é válida quando feita sob um modelo calibrado e que, de fato, represente adequadamente os processos de transição decorridos no intervalo temporal considerado, segundo o resultado obtido na validação.

Nesse estudo, foram simulados prognósticos para as duas microrregiões e, com base na resolução temporal escolhida, que compreendeu um intervalo total de oito anos, é viável efetuar projeções confiáveis até o ano de 2016, tomando-se, portanto, como mapa de uso inicial os mapas “reais” do ano de 2008.

Essa etapa do modelo consistiu em novamente efetuar o quinto passo da modelagem, no qual foram mantidos os valores numéricos para os algoritmos *expander* e *patcher* relacionados na Tabela 31.

Como resultado, as saídas do modelo constituem mapas que descrevem o processo anual de mudança nos estados da paisagem, gerados simultaneamente a cada iteração do programa.

As Figuras 22 e 23 ilustram a projeção dos mapas de vegetação nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional ao longo do período de oito anos, sendo que o primeiro mapa apresentado corresponde ao mapa “real” do ano de 2008, usado como entrada no modelo.

Optou-se pela visualização das ilustrações na respectiva paleta de cores “*pseudocolor*” comumente utilizada pelo aplicativo Dinamica EGO. Uma característica do simulador é a não manutenção da paleta de cores adotada inicialmente no Spring pelo modelador quando gerados os mapas temáticos.

Para sua correta interpretação, é necessário então a associação à respectiva legenda de cores das classes, dada pela sequência abaixo:

	Floresta
	Regeneração
	Campo
	Solo

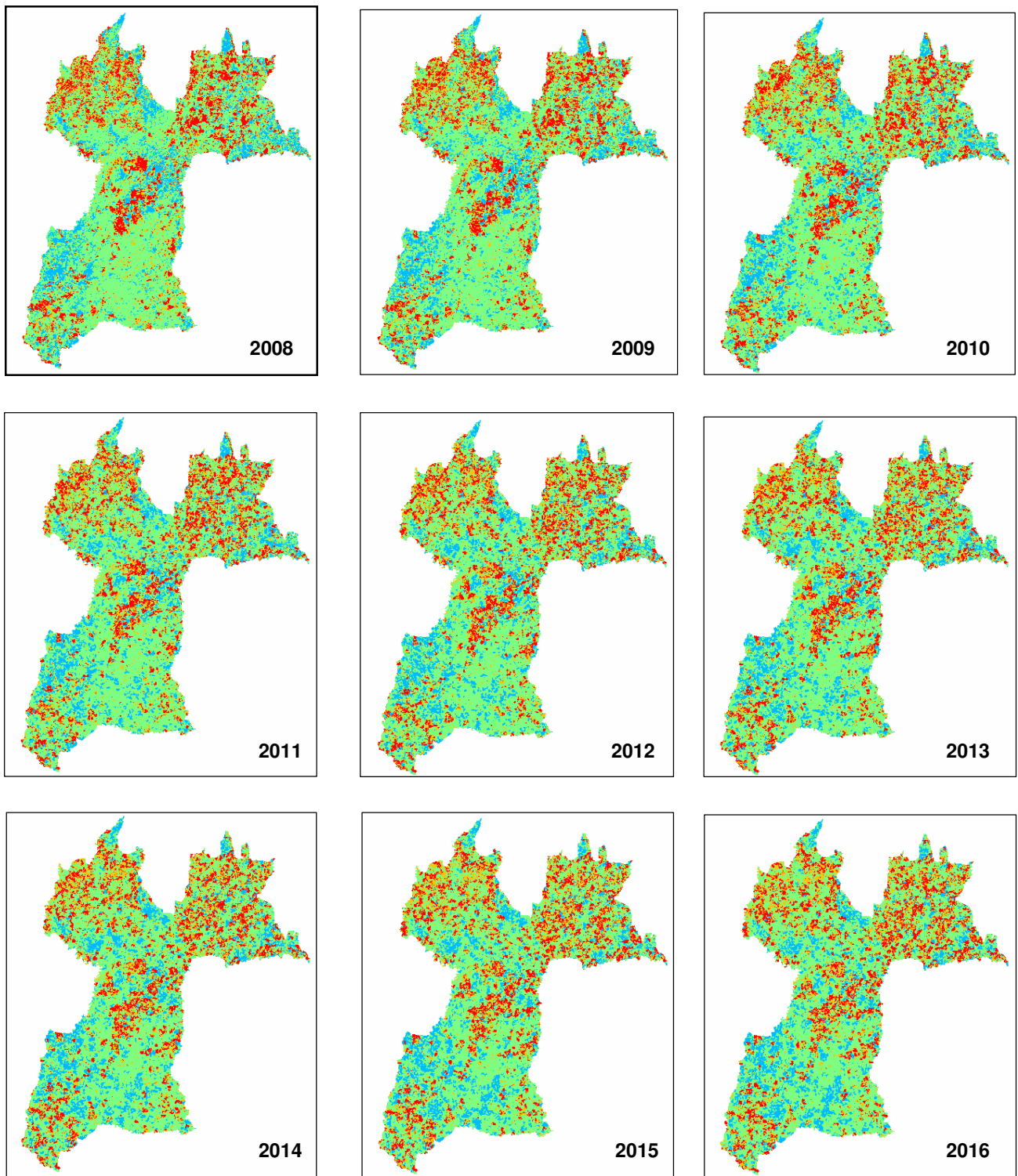


Figura 22 - Resultado da simulação anual entre 2008 e 2016 para a microrregião Serras do Sudeste.

Elaborado pela autora.

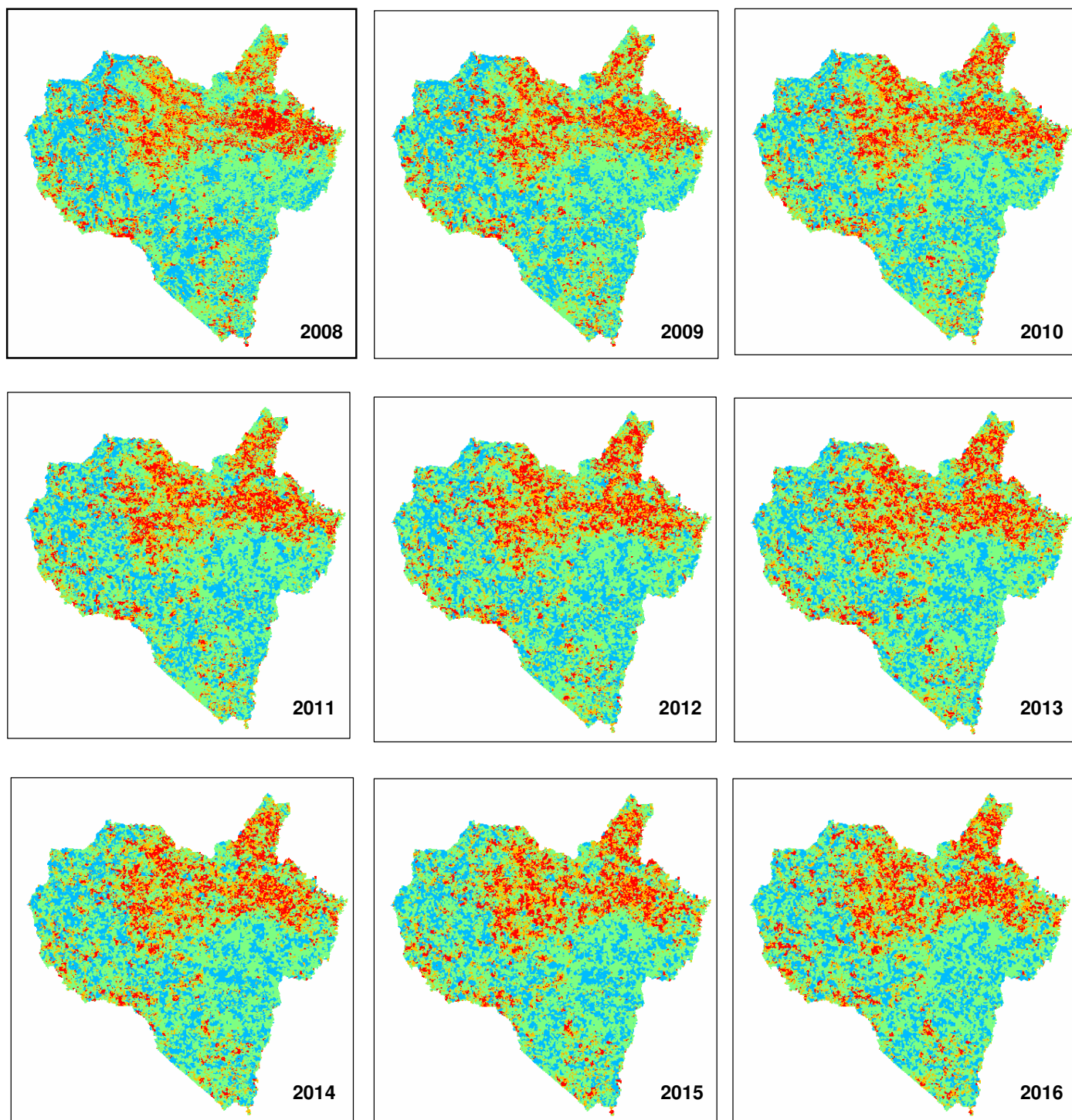


Figura 23 - Resultado da simulação anual entre 2008 e 2016 para a microrregião Campanha Meridional.

Elaborado pela autora.

A obtenção dos mapas simulados para um período de oito anos permite quantificar as taxas de conversão entre as classes de vegetação, bem como os processos de expansão e redução. Nas Tabelas 33 e 34, são apresentados os resultados para os anos de 2012 e 2016, respeitando o intervalo temporal de quatro anos considerados na modelagem das microrregiões.

Tabela 33 – Área total das classes de vegetação simuladas na modelagem da microrregião Serras do Sudeste.

Classe	Serras do Sudeste			
	Área 2012 (ha)	Transição 2008 - 2012 (ha)	Área 2016 (ha)	Transição 2012 - 2016 (ha)
Solo	245.018,75	-4.612,5	241.056,25	-3.962,5
Campo	963.731,25	-27.462,5	953.956,25	-9.775,0
Regeneração	185.106,25	10.512,5	189.856,25	4.750,0
Floresta	258.425,0	21.562,5	267.412,5	8.987,5
Total	1.652.281,25	-	1.652.281,25	-

Tabela 34 – Área total das classes de vegetação simuladas na modelagem da microrregião Campanha Meridional.

Classe	Campanha Meridional			
	Área 2012 (ha)	Transição 2008 - 2012 (ha)	Área 2016 (ha)	Transição 2012 - 2016 (ha)
Solo	330.637,5	-18.600,0	322.025,0	-8.612,5
Campo	708.950,0	700,0	709.587,5	637,5
Regeneração	212.950,0	8.987,5	216.487,5	3.537,5
Floresta	173.568,75	8.912,5	178.006,3	4.437,5
Total	1.426.106,25	-	1.426.106,25	-

Segundo as Tabelas 33 e 34, a cobertura florestal das microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional, assim como as áreas de regeneração, serão continuamente expandidas até o ano de 2016.

Na microrregião Serras do Sudeste, esse acréscimo está atrelado às áreas de campo e de solo agrícola, uma vez que é prevista a redução gradual nas duas

classes até o fim do período de simulação. Nas análises realizadas para a microrregião Campanha Meridional, a cobertura florestal apresenta menor potencial de expansão. Tal fato pode ser justificado pela expressiva área agrícola. No entanto, segundo o modelo de simulação, a tendência é de que, se forem mantidas as mesmas condições, a área agrícola seja continuamente reduzida até o ano de 2016.

A matriz de transição (Tabela 35) calculada entre o ano de 2008, referência para a modelagem, e o ano de 2016 relaciona os processos de conversão (previstos na simulação) entre as classes.

Tabela 35 – Processos de conversão entre as classes de vegetação nas microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional entre 2008 e 2016, em valores de área (ha).

Microrregião Serras do Sudeste: 2008 – 2016				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		116.187,5	9.768,75	32.400,0
Campo	142.025,0		85.400,0	119.887,5
Regen.	4.037,5	97.287,5		35.231,25
Floresta	3.718,75	96.600,0	56.650,0	

Microrregião Campanha Meridional: 2008 – 2016				
<i>De \ Para</i>	Solo	Campo	Regeneração	Floresta
Solo		158.462,5	16.018,75	9.787,5
Campo	135.412,5		102.643,75	66.806,25
Regen.	12.525,0	89.775,0		48.900,0
Floresta	9.118,75	57962,5	45.062,5	

Segundo o modelo de simulação, a matriz de transição descreve que 187.518,75 ha de áreas das classes solo, campo e regeneração serão convertidos para a classe floresta no período de oito anos nas Serras do Sudeste, e 156.968,75 ha de florestas serão convertidos para as demais classes de vegetação. Na microrregião da Campanha Meridional, a simulação prevê um total de 125.493,75 ha a serem convertidos para floresta, e sua redução é quantificada em 112.143,75 ha.

As Figuras 24 e 25 descrevem a evolução da cobertura florestal no período compreendido entre 2000 e 2016; o gráfico representa a área total da cobertura

florestal quantificada em cada data de análise, juntamente com o processo de expansão ocorrido durante os intervalos temporais de quatro anos.

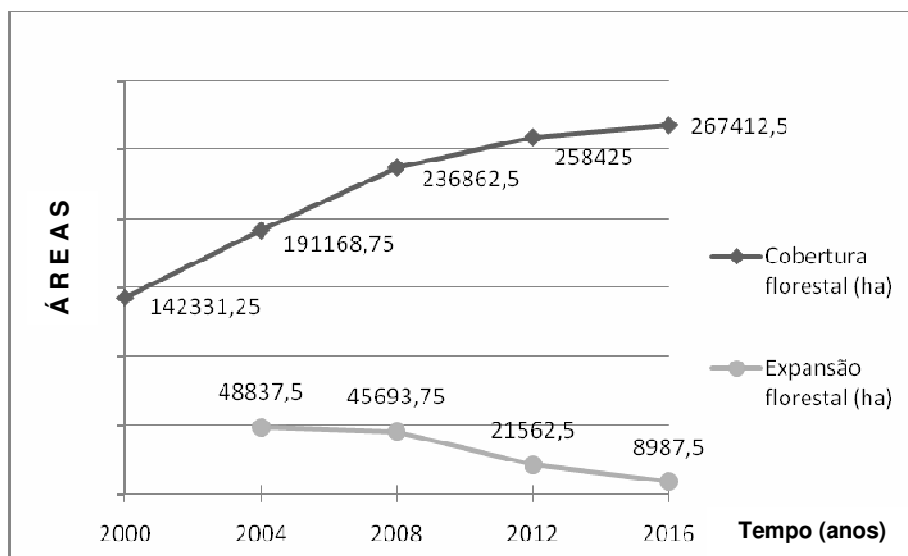


Figura 24 – Evolução da cobertura florestal na microrregião Serras do Sudeste.

Elaborado pela autora.

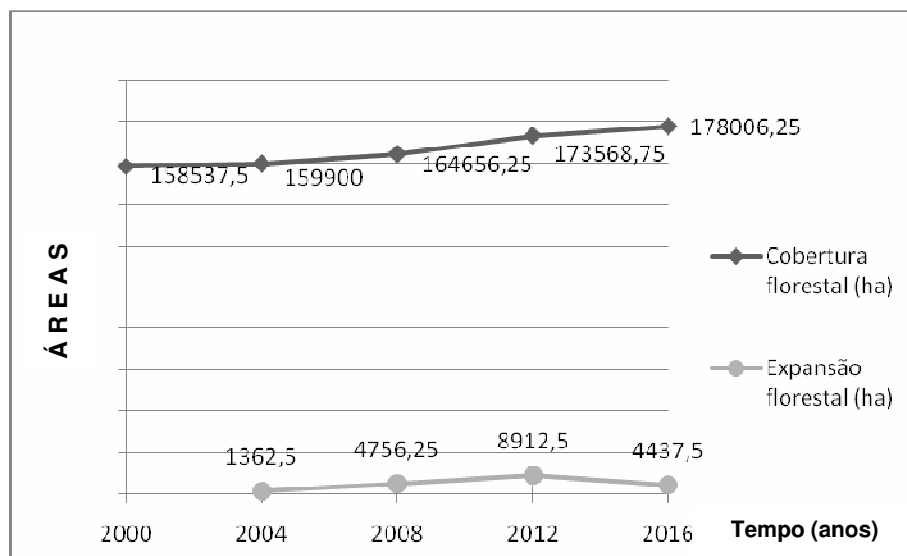


Figura 25 – Evolução da cobertura florestal na microrregião Campanha Meridional.

Elaborado pela autora.

Os prognósticos simulados para as Serras do Sudeste e Campanha Meridional vêm somar-se aos estudos que prevêm a expansão da cobertura florestal no estado do Rio Grande do Sul.

Segundo dados do Inventário Florestal Contínuo (Rio Grande do Sul, 2001), o estado possui uma área de 4.932,927 ha de florestas naturais em estágios iniciais, médios e avançados de sucessão, as quais representam 17,44% da superfície do território gaúcho, seus resultados demonstram uma evolução florestal em torno de 12% em um período de 18 anos.

O avanço na área florestal constitui a realidade de boa parte dos municípios gaúchos atualmente. Tal ocorrência pode ser atribuída às restrições impostas pela legislação ao corte da vegetação em áreas de preservação permanente e de reserva legal, promovendo a evolução das áreas de regeneração para estágios avançados. Soma-se a isto a incorporação de novas áreas, devido à silvicultura de gêneros como o *Eucalyptus* em regiões tradicionalmente agrárias, como as áreas de estudo. Hendges (2007) descreve um aumento das áreas de regeneração e de floresta para o estado do Rio Grande do Sul no ano de 2020, ocasionado principalmente pela introdução de espécies exóticas.

No entanto, os resultados simulados para as microrregiões Serras do Sudeste e Campanha Meridional, no período de 2008 a 2016, apresentam tendência linear quanto aos processos de expansão da cobertura florestal. Tal afirmativa pode ser comprovada através da análise visual dos gráficos ilustrados nas Figuras 24 e 25.

Essa tendência expressa, segundo o modelo de simulação, o qual considera a manutenção das condições impostas no início do período, que o acréscimo da área florestal devido às taxas de conversão entre as demais classes e ela deve atingir níveis de estabilidade ao fim do período. Esse comportamento difere-se da significativa expansão constatada através da elaboração dos mapas “reais”, equivalentes aos períodos de 2000 a 2004 e 2004 a 2008, principalmente na microrregião Serras do Sudeste.

Esse fato é justificável, uma vez que se trata de um período histórico para as duas microrregiões, no qual as conversões de uso e cobertura da terra mostraram-se mais significativas tanto pelo abandono das áreas de pastagem extensiva devido à queda do preço pago pela carne bovina ao longo dos anos, como pelo surgimento das áreas de florestamento com espécies exóticas.

5 CONCLUSÃO

5.1 Mapeamento utilizando o NDVI do sensor MODIS

A metodologia empregada possibilitou utilizar as imagens do sensor MODIS, produto MOD13Q1, para obterem mapas de vegetação referentes às microrregiões de estudo. Desse modo, o monitoramento do NDVI, na série temporal, permitiu efetuar a respectiva associação às classes de uso e cobertura do solo, sendo possível distinguir os limiares para floresta, regeneração, campo e solo sem vegetação. Embora estes limiares indicativos das classes de vegetação tenham sido variáveis ao longo do tempo, se comparados sob uma mesma data de análise, apresentaram valores estatisticamente distintos.

Dessa forma, é possível afirmar que valores de referência quanto ao NDVI podem ser usados para distinguir temas ou classes de uso e cobertura do solo em imagens de baixa resolução espacial (250 m), no entanto, é necessária a adoção de valores distintos e independentes com relação à base temporal.

Os mapas temáticos de vegetação, produzidos com base nesse método, puderam ser utilizados como base para a modelagem dinâmica espacial, uma vez que neles foram alocados corretamente os processos de transição (redução e expansão) da cobertura florestal e das demais classes adotadas.

Limitações ao uso desse sensor residem na impossibilidade de se distinguir corretamente áreas de florestamento de espécies exóticas de áreas de floresta nativa. Em conformidade com a escala e resolução espacial adotadas nessa pesquisa, tais temas foram generalizados, pressupondo-se que, por vezes, as áreas de silvicultura foram dispostas na classe floresta e, outras vezes, em função de seu estágio vegetativo, foram dispostas na classe regeneração.

É de fundamental importância o preenchimento desta lacuna para o melhor entendimento dos processos de evolução da cobertura florestal nas duas microrregiões e sua possível extensão para demais áreas da Metade Sul. Para tal, sugere-se a averiguação com base em imagens de maior resolução espacial bem como a possibilidade de correlação com dados de campo.

5.1.1 Mudanças na cobertura florestal

Os mapas elaborados nessa pesquisa indicam que a cobertura florestal passou de 8,6% para 11,6% e 14,3% em relação à área total da microrregião Serras do Sudeste, respectivamente nos anos 2000, 2004 e 2008. Na Campanha Meridional, os índices de expansão da cobertura florestal foram quantificados em 11,1%, 11,2% e 11,5% em relação à área total dessa microrregião nos anos de 2000, 2004 e 2008. Embora a representação da cobertura florestal nos mapas temáticos tenha sido generalizada, a expansão florestal é dada de duas formas distintas.

A primeira atribui-se ao estabelecimento da regeneração e posterior formação florestal nativa observada, na maioria das vezes, ao longo da rede de drenagem, em áreas de maior declividade e, muitas vezes, em áreas anteriormente utilizadas para a atividade agropecuária. Os produtores, algumas vezes por falta de investimentos, deixam de explorar áreas agrícolas permitindo que estas se regenerem.

Embora esta expansão represente o cumprimento da legislação vigente quanto às Áreas de Preservação Permanente (APP), ela está, por vezes, associada negativamente ao abandono de áreas agricultáveis, à diminuição de renda da população local e ao êxodo rural. A legislação para proteção ambiental e as práticas de fiscalização, com o passar dos anos, tornaram-se mais rigorosas; a aplicação das multas e mesmo a conscientização da população contribuem para a manutenção e acréscimo dos recursos florestais.

A segunda forma de expansão florestal está atrelada à introdução de espécies exóticas, principalmente dos gêneros *Eucalyptus*, *Pinus* e *Acacia* por meio de florestamentos e reflorestamentos. Tal conversão de uso da terra nas microrregiões vem a suprir a demanda de matéria prima por parte de empresas privadas, sobretudo as do setor de celulose e papel, fortalecendo o setor industrial e movimentando a economia local.

Em muitas propriedades rurais, a prática da silvicultura vem sendo empregada na forma de consórcio com culturas agrícolas e com a pecuária (sistemas agrossilvipastoris), acenando como uma fonte alternativa de renda para os produtores.

5.2 Simulações através de modelagem dinâmica

Os modelos dinâmicos demonstram ser uma eficiente ferramenta para monitorar processos de conversão das classes de vegetação; tal afirmativa pode ser comprovada pelos indicativos fornecidos nas matrizes de transição que compõem o modelo. Na construção desse modelo, puderam ser incorporadas variáveis julgadas importantes à dinâmica da cobertura florestal nas microrregiões de estudo e, com base nos resultados obtidos através do método dos pesos de evidência, foi possível definir que a distância à floresta e à clinografia, exercem maior influência nos processos de expansão da cobertura florestal; já a distância à classe solo e à rede viária contribuem para a redução florestal (desmatamento) na microrregião Serras do Sudeste. Na microrregião da Campanha Meridional foi possível definir, através desse método probabilístico, que a distância à floresta e à rede hidrográfica são as variáveis que mais contribuem para a expansão florestal. Para o desmatamento, as maiores influências são também exercidas pela distância à classe solo e à rede viária nessa microrregião.

A metodologia adotada possibilitou simular cenários de prognósticos que explicitam a intensidade e a localização de mudanças na cobertura florestal até o ano de 2016, através de saídas (mapas) anuais. Os resultados previstos indicam que a cobertura florestal na Serras do Sudeste passará de 15,6% no ano de 2012 para 16,8% da área total dessa microrregião no ano de 2016. Na microrregião Campanha Meridional, a expansão é menos expressiva, passando de 12,2% no ano de 2012 para 12,5% no ano de 2016. Tais valores sugerem, com relação às duas microrregiões, a estabilidade da expansão florestal. Contudo, para esta análise, é necessário considerar que o modelo simula tendências, válidas somente se forem mantidas as mesmas condições em relação às variáveis investigadas. Nesse sentido, sugere-se, para estudos posteriores, a avaliação não só de variáveis físicas mas também socioeconômicas e mesmo políticas inerentes à região de estudo.

5.3 Principais contribuições e aplicações desta pesquisa

As áreas sob as quais foram realizados os experimentos de modelagem vivenciam recentes processos de conversão nos padrões de uso do solo, uma vez

que a floresta passa a ser um tema em expansão nessa paisagem. Neste sentido, a execução de simulações baseadas em modelagem dinâmica são oportunas, já que requerem a investigação de processos históricos ocorridos nas áreas de estudo.

De modo geral, a Metade Sul do Estado é uma região carente de informações e pesquisas científicas que levem em consideração a dinâmica de sua paisagem ao longo do tempo. E, recentemente, com a retomada do crescimento econômico, tais estudos tornam-se ainda mais relevantes e pertinentes.

Quanto ao monitoramento da cobertura florestal em grandes áreas, este constitui um avanço científico e tecnológico viabilizado após o surgimento dos primeiros instrumentos sensores a bordo de satélites. No Brasil, pesquisas espaciais em escala regional são em sua maioria, voltadas ao monitoramento do desmatamento. Dessa forma, espera-se que os resultados gerados nessa pesquisa venham contribuir ao campo das ciências florestais, especialmente em pesquisas voltadas a estudar a incorporação de áreas florestais no Rio Grande do Sul, e também ao campo da modelagem dinâmica espacial, uma vez que propõe a incorporação de mapas de vegetação na execução dos modelos.

Quanto à simulação, projetar cenários futuros para a cobertura florestal poderá ser útil na identificação de tendências de ocupação nas microrregiões de estudo. Tais informações poderão dar subsídio ao poder público local em ações de ordenamento e gestão territorial, definindo locais para o desenvolvimento de obras de infraestrutura; utilizá-las como instrumento para fiscalização do cumprimento da legislação florestal, promover o incentivo à proteção de florestas nativas e o desenvolvimento de ações de recuperação ambiental. Também os órgãos ambientais poderão utilizar-se desse mapeamento para analisar áreas de maior potencial para o desenvolvimento e supressão de áreas de regeneração e de floresta em função da ocupação humana.

Empresas privadas do setor florestal, organizações não governamentais, sindicatos rurais e produtores rurais compõem a relação de setores beneficiados com os estudos de modelagem, por exemplo, para aquisição de novas áreas de plantio, no planejamento para implantação florestal, para verificar a disponibilidade de produtos madeireiros e para o estudo de locais potenciais ao desenvolvimento florestal.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. P. D. **Modelagem de Mudanças de Uso e Cobertura do Solo na Amazônia:** Questões Gerais. In: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap4modelosLUCC.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2008.

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

ALMEIDA, C. M. de. Monteiro, M. V. M.; CÂMARA, G. **Modelos de Dinâmica Urbana:** Conceitos, Derivação de Relações, Calibração, Exemplos. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/Cap3_Modelos_Urbanos_Versao_Nova.pdf. Acesso em: 20 jan. 2009.

ALMEIDA, C. M. de.; MONTEIRO, A. M. V. CÂMARA, G. Modelos de Simulação e Prognósticos de Mudanças de Uso do Solo Urbano: Instrumento para o Subsídio de Ações e Políticas Públicas Urbanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM PLANEJAMENTO URBANO E REGIONAL, 11., 2005, Salvador. 2005. **Anais...** Salvador: ANPUR, 2005. p. 1-21.

ALMEIDA, C. M. de.; MONTEIRO, A. M. V. CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L.; BATTY, M. Modelos Celulares de Dinâmica Espaço-temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G. ALMEIDA, C. M. de. (Org.) **Geomática:** Modelos e Aplicações Ambientais. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 447 - 496.

ALMEIDA, C. M. de.; GLERIANI, J. M.; CASTEJON, E. F.; SOARES-FILHO, B. S. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**. EUA, v. 22, n.9, p. 943-963, 2008.

ALVES, D.S.; JANETOS, A. C.; KRUG, T.; SKOLE, D.L. **Mudanças no Uso e Cobertura de Terras.** In: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. São José dos Campos: INPE, 2002. Disponível em: <<http://www.lba.cptec.inpe.br/lba/port/explan/lanp.htm>>. Acesso em: 21 jun. 2009.

ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Monitoramento da cobertura terrestre: fenologia e alterações antrópicas. In: RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. **O Sensor MODIS e Suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

ARANOFF, S. **Geographical Information Systems: a management perspective**. Ottawa: WDL Publications, 1989. 294p.

BACA, J. F. M; NETTO, A. L. C; MENEZES, P. M. L. De. Modelagem da dinâmica da paisagem com Processos de Markov. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G. ALMEIDA, C. M. de. (Org.) **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 447-496.

BAKER, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, Amsterdã v. 2, n. 2, p. 111-133, 1989.

BELL, E. J.; HINOJOSA, R. C. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes. **Socio-Economic Planning Science**. New York, v. 11, p. 13-17, 1977.

BERTALANFFY, L. von. An outline of general systems theory. **British Journal of the Philosophy of Science**, v. 1, p. 134-165, 1951.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. 1.ed. Virginia: Regional Research Institute, West Virginia University, 2000.

BURROUGH, P. A.; McDONNEL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford: Clarendon Press, 1998. 333p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. de. Princípios básicos em Geoprocessamento. In: ASSAD. E. D. ; SANO E. E. (Org.). **Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1998. p. 3-11.

CONGALTON, R. G. A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, vol. 54, p. 1669-1671, 1992.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 136 p.

CORONEL, D. A.; ALVES, F. A.; SILVA, M. A. Notas sobre o processo de desenvolvimento da Metade Sul e Norte do Estado do Rio Grande do Sul: uma abordagem comparativa. **Perspectiva Econômica**. São Leopoldo, vol. 3, n. 2, jul - dez. 2007.

CRÓSTA, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DE BIASE, M. **A Carta Clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção**. São Paulo: Instituto de Geografia/ USP, 1992. p. 45-53.

DELGADO, S. A distribuição de probabilidade dos retornos das ações no Brasil: uma abordagem não-paramétrica. **Revista de Econometria**, Rio de Janeiro, vol. 15, n. 1, abril - out. 1995.

DRUCK, S. CARVALHO, M. S.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 209 p.

EASTMAN, R. J. Tradução Português. Hasenack, H.; Weber, E. IDRISI for Windows versão 2. **Manual do Usuário**. Versão Digital. Introdução; Exercícios Tutoriais. Porto Alegre: Centro de Recursos Idrisi, Brasil, 1998. 218p.

FEE. FUNDAÇÃO DE ECONOMIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.fee.tche.br/sitefee/pt/content/capa/index.php>. Acesso em 08 jul. 2009.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS. Disponível em: <http://www.empraba.gov.br>. Acesso em 17 mar. 2009.

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.

GONÇALVES, A. D; SOUZA JÚNIOR, W. C; ALMEIDA, C. M. de. **Modelagem de alteração de uso e cobertura da terra em uma porção do município de Mineiros-GO utilizando o método de pesos de evidência**. São Paulo: INPE, 2007. Disponível em: <http://mtc-m17.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007>. Acesso em: 10 out. 2007.

GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L.T. **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. 488p.

GREMONINI, L.; VICENTINI, E. **Autômatos Celulares: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações**. Curitiba: UNICENTRO, 2008. Revista Eletrônica. Disponível em: http://web03.unicentro.br/especializacao/Revista_Pos/CE-Autom.pdf. Acesso em 02 ago. 2009.

HAGEN, A. Fuzzy Set Approach to Assessing Similarity of Categorical Maps. **International Journal of Geographical Information Science**, Palma, v 17. n. 3, p. 235-249, 2003.

HAYKIN, S. **Redes Neurais: princípios e práticas**. Porto Alegre: Bookman, 2000. 900 p.

HENDGES, E. R. **Modelos estocásticos da dinâmica da paisagem florestal e simulação de cenários para o Estado do Rio Grande do Sul no período de 1988 a 2020**. 2007. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

HIDROWEB – Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 18 out. 2008.

HUETE, A.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K., LEEUWEN van W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. Maryland Heights, v. 59, p. 440-451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.; GAO, X.; FERREIRA, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**. Maryland Heights, v. 83, p. 195-213, 2002.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 26 jun. de 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://www.inpe.br>. Acesso em: 10 mai. 2009.

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.

JUSTICE, C.O.; et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Ann Arbor, v. 36, n. 4, p.1228-1247, 1998.

LANDIS, J.R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**. New York, v. 33, n.1, p.159-174, 1977.

LAZZAROTO, D. R. Sensoriamento Remoto. In: FATORGIS. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.fatorgis.com.br>>. Acesso em: 15 nov. 2005.

LAZZAROTTO, D. R. "O que são geotecnologias". 2002. Disponível em: <<http://www.fatorgis.com.br>>. Acesso em: 19 set. 2008.

LETT, C.; SILBER, C.; BARRET, N. Comparison of a cellular automata network and an individual-based model for the simulation of forest dynamics. **Ecological Modelling**. New York, v.121, n.2-3, p.277-293, 1999.

MAGUIRE, D.; GOODCHILD, M.; RHIND, D. **Geographical information systems: principles and applications**. New York: John Wiley and Sons, 1991. 1096 p.

MATSUMOTO, M. H.; BITTENCOURT, M. D. Correlação entre Algumas Fisionomias de Cerrado, no Vale do Paraíba e Classes de Índices de Vegetação Obtidos Espectralmente. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais....** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p 1665 - 1672.

MAZZA, C. A. S. **Distribuição espacial da bracatinga na região metropolitana de Curitiba com imagens de satélite Landsat**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 23p. (Documentos, 44).

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. rev. e ampl. Viçosa: UFV, 2005. 307p.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura – RS, 1961. 42p.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. 2008. Disponível em: <http://www.nasa.gov/>. Acesso em: 11 nov. 2008.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 308p.

PEDROSA, B. M. **Ambiente Computacional para Modelagem Dinâmica Espacial**. 2004. 111p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

PEDROSA, B.M.; CAMARA, G. Modelagem Dinâmica e Sistemas de Informações Geográficas. In: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G. ALMEIDA, C. M. de. (Org.). **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. p. 237-280.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul: ensaio de monografia natural**. Porto Alegre: Imprensa Oficial, 1942. 456 p.

RECHIUTI, L. V. **Processamento de Imagens Digitais**. São José dos Campos: INPE – CTA, 1996. 59p.

REIS, G. M.; RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Ferramentas Estatísticas Básicas da Qualidade - guia prático do R**. 2007. Disponível em: <http://www.estatísticanor.xpg.com.br>. Acesso em: 15 jan. 2010.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analyses: an introduction**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 340p.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado, Secretaria do Meio Ambiente. **Inventário Florestal Contínuo**. Disponível em: <http://coralx.ufsm.br/ifcrs/index.php>. Acesso em: 11 jan. 2010.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000. 220p.

ROCHA, J.; SOUSA, P. M; TENEDÓRIO, J. A. Geosimulação e Análise Espacial: Redes Neurais e Autômatos Celulares na Previsão de Alterações nos Padrões de Uso e Ocupação do Solo. **Inforgo**, Lisboa, v. 16, n. 17, p.123-137, 2001.

ROSENDO, J. dos S. **Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na Bacia do Rio Araguari – MG – utilizando dados do sensor MODIS**. 2005. 130f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

ROUSE, J. W.; HARRS, R. W.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J.C. Monitoring the Vernal Advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of Natural vegetation. NASA/GSFC. Type III Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371p.

RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. **O Sensor MODIS e Suas Aplicações Ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 423 p.

SABINS, F.F. **Remote Sensing: principles and interpretation**. 3. rd. New York: W. F. Freeman and Company, 1999. 494p.

SANTOS, O. I. B. et al. Perspectivas de desenvolvimento sustentável da Metade Sul do Rio Grande do Sul com base nos arranjos silvícolas emergentes e na produção de etanol a partir de celulose. In: Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 9, 2007, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ENGEMA, 2007. p. 1-17.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, M. A. C. de. **Análise de Regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2 ed. Santa Maria: FACOS, 2009. 294p.

SILVA, D. A. da. **Sistemas Sensores Orbitais**. São José dos Campos: INPE – CTA, 1995. 69 p.

SILVA, A. de B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: Conceitos e fundamentos**. Campinas: UNICAMP, 2003. 236 p.

SILVA, E. T. J. B. **Utilização dos índices de Vegetação do Sensor MODIS para Detecção de Desmatamentos no Cerrado: Investigação de Parâmetros e Estratégias**. 2004, 146 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

SKOLE, D. L. Data on global land-cover change: acquisition, assessment, and analysis. In: MEYER, B. W.; TURNER, L. B. (Org.). **Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 537p.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SOARES FILHO, B. S. DINAMICA – Um software para simulação de dinâmica de paisagens. **Anais do II Workshop em Tratamento de Imagens, NPDI/DCC/UFMG**, 2001.

SOARES-FILHO, B.S., PENNACHIN, C.; CERQUEIRA, G. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v.154, p. 217-234, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; CERQUEIRA, G. C.; COSTA, W. L. S.; ARAÚJO, W. L.; OLIVEIRA, L. B. R. Software Dinamica EGO: Environment for Geoprocessing Objects. CSR/UFMG. Versão 1.2.1. 2005

SOARES-FILHO, B. S. Análise de Paisagem: Fragmentação e Mudanças. Disponível em:<<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/centrorecursos/relacionadas/dinamica.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2005.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; VOLL E. Modelagem de Dinâmica de Paisagem: Concepção e Potencial de Aplicação de Modelos de Simulação Baseados em Autômato Celular. **Megadiversidade**. Belo Horizonte, v. 3, n. 1-2, p. 1-16, 2007.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; LELLES, W. **Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO**. 1. ed. Belo Horizonte: CSR, 2009. v. 1. 115 p.

TURNER, B.L.; MEYER, W. B.; SKOLE, D. Global land-use/land cover change: Towards an integrate study. **Ambio**, Londres, v.23, n.1, p. 91-95, 1994.

VENTURIERI, A.; SANTOS, J.R. dos. Técnicas de classificação de imagens para análise da cobertura vegetal. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Org.). **Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1998. p. 351-371.

XIMENES A, de C.; ALMEIDA, C. M. de.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. de. Modelagem Dinâmica do Desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 14, n. 3, p. 370-391, 2008.

WOLFRAM, S. **Theory and Applications of Cellular Automata**: Including. New York: Selected Papers,1986.

7 APÉNDICE

APÊNDICE A – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	251	243.5	225	190
2	245.5	242.5	224	184
3	253	241	228	186.5
4	248	241.5	225	189
5	251.5	243	228	187
6	254	242.5	228.5	160
7	250.5	242	227	164
8	253	241	221	162.5
9	248	241	229	179.5
10	245	244	228	190
11	252	241	228.5	190
12	249	243	228.5	185
13	247.5	244	223	171
14	245	244	226.5	172
15	254	243.5	222	187
16	255	243	229	160
17	252.5	242	228	160.5
18	253	241.5	226	160
19	245	243	228	172
20	254	243.5	225	162.5
21	252	244	226.5	179
22	246	243	224.5	183
23	253	244	223.5	182.5
24	246.5	243.5	220	182.5
25	245	243	221	181
26	245	244	219	168
27	252	243	224.5	190
28	245	242.5	218	165
29	245	243	220.5	160
30	247	241	226.5	179
31	253	241	228.5	189
32	245	243	220.5	161
33	252.5	244	226	165
34	253	241	223.5	184.5
35	254	243.5	219	186
36	247.5	241	222.5	179.5
37	253	243	227.5	173
38	248	244	226.5	188
39	251	242	222.5	164
40	251	244	227.5	178.5
41	254.5	244	223.5	165
42	245	243.5	218	170.5
43	254	243.5	227.5	167.5
44	254.5	244	225.5	173
45	252	241	219.5	182
46	254	244	222	177.5
47	245	244	218.5	170
48	250	243	227	181
49	253.5	244	219.5	164.5
50	252	243.5	226	185

APÊNDICE A – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	251	243.5	218	183
52	251	244	216	175
53	253	244	217.5	186.5
54	245	243	219.5	189
55	252	242.5	228	187
56	254	242	225	168
57	251	244	222	164
58	248	241	218.5	162.5
59	248	241	218	179.5
60	252.5	242	218.5	190
61	252	241.5	218.5	190
62	253	243	219	180
63	246	242.5	223	170
64	246	244	217	172
65	245	243.5	220	188
66	245	244	221	161
67	245	242	223	162
68	254	241.5	225.5	163.5
69	248	242	228	172
70	246	241.5	226	162.5
71	252.5	244	218	179
72	252	243.5	223	188
73	253	243	223.5	189
74	248	242.5	222.5	182.5
75	246	244	228	184
76	245	244	219.5	167
77	253	241	219	168
78	252	241	216.5	166
79	245	242	224	161
80	247.5	242	224	179
81	253	242.5	226	189
82	245	241	220.5	161
83	253.5	244	224	164.5
84	248	241	225	184.5
85	245	244	222.5	186
86	249	241	218	189
87	253	243	218	173
88	254	243.5	220	185
89	250.5	242	218	164
90	251	244	218.5	178.5
91	253.5	243.5	216.5	165
92	245	243	221	170.5
93	254.5	243.5	223	167.5
94	254.5	244	226	173
95	254	241	222.5	162
96	253	243.5	222	177.5
97	247	244	227	188
98	249.5	243	224	181
99	251.5	242.5	225	164.5
100	252	243.5	227	184

APÊNDICE B – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	251	245	222	179
2	254	241	229	168
3	254	242	229	160
4	248	245	224	160
5	254.5	242	218	165
6	254	242.5	225	181
7	253	245	224.5	184.5
8	252.5	245	228	163
9	254	244	224	191
10	253	244	225	173
11	253	244	223	164
12	250	243	221	175
13	253	244.5	229	175
14	254.5	241	217	190
15	254	241.5	227	186
16	246	245	229	191
17	254.5	241	219	163
18	250	244	222	190
19	252	242	224	189
20	251	242.5	224.5	163
21	254	242	229	186
22	254.3	242.5	228.5	170
23	254	244	220	163.5
24	250	242.5	221	191
25	254	244.5	228	186
26	252	242	226.5	188
27	254.5	241	227	173
28	250	243	224	164
29	251	244	228	184
30	254.5	241	227.5	165
31	254	245	225	191
32	249	244	222	187
33	253.5	242	221	177
34	248	244	223.5	168.5
35	246	242	219	169.5
36	253	244	224	186.5
37	246	244.5	226.5	175
38	251	243	224.5	190
39	247	244	224	172
40	254	241	225.5	187.5
41	252.5	241.5	218	166.5
42	253	241	222	167
43	254	241	228	168
44	253.5	244	225.5	190
45	254.5	243	226.5	189.5
46	254	244	226.5	186
47	252	241	219	188.5
48	254.5	242	224	180.5
49	246	243	219	167
50	248	244	224	191

Continua...

APÊNDICE B – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	253	241	218.5	180
52	254	242	220	170
53	254.5	242	217	163
54	246	243	218	164
55	247	242	219	166
56	248	243	225	181
57	249	243	224	184.5
58	252	243.5	220.5	174.5
59	250	242	221	184
60	249	241.5	218	174
61	246	243	223	163
62	251	244	221	175
63	248.5	243	225	175
64	249	243.5	217	189
65	249.5	241	226	186
66	254	244.5	219	191
67	250.5	243.5	218	165
68	252	243	221	191
69	252	244.5	224	189
70	253.5	241	222	163
71	251	242.5	229	186
72	249.5	242	218.5	170
73	246	243	220	166
74	249	243	221.5	190
75	248	243.5	217	187
76	246	241	218	191
77	249	243	226	173
78	248	242	223.5	163
79	250	245	219.5	184
80	250	242	225	163
81	246	244	219	191
82	249	244	224	191
83	253	241.5	225	177
84	252	244	220	168.5
85	254	244	223	162.5
86	251	244	218	186.5
87	246	242.5	219	184.5
88	246	243	219	187
89	247.5	242.5	224	172
90	249	243	225	187
91	251	245	219	166.5
92	254	242	222	167.5
93	247	243.5	221	168
94	246	244	226	190.5
95	248	243.5	219	190
96	247	244	226	186
97	249	245	217	168
98	252	244	227	180.5
99	251	243	225	167
100	249	245	226	165

APÊNDICE C – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	253	244	216	170
2	245	240	226	171
3	253	240.5	218	186
4	248	240	216	161
5	250.5	241	225	175
6	252	244	222	161
7	251	243	218	185
8	249	243	223	174
9	248	244	224.5	162
10	254	242.5	218	188
11	252	240	216	180
12	254.5	244	229	166.5
13	245	244	227	166
14	245	243	220	187.5
15	254	242.5	225.5	175
16	245	240	216.5	171
17	254	240	219	161
18	250.5	242	218	177
19	253	240	223	161
20	250	243	223	161.5
21	253	240.5	225.5	188
22	252	244	226	176
23	249	240.5	216.5	174
24	245.5	244	227	161.5
25	254.5	243	218	161
26	246	243	219	187
27	254	243.5	220	171
28	246	243	218	159
29	254	242	228	179
30	253	241	221	164
31	252	242.5	221	161
32	251	242	222.5	188
33	248	241	220.5	164.5
34	254	240	226	188
35	252	244	221.5	167
36	254	244	218	188
37	254.5	241	220	173.5
38	249	243	218	166
39	248	244	220	184.5
40	249	241	217	160.5
41	254.5	241	217.5	188
42	253.5	240.5	221	180.5
43	250.5	241.5	219.5	180
44	250.5	240	216	188
45	250	240	224	185
46	253	242	218.5	168
47	254	241	228.5	174
48	252	242	222	162
49	254.5	243	228	176.5
50	253	244	216	170

Continua...

APÊNDICE C – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Serras do Sudeste.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	248	244	217	175.5
52	245	244	216	170
53	245	241	226	171
54	247	240.5	218	186
55	250	241.5	220	163
56	250.5	240	222	175
57	252	243	224	164
58	252	243.5	218.5	185
59	254	243	223	174
60	246	243	224	171.5
61	254.5	242	218.5	188
62	252	240	217.5	180
63	249	241	218.5	186
64	254	244	226	166
65	249.5	244	224.5	170.5
66	251	242	225	175
67	254	241	218.5	171
68	245	241	217	161
69	247	242	229	177
70	249	240	224	161.5
71	251	244	219	162
72	249	241	225	188
73	252	241.5	227	184
74	253	242	227	174
75	252	243.5	219	183
76	249	243	226	163
77	251	241	217	187
78	246	244	225	161.5
79	247	244	228.5	162
80	248	241	229	179
81	253	242	224	163
82	249.5	242.5	224.5	175
83	251	243	223.5	181
84	251.5	244	224	164
85	254	242	225.5	188
86	252	244	229	178
87	254	241.5	224	179
88	253	242.5	225	173.5
89	253	243	216.5	166
90	248	243.5	217.5	174
91	246	244	228	165.5
92	246.5	241.5	220	179
93	245	241	221	184
94	245.5	242.5	223	179
95	250	242	228	181
96	251	243	219	183
97	250	243.5	219	184.5
98	249.5	244	224	174
99	247	242.5	222.5	165
100	251	242	226.5	180

APÊNDICE D – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	249	239	227	189
2	253	239	226	167
3	248	238.5	226	165
4	253	235	230	182
5	248	236	229	184
6	241	239	228	168
7	250	238	228	181
8	251.5	237	229	166
9	250	236.5	228	181
10	253	239	228.5	181
11	251	238.5	228	163.5
12	243.5	239	230	169
13	246	239	227	178
14	242	238.5	229	188
15	242.5	235	221	187
16	244	235.5	230	178
17	251	236	230	176
18	254.5	236	229	168.5
19	249	239	230	186
20	252	238	221	163
21	248	238.5	228	173
22	245.5	239	229	179
23	251	239	229.5	189
24	250	239.5	222	175
25	240	239	225.5	179
26	253	238	226.5	172
27	250.5	235	221	163
28	240	236	229.5	189
29	246	236.5	221	187
30	247	238	229	163
31	250	239	228	183
32	248	239	229	188
33	254	238.5	227.5	164
34	253	236	228	163
35	252	236.5	229.5	177
36	248.5	238	228	186
37	247.5	239	228.5	188.5
38	248	238	229	186.5
39	241	235	227.5	166.5
40	250	239	223	177
41	248	238	221	163
42	253	235	221	169
43	249	237	226	164
44	249	237.5	224	165
45	245	239	222.5	188
46	242	236	227	163
47	253	235	227	176
48	254.5	235.5	223	163
49	249.5	238	229	173.5
50	240	239	226	164

Continua...

APÊNDICE D – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2000 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostrai	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	251	239	222	189
52	242	238.5	221	188
53	242.5	237	224	186.5
54	244	238	224.5	189
55	252	238	228	187
56	243	237.5	225	164
57	251.5	236.5	222	164
58	245	239	223	165
59	248.5	235	224	179.5
60	247.5	236	226	180
61	251	239	221	181
62	253.5	235	224	185
63	246.5	239	223	171
64	246	239	225	172
65	242.5	235	226	188
66	244	239	221.5	164
67	243.5	239	223	163
68	240	238.5	224	170
69	253	235	228	172
70	251	239	222	165
71	240	238	221	179
72	252.5	237	223	188
73	250.5	239	223	182
74	244	235	224	182.5
75	244.5	235.5	225	189
76	243	236	226	167
77	242	238	227	188
78	252	239	228	166
79	248	238.5	223	167
80	241	239	222	179
81	254	239	223.5	189
82	242	238	221	173
83	251	235	224	164
84	244	235	228	165
85	244	238	228.5	186
86	246	236	229	189
87	243	235	222	173
88	248	235.5	223.5	189
89	249.5	236	224	164
90	251	237.5	221.5	178.5
91	252	237	227	169
92	242.5	236	227.5	178
93	243	237	223	167.5
94	244.4	237	229	173
95	246	235	228.5	165
96	246.5	239	225	177.5
97	249	235	222	188
98	251	236	223	181
99	241	238	230	174
100	243	235	231	187

APÊNDICE E – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	254.5	241	229	160
2	253	241	226	162.5
3	251	239	228	160.5
4	254.5	238	224	187
5	248	241	228	182
6	251	240.5	225.5	169
7	246	241	229	181
8	250	236	225	183
9	252	240	229	172.5
10	242	235	223	160
11	251	235.5	228	170
12	244	241	229	181
13	253.5	240.5	217	173
14	253	235	222	179
15	251	237	216	165
16	252	238	227	187
17	253	241	228	170.5
18	254	239	228	160.5
19	249	237	225.5	168
20	251	235	217	171
21	250.5	237	218	178.5
22	252	237.5	220	160
23	242	239	221	182
24	254.5	241	219.5	179
25	242	240.5	216	162
26	250	238	218.5	160.5
27	253	237.5	220	160
28	252	236	221	179
29	249	235.5	227	161
30	246	236	221	163
31	242	236.5	226.5	175
32	250	237	224.5	160
33	242	238	227	177
34	243	236.5	226.5	160
35	252	241	219.5	180
36	242	241	223	161
37	251.5	240	225	160
38	254.5	239	227	187
39	250	238	229	178
40	249	237.5	226	160
41	251	241	219	178
42	248	240.5	223	163
43	246	239	224	165
44	246.5	241	220.5	169
45	244	239.5	216	184
46	243	238	227.5	167
47	252	237	227.5	161
48	253	237	228.5	160
49	244	239	217.5	160
50	243	240	217	169

Continua...

APÊNDICE E – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2004 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	242.5	241.5	218	180
52	246	240	216	167
53	251	239	220	162
54	252	239.5	219	160
55	248	238	218	165
56	249.5	237.5	225	181
57	249	236	225.5	184.5
58	252	235.5	221	164
59	250.5	235	222	187
60	252	240	223	174
61	250.5	235	217	161.5
62	251	235	219	174.5
63	245	237	218	175
64	244.5	238	219	187
65	243.5	241	220	186
66	242	235.5	221.5	179
67	242.5	240	218	161
68	251	239	219	184
69	250	239	220.5	183
70	251	240	225	162.5
71	251.5	241	228	186
72	249	238	219	169.5
73	244.5	238.5	223	160
74	242.5	235.5	219.5	181
75	245	237	218	179
76	246	238	218	178
77	243	241	216	173
78	243.5	240	217.5	165
79	242.5	236	218.5	183
80	245	237	224	160
81	245.5	235	223	187
82	251	237	221	185
83	252	239	228	177
84	246	239	229	168.5
85	246.5	240	219.5	162.5
86	248	241	220	186.5
87	252	238	225	187
88	243	238	228	185
89	242	238.5	218	172
90	247	239	219	187
91	251	240.5	219.5	166.5
92	244	241	219.5	167.5
93	242.5	235	222	168
94	244	241	223	187
95	245	239	225	186
96	246	239	221	186
97	247.5	235	222	186
98	254	237.5	218	180.5
99	251	235	227	181
100	244	239	224	183

APÊNDICE F – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
1	247	242	224	169
2	254.5	245	229	170.5
3	253	245	229	167
4	254.5	242	226	165
5	247	244	222	168
6	254	242	226.5	162.5
7	254.5	244	225.5	159
8	254.5	244.5	216	184
9	251	242	229	159
10	248	240	229	160
11	254	245	220	159
12	249	245	223.5	165
13	254	245	221	159.5
14	249	244	221	160
15	254.5	243.5	227	167
16	253	240	225	159
17	254	241	228	168
18	250.5	245	219	160
19	248	245	227	168.5
20	249.5	242	222.5	183
21	253	244.5	224	161
22	249	240	224.5	159
23	248	240	225.5	162
24	249	241.5	228.5	164
25	254	245	226	169
26	248	243.5	220.5	171
27	253	243.5	222.5	172
28	253	241	224.5	184
29	254.5	242	227.5	170
30	254.5	242.5	219.5	159
31	253	243.5	217	183
32	254	244.5	216	168
33	250	244.5	216.5	179
34	254	245	228	164
35	253	244	225.5	168
36	251	244	230	174
37	251	243	227	168
38	254.5	243.5	226.5	159
39	253	244	228.5	171
40	248	241	226.5	160
41	252	242	226.5	164
42	251	244	220.5	161
43	248	244	219	179
44	253	240	224.5	169
45	246	245	228	185
46	252	241	219.5	166
47	254.5	242	228	181
48	250	242.5	224.5	185
49	249	243.5	222.5	172
50	248	244	229.5	160.5

Continua...

APÊNDICE F – Valores médios do NDVI por unidade amostral tomados como referência para o ano de 2008 na microrregião Campanha Meridional.

Unidade Amostral	Floresta	Regeneração	Campo	Solo
51	247	244.5	219	170
52	249	245	225	175
53	247	245	227	185
54	250	241	223.5	163
55	251	241.5	224	175.5
56	252	242	222	159
57	248.5	242.5	225	185
58	249.5	243.5	226.5	174
59	247	243	225	161
60	248	242.5	219.5	174
61	252	241	220	179.5
62	251	242.5	219	166.5
63	246	244	226	166
64	249.5	243.5	216	180
65	252	242	217	175
66	249	241.5	218.5	173
67	250	243	217.5	165
68	251	243.5	220	177
69	249	240	222	163
70	249.5	244.5	219.5	172
71	250	241.5	226	184
72	251.5	243.5	218	176
73	252	242	219	175
74	251	243	229	180
75	249.5	245	216	184
76	251	245	218	176
77	248	240	224	162
78	249	243	224.5	168
79	247	241	229	180
80	248	241	230	164
81	249.5	240	227	179
82	251	244	222	182
83	251	245	226	184
84	252	241	225	183
85	246	245	228	177
86	246	244	224	179
87	251.5	242	216	179
88	252	241	218	166
89	249	241.5	219	184
90	247	240	220	169
91	248	241	223	182
92	251	242	221.5	185
93	251.5	243	225	180
94	252	242	219	184
95	251	243	220	183
96	247	241	223	168
97	252	243	217	174
98	248	244	222	179
99	249	244	224	182
100	247.5	243	225	185

	Área Urbana	-0,00069	1,12951							
3,4	Distance_to_2	-0,575526	-0,06793	0,151702	0,342589	0,437151				
	Distance_to_4	0,705305	0,320403	0,031624	-0,2087	-0,38848	-0,61229	-0,87053	-1,21031	-1,55369
	Distance_to_5	0,825554	0,215384	-0,10057	-0,35944	-0,57374	-0,81522	-1,0632	-1,64608	-2,93145
	Clinografia	0,253472	-0,01512	-0,0274	0,201748	-0,72176				
	Rede Viária	0,000431	-0,00554							
	R.Hidrográfica	-0,009388	0,113914							
	Sub-bacia Hid.	0,000294	-0,07415							
	Área Urbana	0,000259	-1,54339							
3,5	Distance_to_2	-0,454406	0,011409	0,208916	0,284554					
	Distance_to_4	0,849864	0,315328	-0,0283	-0,28913	-0,52917	-0,75026	-1,44643	-1,56417	
	Distance_to_5	1,17041	0,035967	-0,42163	-0,69835	-1,03059	-1,50451	-1,85031		
	Clinografia	0,237189	0,024562	-0,06076	0,119353	0,332544				
	Rede Viária	-0,000184	0,002353							
	R.Hidrográfica	-0,006683	0,082514							
	Sub-bacia Hid.	0,001067	-0,30078							
	Área Urbana	0,000254	-1,46991							
4,2	Distance_to_2	0,842137	0,171462	-0,06425	-1,24767	-0,21197	-1,29793	-0,89247	0	
	Distance_to_4									
	Distance_to_5	-0,019732	0,039034							
	Clinografia	-0,361836	0,133604	-0,06414	-1,67017	0				
	Rede Viária	0,034707	-0,54416							
	R.Hidrográfica	0,052826	-0,7965							
	Sub-bacia Hid.	-0,001924	0,554455							
	Área Urbana	-0,004515	0							
4,3	Distance_to_2	0,097618	-0,01182							
	Distance_to_4									
	Distance_to_5	-0,089811	0,135701	0,214862						
	Clinografia	0,029106	0,00842	0,000671	-0,11837	0				
	Rede Viária	-0,004615	0,053276							
	R.Hidrográfica	0,011987	-0,13019							
	Sub-bacia Hid.	-0,002063	0,584782							
	Área Urbana	0	0							
	Distance_to_2	-0,086709	0,103385	-0,01394						

4,5	Distance_to_4										
	Distance_to_5	0,159171	-0,44533	-0,37675	-0,26557	-0,49578	-0,82695	-0,36742	-0,608259	-0,82695	0
	Clinografia	0,260491	0,022166	-0,06984	0,160615	0					
	Rede Viária	-0,001732	0,02035								
	R.Hidrográfica	0,005106	-0,0532								
	Sub-bacia Hid.	-0,002325	0,639389								
	Área Urbana	0	0								
5,2	Distance_to_2	0,65309	0,010306	-0,12493							
	Distance_to_4	0,034283	-0,02068								
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,904448	0,268705	-0,25233	-0,47572	0					
	Rede Viária	0,02997	-0,43841								
	R.Hidrográfica	0,029324	-0,35616								
	Sub-bacia Hid.	-0,000589	0,135508								
Área Urbana	7,35E+00	0									
5,3	Distance_to_2	0,485098	0,044428	-0,14966	-0,05091						
	Distance_to_4	0,22279	-0,10022	-0,20967							
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,498874	0,104468	-0,02423	-0,43696	0					
	Rede Viária	0,009673	-0,12036								
	R.Hidrográfica	-0,000697	0,006991								
	Sub-bacia Hid.	-0,000117	0,028518								
Área Urbana	-0,000107	0,900357									
5,4	Distance_to_2	-0,013671	0,001289								
	Distance_to_4	0,252975	-0,1139	-0,3053	-0,20581						
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,22965	0,023675	-0,0034	0,029466	0					
	Rede Viária	-0,006476	0,072611								
	R.Hidrográfica	-0,009116	0,087441								
	Sub-bacia Hid.	-0,000639	0,146146								
Área Urbana	7,35E+00	0									

* medida em metros, sendo:1: 0-250, 2: 250-500, 3: 500 -750, 4: 750-1000, 5: 1000-1250, 6: 1250-1500, 7:1500-1750, 8: 1750-2000, 9: 2000-2250, 10:2250-2500, n..., 20: 4750-5000.

Fonte: dados da autora.

	Área Urbana	-0,00139	1,74731								
3,4	Distance_to_2	-0,13941	0,041286	0,54034	0,227824	0,674206	1,04247	0,739219	0,729916		
	Distance_to_4	0,439377	0,047508	-0,16496	-0,38705	-0,48339					
	Distance_to_5	0,655912	0,091587	-0,13126	-0,32021	-0,71426	-0,94015	-1,40788	-1,41406		
	Clinografia	0,37515	-0,00947	-0,05171	0,269285	0,831012					
	Rede Viária	0,004264	-0,05575								
	R.Hidrográfica	-0,00581	0,072777								
	Sub-bacia Hid.	0,001171	-0,31216								
	Área Urbana	0,000226	-1,46731								
3,5	Distance_to_2	-0,01422	0,006131								
	Distance_to_4	0,302305	0,06208	-0,11231	-0,28994	-0,42394					
	Distance_to_5	0,624491	0,102991	-0,07696	-0,25834	-0,43712	-0,542				
	Clinografia	0,31298	-0,0415	-0,0193	0,327323	0,100206					
	Rede Viária	0,003458	-0,04495								
	R.Hidrográfica	-0,01003	0,122334								
	Sub-bacia Hid.	0,000658	-0,1632								
	Área Urbana	0,000294	0								
4,2	Distance_to_2	1,44948	0,318331	-0,12879	-0,4793	-1,04496	-0,88031	-2,56101	-1,41361	-2,46676	0
	Distance_to_4										
	Distance_to_5	-0,18804	0,209933	0,474378	1,0713	0,758922	0,041677	0	-0,49732	0	0
	Clinografia	0,264821	0,02375	-0,02679	-0,15574	0					
	Rede Viária	0,022057	-0,2959								
	R.Hidrográfica	-0,00412	0,047295								
	Sub-bacia Hid.	0,00259	-0,95685								
	Área Urbana	-0,00161	0								
4,3	Distance_to_2	0,285087	-0,07269	-0,01522							
	Distance_to_4										
	Distance_to_5	-0,15282	0,246055	0,346915							
	Clinografia	-0,01473	0,000228	0,020364	-0,1275	-0,83199					
	Rede Viária	0,006776	-0,0813								
	R.Hidrográfica	-0,00337	0,038775								
	Sub-bacia Hid.	0,000449	-0,11287								
	Área Urbana	0	0								
	Distance_to_2	0,351645	0,146386	-0,13908	-0,06459						

4,5	Distance_to_4										
	Distance_to_5	0,059261	-0,18488	-0,13197							
	Clinografia	0,215153	-0,00389	-0,04265	0,160836	0,193951					
	Rede Viária	0,009853	-0,12072								
	R.Hidrográfica	-0,01984	0,207937								
	Sub-bacia Hid.	0,000175	-0,04244								
Área Urbana	0	0									
5,2	Distance_to_2	1,1634	0,589367	0,266375	-0,02668	-0,29597	-0,61358	-1,38442	-1,91996	-1,37928	-2,28087
	Distance_to_4	-0,0169	0,015513								
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,92003	0,238999	-0,15987	-0,81079	0					
	Rede Viária	0,018353	-0,0568								
	R.Hidrográfica	0,004681	-0,21397								
Sub-bacia Hid.	0,000999	-0,38603									
Área Urbana	0	0									
5,3	Distance_to_2	0,372091	0,021635	-0,04048							
	Distance_to_4	0,281688	-0,3074	-0,54769	-0,43088	0,178323	0,519249	0,267935	0,599292	1,07886	0,519249
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,29133	0,055187	-0,00051	-0,22844	-1,42666					
	Rede Viária	0,007349	-0,09081								
	R.Hidrográfica	0,004982	-0,05334								
Sub-bacia Hid.	-0,00177	0,448632									
Área Urbana	-0,00036	0									
5,4	Distance_to_2	-0,12356	0,007448								
	Distance_to_4	0,277771	-0,18968	-0,64622	-0,75163						
	Distance_to_5										
	Clinografia	-0,30468	0,044941	0,004171	-0,16639	-0,15465					
	Rede Viária	-0,00072	0,00849								
	R.Hidrográfica	0,010601	-0,11747								
Sub-bacia Hid.	-0,00127	0,34245									
Área Urbana	0	0									

* medida em metros, sendo: 1: 0-250, 2: 250-500, 3: 500 -750, 4: 750-1000, 5: 1000-1250, 6: 1250-1500, 7:1500-1750, 8: 1750-2000, 9: 2000-2250, 10:2250-2500, n..., 20: 4750-5000.

Fonte: dados da autora.

4,5	Distance_to_4											
	Distance_to_5	0,157993	-0,27688	-0,55999	-0,87863	-0,66446	-0,24967	-0,6506	-1,16596	-0,68046	0,523516	-0,68046
	Rede Viária	0,005682	-0,10463									
	R.Hidrográfica	0,01269	-0,12403									
	D.Populacional	-0,25924	-0,11344	0,029096	0,132295	-0,42331	-0,48179					
	Sub-bacia Hid.	-0,00088	0,166841									
	Área Urbana	0,0002	0									
5,2	Distance_to_2	1,07603	0,339784	-0,64342	-0,97175	-1,42065	-2,86648	-1,68465	-0,80885	-1,87929	0	-0,06692
	Distance_to_4	-0,09327	0,102858	1,00794	0,69077	0	2,01253	0	0			
	Distance_to_5											
	Rede Viária	-0,01362	0,229577									
	R.Hidrográfica	-0,00095	0,007775									
	D.Populacional	0,530921	0,390646	-0,20897	-0,63563	0,496941	0,970501					
	Sub-bacia Hid.	0,002743	-1,12297									
Área Urbana	0	0										
5,3	Distance_to_2	0,457158	0,072663	-0,20377	-0,18291							
	Distance_to_4	0,11859	-0,2642	-0,21381								
	Distance_to_5											
	Rede Viária	0,00045	-0,00862									
	R.Hidrográfica	-0,00666	0,053374									
	D.Populacional	-0,42925	0,346259	-0,00048	-0,52204	0,198767	0,125354					
	Sub-bacia Hid.	-0,00128	0,273515									
Área Urbana	0	0										
5,4	Distance_to_2	0,147422	-0,0496	0,021192								
	Distance_to_4	0,150171	-0,25972	-0,55234	-0,58335							
	Distance_to_5											
	Rede Viária	-0,00256	0,047627									
	R.Hidrográfica	-0,00503	0,040631									
	D.Populacional	-0,95865	0,161443	-0,01242	-0,17638	0,207429	-0,02538					
	Sub-bacia Hid.	-0,00078	0,175553									
Área Urbana	0	0										

* medida em metros, sendo: 1: 0-250, 2: 250-500, 3: 500 -750, 4: 750-1000, 5: 1000-1250, 6: 1250-1500, 7:1500-1750, 8: 1750-2000, 9: 2000-2250, 10:2250-2500, n..., 20: 4750-5000.

Fonte: dados da autora.

APÊNDICE J - Pesos de Evidência (*W*) para cada faixa de distância das variáveis em relação às transições na microrregião Campanha Meridional entre 2004 e 2008.

<i>Variável</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<i>n...</i>	25
Distance_to_2												
Distance_to_4	0,275852	0,074803	-0,11018	-0,19683								
2,3 Distance_to_5	0,230641	0,051277	-0,02249									
Rede Viária	-0,00034	0,00693										
R.Hidrográfica	-0,00059	0,004967										
D.Populacional	-0,09515	-0,0212	-0,01704	0,055803	0,180927	-0,17674						
Sub-bacia Hid.	-0,00015	0,066905										
Área Urbana	0,014486	-3,41231										
Distance_to_2												
Distance_to_4	0,59872	0,289581	0,081607	-0,205	-0,51818	-0,83128	-0,70297					
2,4 Distance_to_5	0,586701	0,257207	0,071549	-0,10825	-0,71076	-0,32757	0	0				
Rede Viária	-0,00365	0,07163										
R.Hidrográfica	-0,00966	0,078403										
D.Populacional	0,33532	0,175383	-0,05342	0,107705	-0,18647	-1,18313						
Sub-bacia Hid.	-0,0014	0,497376										
Área Urbana	0,014263	-3,03793										
Distance_to_2												
Distance_to_4	0,629687	0,379928	0,194455	-0,13346	-0,32466	-0,53605	-1,89149	-1,37504	0	0		
2,5 Distance_to_5	0,708124	0,251629	0,018624	-0,3928	-0,60074	-0,25216	-0,5549	-0,80681	-1,00355			
Rede Viária	-0,00642	0,122608										
R.Hidrográfica	0,014976	0,02317										
D.Populacional	-1,95796	0,285304	-0,14167	0,213591	-0,74515	-2,06764						
Sub-bacia Hid.	-0,00216	0,689003										
Área Urbana	-0,00277	0										
Distance_to_2	0,401693	-0,24415	-0,52316	-0,73782	-0,85031							
Distance_to_4	-0,22738	0,003554	0,164873									
3,2 Distance_to_5	-0,00322	0,000548										
Rede Viária	0,004608	-0,08134										
R.Hidrográfica	0,00588	-0,05651										
D.Populacional	0,01637	-0,09548	-0,04098	-0,04066	0,106634	0,342715						
Sub-bacia Hid.	0,002505	-0,44071										
Área Urbana	-0,00296	1,93161										
Distance_to_2	-0,3411	-0,01901	0,178481	0,488708	0,787585	1,29193	0,897311	0,036779	0,255468	-0,14554	-1,34952	

3,4	Distance_to_4	0,335783	-0,00617	-0,28256	-0,49106	-0,54264						
	Distance_to_5	0,383189	0,195397	0,022217	-0,16724	-0,64433	-0,8346	-1,10709	-1,24794			
	Rede Viária	0,009578	-0,1777									
	R.Hidrográfica	-0,00561	0,050831									
	D.Populacional	0,006007	0,1093	0,167408	0,249082	-1,27591	-1,59809					
	Sub-bacia Hid.	0,002614	-0,46522									
	Área Urbana	0,000382	-1,43913									
3,5	Distance_to_2	-0,44517	-0,17167	0,064195	0,315289	0,629394	0,909837	1,27719	1,28129			
	Distance_to_4	0,444747	-0,09853	-0,44202	-0,64261	-0,98208	-0,72942	-0,79184				
	Distance_to_5	0,622323	0,281941	0,025393	-0,16917	-0,35794	-0,77526	-1,00329	-1,39748	-0,84755	0,180024	
	Rede Viária	0,005827	-0,10408									
	R.Hidrográfica	0,001477	-0,01386									
	D.Populacional	-0,40022	0,051151	0,086697	0,433358	-1,30333	-2,70226					
	Sub-bacia Hid.	0,001006	-0,15441									
Área Urbana	0,0005	0										
4,2	Distance_to_2	1,09855	0,39144	-0,22003	-0,52994	-0,98528	-0,64557	-0,84711	-1,22587	-1,52088	-1,06372	0,616188
	Distance_to_4											0
	Distance_to_5	-0,07779	0,104507	-0,46238	0,402613	-0,44468	0,220292	-0,00285	2,19437	0	0	
	Rede Viária	0,00282	-0,04981									
	R.Hidrográfica	0,010676	-0,10205									
	D.Populacional	-0,157	0,030987	-0,0045	-0,60424	1,29139	1,54543					
	Sub-bacia Hid.	0,003547	-101,445									
Área Urbana	-0,00017	0,402613										
4,3	Distance_to_2	0,410578	0,209306	-0,01171	-0,19177	-0,34016	-0,50882	-0,36564	0,218059	0,357004		
	Distance_to_4											
	Distance_to_5	-0,0864	0,104008	0,35526	0,832184	1,9647	1,69026					
	Rede Viária	0,001661	-0,02902									
	R.Hidrográfica	-0,00017	0,001552									
	D.Populacional	0,378791	0,024529	-0,13362	-0,25582	1,09903	1,21817					
	Sub-bacia Hid.	0,000514	-0,09673									
Área Urbana	-6,35E+00	0,172939										
4,5	Distance_to_2	-0,37907	-0,16947	0,059594	0,26756	0,597578	1,09353	0,523531	0,208014	0,458557	0,025693	
	Distance_to_4											
	Distance_to_5	0,111781	-0,11685	-0,27746	-0,12513	-0,66746	-2,45921	-1,76607	0,025693	1,41199	0	
	Rede Viária	0,003587	-0,06382									
	R.Hidrográfica	0,010844	-0,10375									
D.Populacional	-0,21547	-0,28777	-0,16658	0,309855	-0,21776	-1,16147						

	Sub-bacia Hid.	-0,00015	0,025693									
	Área Urbana	0,000336	0									
5,2	Distance_to_2	1,38786	0,647027	0,280069	-0,2863	-0,61605	-1,292	-0,87776	-1,47467	-1,06519	-1,40528	0,858364
	Distance_to_4	-0,01219	0,021618									
	Distance_to_5											
	Rede Viária	0,003416	-0,06001									
	R.Hidrográfica	-0,00443	0,041118									
	D.Populacional	-0,15324	0,318742	0,02578	-0,76936	0,612997	2,14878					
	Sub-bacia Hid.	-0,00131	0,286913									
	Área Urbana	0,000115	0									
5,3	Distance_to_2	0,640743	0,361438	0,143654	-0,01256	-0,16231	-0,37827	-0,62107	-0,45695	-0,38756	0,504745	
	Distance_to_4	0,118625	-0,22758	-0,39943	-0,13821	-0,30173	-0,15942	-1,06387				
	Distance_to_5											
	Rede Viária	0,007254	-0,13231									
	R.Hidrográfica	-0,00506	0,046775									
	D.Populacional	0,121753	0,142704	-0,10229	-0,30644	0,912953	1,64988					
	Sub-bacia Hid.	-0,00074	0,171942									
	Área Urbana	0,000115	0									
5,4	Distance_to_2	0,022539	-0,00193									
	Distance_to_4	0,015539	-0,02865									
	Distance_to_5											
	Rede Viária	0,005723	-0,10281									
	R.Hidrográfica	-0,00094	0,008908									
	D.Populacional	-0,06536	0,036722	0,024582	-0,09793	0,293161	0,639717					
	Sub-bacia Hid.	-0,00122	0,269432									
	Área Urbana	0,000115	0									

* medida em metros, sendo: 1: 0-250, 2: 250-500, 3: 500 -750, 4: 750-1000, 5: 1000-1250, 6: 1250-1500, 7:1500-1750, 8: 1750-2000, 9: 2000-2250, 10:2250-2500, n..., 25: 6000-6250.

Fonte: dados da autora.