

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

**MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO NO  
PROCESSO DE ARENIZAÇÃO E COBERTURA  
FLORESTAL NA CAMPANHA OCIDENTAL - RS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Emanuel Araújo Silva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**



**MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO NO  
PROCESSO DE ARENIZAÇÃO E COBERTURA FLORESTAL  
NA CAMPANHA OCIDENTAL - RS**

**Emanuel Araújo Silva**

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  
**Doutor em Engenharia Florestal.**

**Orientador: Prof. Dr. Rudiney Soares Pereira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2015**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva, Emanuel Araújo  
Modelagem dinâmica para simulação no processo de arenização e cobertura florestal na Campanha Ocidental - RS. / Emanuel Araújo Silva.-2015.  
163 p.; 30cm

Orientador: Rudiney Soares Pereira  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2015

1. Sensoriamento remoto 2. Geoprocessamento 3. Landsat 4. Modelo estocástico 5. Pesos de evidências I. Pereira, Rudiney Soares II. Título.

---

© 2015

Todos os direitos autorais reservados a Emanuel Araújo Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: emannueldmadster@gmail.com

---

**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 NO PROCESSO DE  
ARENIZAÇÃO E COBERTURA FLORESTAL NA CAMPANHA  
OCIDENTAL- RS**

elaborada por  
**Emanuel Araújo Silva**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutor em Engenharia Florestal**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Rudiney Soares Pereira, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira, Dr. (UFRPE)**

---

**Attus Pereira Moreira, Dr. (URI)**

---

**Ana Caroline Paim Benedetti, Dr<sup>a</sup>. (Politécnico-UFSM)**

---

**Liane de Souza Weber, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)**

Santa Maria, 05 de março de 2015.



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e aos meus guias superiores por estarem sempre presentes em minha vida, por me orientarem frequentemente quando minha fé tornava-se abalada e por demonstrar a perfeição da natureza por meio da ciência;

A minha família, em especial a minha mãe Eunice Maria Araújo, meu pai Antônio José da Silva e meus avós Eulina Matos de Araújo e Antônio Araújo (*in memoriam*) pela ajuda em todas as situações, por ensinar-me o sentido da família, do amor e da importância que a educação tem em nossas vidas;

A família Pedroso e Finger, principalmente a Anelisa Pedroso Finger pelo carinho, amor, confiança e a grande ajuda, que contribuíram consideravelmente no meu bem estar e trabalho;

Agradeço com muita satisfação ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Rudiney Soares Pereira, pela oportunidade e confiança, pela amizade e solidariedade quando precisei, exercendo o papel principal no decorrer deste trabalho;

Ao meu co-orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Solon Jonas Longhi, pelos ensinamentos e amizade ao longo deste trabalho;

Aos Membros do LABSERE que por esse passaram ao longo desses 4 anos, principalmente ao Mateus Schuh e Laura Goergen, pelas brincadeiras e companheirismo, tornando o ambiente de trabalho menos tenso;

Aos Amigos Gabriel Paes Marangon e David Fagner de Souza e Lira, pelo companheirismo, paciência e amizade desde a graduação;

Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal, pela amizade e confiança.

Aos Professores do PPGEF, em especial ao Prof. Dr. Paulo Renato Schneider, Prof. Dr. Cesar Augusto Guimarães Finger e Prof. Dr. Frederico Dimas Fleig pelos ensinamentos ao longo do curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa disponibilizada;

A Stora Enso pelas imagens disponibilizadas que estão inseridas no trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.



“Construí amigos, enfrentei derrotas, venci obstáculos, bati na porta da vida e disse-lhe: Não tenho medo de vivê-la”.

*Augusto Cury*



## RESUMO

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

### **MODELAGEM DINÂMICA PARA SIMULAÇÃO NO PROCESSO DE ARENIZAÇÃO E COBERTURA FLORESTAL NA CAMPANHA OCIDENTAL - RS**

AUTOR: EMANUEL ARAÚJO SILVA

ORIENTADOR: RUDINEY SOARES PEREIRA

Data e Local da defesa: Santa Maria, 05 de março de 2015.

A modelagem dinâmica é uma ferramenta útil para o conhecimento do uso e ocupação da terra, gerando diretrizes metodológicas associadas às questões ambientais, sociais e econômicas. Este trabalho teve por objetivo aplicar um modelo para simular a dinâmica no processo de arenização e cobertura florestal do Sudoeste do Rio Grande do Sul, denominada microrregião da Campanha Ocidental e, com base nessas técnicas, efetuar a projeção de cenários futuros. Foi utilizado um mosaico de imagens do satélite LANDSAT 5 sensor TM, que recobre a região de estudo nos anos de 1985, 1996 e 2011 e LANDSAT 8 sensor OLI no ano de 2013. Para elaboração da base de dados e processamento digital das imagens, utilizou-se o aplicativo SPRING. Após a classificação das imagens, foi realizado o cruzamento dos mapas temáticos com auxílio da programação LEGAL, e posteriormente, empregado a simulação dos cenários futuros por meio da modelagem com o aplicativo Dinamica EGO. Os resultados previstos para 2026 indicam que a cobertura florestal irá se expandir de 14,22% em 2011 para 15,03% no ano de 2026 da área total da Campanha Ocidental, demonstrando que o aumento da cobertura florestal encontra-se em processo de estabilização, concentrando-se suas áreas na parte leste, altitudes elevadas e nas bordas da rede de drenagem. Nos areas, a projeção demonstrou que sua área sofrerá retração de 0,37% em 2011 para 0,33% da área total da região em 2026, e sua concentração estará presente na parte leste, em altitudes elevadas e em torno da drenagem do rio Ibicui.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto. Geoprocessamento. Landsat. Modelo estocástico. Pesos de evidências.



## **ABSTRACT**

Doctoral Thesis  
Graduate Program of Forest Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **DYNAMIC MODELING SIMULATION IN SANDIFICATION PROCESS AND FOREST COVER IN CAMPANHA OCIDENTAL - RS**

AUTHOR: EMANUEL ARAÚJO SILVA

ADVISER: DR. RUDINEY SOARES PEREIRA

Date and Place of defense: Santa Maria, march 05<sup>th</sup>, 2015.

The dynamic modeling process is a useful tool for the knowledge of land use and occupation, creating methodological guidelines associated to ambient, social and economical issues. This work aims to establish a model to simulate the dynamic in the sandification process and forest cover at South-west of Rio Grande do Sul, named micro regions of Campanha Ocidental and, based on this technics, make a future scenery projection. An image mosaic of LANDSAT 5 satellite was used, which recovers the studied region in the years of 1985, 1996, 2011 and LANDSAT 8 in 2013 year. SPRING was used to data base elaboration and data processing of digital images. After the image classification, the LEGAL program was used to develop the cross thematic maps, which will be used on simulations for the future sceneries by modeling with Dinamica EGO software. The expected results for 2026 indicate that forest cover will increase from 14.22% in 2011 to 15,03% in the year 2026 the total area of the Campanha Ocidental, showing that the expansion of forest cover is in the process of stabilization, focusing the areas in east, high altitudes and around drainage rivers. In the sand, this projection will retracts from 0.37% in 2011 to 0.33% in 2026, its concentration will be in the northeast, high altitudes and around the Ibicuí river drainage.

**Key-words:** Remote sensing. Geoprocessing. Landsat. Stochastic model. Weights of evidence.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Plantio de <i>Eucalyptus</i> spp. na borda de transição entre o areal e o campo nativo na microrregião da Campanha Ocidental, Sudoeste do Rio Grande do Sul.....	35
Figura 2 –	Plantio de <i>Eucalyptus</i> spp. e sua estabilização na recuperação dos areais na microrregião da Campanha Ocidental - RS.....	36
Figura 3 –	Desenho esquemático de um sistema de informação geográfica.....	44
Figura 4 –	Fluxograma de desenvolvimento e aplicação de um modelo de simulação espacial.....	51
Figura 5 –	Esquema de localização da Microrregião da Campanha Ocidental, localizada na Mesorregião do Sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil.....	66
Figura 6 –	(a) Antes da aplicação do contraste linear; (b) Após aplicação do contraste linear.....	70
Figura 7 –	Imagem segmentada através do método crescimento de regiões numa fração de área da microrregião da Campanha Ocidental.....	71
Figura 8 –	Modelo de cálculo para matriz de transição.....	76
Figura 9 –	Esqueleto da criação do Cubo de variáveis estáticas.....	77
Figura 10 –	Esquema para cálculo dos intervalos para categorização das variáveis contínuas.....	78
Figura 11 –	Esquema para a obtenção do cálculo dos Coeficientes dos Pesos de Evidência.....	79
Figura 12 –	Esquema contendo a interface gráfica para o cálculo da correlação dos Pesos de Evidência.....	81
Figura 13 –	Modelo para procedimento na simulação de geração de mapas de probabilidades e de paisagem anual.....	82
Figura 14 –	Método de aplicação dos algoritmos de similaridade fuzzy.....	83
Figura 15 –	Esquema de validação utilizando o decaimento exponencial no Dinamica EGO.....	85
Figura 16 –	Esquema de validação utilizando o decaimento constante no Dinamica EGO.....	85
Figura 17 –	Esquema de simulação do modelo na criação de cenários futuros.....	86
Figura 18 –	Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental - RS, no ano de 1985.....	92
Figura 19 –	Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental - RS, no ano de 1996.....	93
Figura 20 –	Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental – RS, no ano de 2011.....	94

Figura 21 – Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental – RS, no ano de 2013.....	95
Figura 22 – Evolução florestal entre os anos de 1985, 1996 e 2011 na microrregião da Campanha Ocidental – RS. ....	97
Figura 23 – Evolução da Agricultura entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental – RS. ....	99
Figura 24 – Evolução do Campo entre os anos 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental – RS. ....	100
Figura 25 – Evolução dos areas entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental - RS. ....	102
Figura 26 – (A, B, C) - Reflorestamento em áreas com processo de arenização utilizando-se espécies de eucaliptos realizados pela Stora Enso na microrregião da Campanha Ocidental – RS. ....	103
Figura 27 – Evolução da Lâmina D'água entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental - RS. ....	104
Figura 28 – Espacialização da expansão e manutenção da classe água nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013. ....	106
Figura 29 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Campo nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013. ....	111
Figura 30 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Agricultura nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.....	114
Figura 31 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Areal nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013 .....	117
Figura 32 – Comparação de cenários entre um mapa simulado e um mapa classificado para o ano de 2013 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul.....	127
Figura 33 – Resultado da simulação para o ano de 2026 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul. ....	131

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de solo da Microrregião da Campanha Ocidental, no Sudoeste do Rio Grande do Sul, e suas respectivas características. ...	33
Tabela 2 – Técnicas de processamento digital de imagens utilizadas no Sensoriamento Remoto.....	45
Tabela 3 – Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente <i>Kappa</i> .	48
Tabela 4 – Relação das cenas que recobrem a Microrregião Campanha Ocidental – RS e suas respectivas datas.....	69
Tabela 5 – Chave de interpretação das classes de uso da terra na microrregião da Campanha Ocidental, referentes a falsa-cor em uma composição colorida R5G4B3 do sensor TM.....	72
Tabela 6 – Matriz de confusão do ano de 1985 gerada no aplicativo SPRING ....	87
Tabela 7 – Matriz de confusão do ano de 1996 gerada no aplicativo SPRING ....	88
Tabela 8 – Matriz de confusão do ano de 2011 gerada no aplicativo SPRING. ....	88
Tabela 9 – Matriz de confusão do ano de 2013 gerada no aplicativo SPRING. ....	89
Tabela 10 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em hectares, nos anos de 1985, 1996, 2011 e 2013. ....	91
Tabela 11 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em porcentagem da área total, entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013. ....	91
Tabela 12 – Evolução do uso e cobertura da terra, em hectares, e suas respectivas porcentagens entre os anos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013 na microrregião Campanha Ocidental – RS.....	96
Tabela 13 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de água, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013...	105
Tabela 14 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Floresta, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013. ....	107
Tabela 15 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Campo, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013. ....	110
Tabela 16 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Agricultura, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013. ....	112
Tabela 17 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Areal, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013. .	115
Tabela 18 – Matriz de transição do tipo múltipla, de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 1996 e 2011, em valores percentuais. ....	118

Tabela 19 – Matriz de transição do tipo única de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 1996 e 2011, em valores percentuais.....	119
Tabela 20 – Variáveis dinâmicas e estáticas que mais influenciaram nas transições de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre os anos de 1996 a 2011.....	121
Tabela 21 – Variáveis que foram retiradas do modelo por apresentarem índices acima de 0,50. ....	123
Tabela 22 – Parâmetros ajustados nos algoritmos <i>expander</i> e <i>patcher</i> para simulação no período de 1996 a 2011 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul. ....	124
Tabela 23 – Índices de similaridade <i>fuzzy</i> obtidos por meio de cálculos das funções de decaimento constante e exponencial para diferentes tamanhos de janelas entre o período de 1996 a 2011.....	125
Tabela 24 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em hectares, e suas respectivas porcentagens previstas para o ano de 2026.....	128
Tabela 25 – Matriz de transição do tipo múltipla de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 2011 e 2026, em valores percentuais.....	129
Tabela 26 – Matriz de transição do tipo única de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 2011 e 2026, em valores percentuais.....	130

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	48
Equação 2.....	52
Equação 3.....	53
Equação 4.....	54
Equação 5.....	54
Equação 6.....	54
Equação 7.....	55
Equação 8.....	55
Equação 9.....	55
Equação 10.....	55
Equação 11.....	55
Equação 12.....	56
Equação 13.....	56
Equação 14.....	56
Equação 15.....	56
Equação 16.....	57
Equação 17.....	57
Equação 18.....	57
Equação 19.....	57
Equação 20.....	58
Equação 21.....	58
Equação 22.....	58
Equação 23.....	58
Equação 24.....	58
Equação 25.....	58
Equação 26.....	80
Equação 27.....	80
Equação 28.....	84



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	– <i>Advanced Land Observing Satellite</i>
CBERS	– <i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CPRM	– Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSV	– <i>Comma-separated values</i>
EGO	– <i>Environment for Geoprocessing Objects</i>
EMBRAPA	– Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
ERTS	– <i>Earth Resources Technology Satellite</i>
ETM	– <i>Enhanced Thematic Mapper</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
LANDSAT	– <i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LEGAL	– Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algebrico
MODIS	– <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSS	– <i>Multispectral Scanner System</i>
NASA	– <i>National Aerospace and Space Administration</i>
OLI	– <i>Operational Land Imager</i>
PDI	– Processamento Digital de Imagens
Pixel	– <i>Picture element</i>
RBV	– <i>Return Beam Vidicon</i>
REM	– Radiação Eletromagnética
SEMA	– Secretaria do Meio Ambiente
SIG	– Sistema de Informação Geográfica
SPRING	– Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	– Sensoriamento Remoto
SRTM	– <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIFF	– <i>Tagged Image File Format</i>
TM	– <i>Thematic Mapper</i>
USDA	– <i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	– <i>United States Geological Survey</i>
UTM	– <i>Universal Transversa de Mercator</i>
WGS	– <i>World Geodetic System</i>
XML	– <i>eXtensible Markup Language</i>



## LISTA DE APÊNDICE

Apêndice A –	Mapa Hidrológico da microrregião da Campanha Ocidental-RS....	149
Apêndice B –	Mapa da Rede Viária da microrregião Campanha Ocidental-RS...	150
Apêndice C –	Mapa Hipsométrico da microrregião Campanha Ocidental-RS.....	151
Apêndice D –	Mapa de Declividade da microrregião Campanha Ocidental-RS. ...	152
Apêndice E –	Mapa Geológico da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	153
Apêndice F –	Mapa de concentração da População Urbana da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	154
Apêndice G –	Mapa de concentração da População Rural da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	155
Apêndice H –	Mapa de concentração da Renda Per Capita da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	156
Apêndice I –	Mapa de concentração do Produto Interno Bruto (PIB) da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	157
Apêndice J –	Mapa de concentração da Ovinocultura da microrregião Campanha Ocidental-RS. ....	158
Apêndice K –	Mapa de concentração da Bovinocultura da microrregião Campanha Ocidental-RS .....	159
Apêndice L –	Programação em LEGAL para mapas de transição de uso e cobertura da terra na microrregião da Campanha Ocidental-RS...	160



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1	Objetivo geral.....	27
1.2	Objetivos específicos.....	27
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>29</b>
2.1	Bioma Pampa.....	29
2.2	Processo de arenização na microrregião da Campanha Ocidental .....	30
2.3	Dinâmica do uso e ocupação da terra .....	37
2.4	Sensoriamento Remoto .....	38
2.4.1	Geoprocessamento .....	42
2.4.1.1	Processamento digital de imagens.....	44
2.4.1.2	Classificação de imagens .....	46
2.5	Modelagem dinâmica espacial .....	49
2.5.1	Modelo estocástico .....	51
2.5.2	Método de Pesos de Evidências .....	53
2.6	Satélite LANDSAT (Land Remote Sensing Satellite) .....	59
2.7	Aplicativos computacionais .....	61
2.7.1	Aplicativo SPRING.....	61
2.7.2	Aplicativo Dinamica EGO .....	63
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>65</b>
3.1	Localização e características da área de estudo .....	65
3.2	Material .....	67
3.3	Métodos .....	67
3.3.1	Criação do banco de dados.....	68
3.3.2	Aquisição e processamento digital de imagens LANDSAT 5 e 8 .....	68
3.3.3	Mapas Temáticos .....	73
3.3.4	Mapas estáticos.....	73
3.3.5	Mapas de transições.....	74
3.3.6	Modelagem Dinâmica .....	74
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>87</b>
4.1	Avaliação quanto a confiabilidade da classificação.....	87
4.2	Mapeamento do uso e cobertura da terra .....	89
4.3	Evolução do uso e cobertura da terra .....	96
4.4	Transições de classes do uso e cobertura da terra .....	104
4.5	Modelagem Dinâmica da arenização e cobertura florestal .....	118
4.5.1	Cálculo das matrizes de transição .....	118
4.5.2	Cálculo dos Pesos de Evidência .....	120
4.5.3	Correlação dos mapas.....	122
4.5.4	Simulação do modelo para os mapas de uso e cobertura da terra .....	123
4.5.5	Validação do modelo para simulação de cenários futuros.....	124
4.5.6	Análise das simulações de cenários futuros.....	126

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>133</b>
<b>5.1</b>	<b>Mapeamento, evolução e transições da cobertura florestal e areal ....</b>	<b>133</b>
<b>5.2</b>	<b>Modelagem dinâmica.....</b>	<b>133</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>135</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>147</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual vem demonstrando preocupação com as questões ambientais, no entanto, apesar do esforço ainda ser pequeno, nota-se mudanças na maneira de pensar e agir, afirmando então, uma nova consciência ecológica. Porém, com os desafios e alta competitividade do homem urbano moderno, presenciam-se relevantes impactos, tanto positivos quanto negativos, na paisagem local.

Após a revolução industrial, o aumento do consumo de alimentos e matéria-prima provocou alterações significativas do uso e cobertura da terra. Com isso, tornou-se perceptível o aumento das fronteiras agrícolas e expansão pecuária que, ao longo dos anos, vêm migrando do Sul para o Norte do Brasil. Tais mudanças acarretam diversos problemas inerentes a cada região que, de certa forma, transforma a qualidade de vida das comunidades fragilizando sua convivência com o meio onde vivem.

É importante relacionar a sobrevivência das comunidades com a compreensão dos recursos que estão associados a uma paisagem, pois é fator determinante para o desenvolvimento de bases sólidas em quatro esferas: cultural, social, econômica e ambiental. Dentro desse contexto, destaca-se o Sudoeste do Rio Grande do Sul, mais precisamente a microrregião da Campanha Ocidental, inserida na região dos Pampas, que vem ao longo do tempo sofrendo o processo denominado arenização, o qual se intensificou em virtude da expansão da soja, do arroz e do sobrepastoreio, ocasionando a infertilidade do solo e a degradação da paisagem campeira.

A microrregião da Campanha Ocidental caracteriza-se por paisagem extremamente frágil, em processo de constituição pedogenética e vegetal recente, em cujo espaço se instala áreas arenosas (SUERTEGARAY, 1998). A diminuição da qualidade ambiental apresenta reflexos negativos sobre as condições socioeconômicas e tem sido apontada como uma das causas pela queda da qualidade de vida do homem do campo e, conseqüentemente, do aumento do nível da pobreza nessa região (RIBASKI et al., 2005).

Diversos autores vêm discutindo sobre o processo de arenização, sendo observadas visões diferentes sobre o assunto. Marchiori (1995), cujo pensamento é

compatível com o de Suertegaray (1998), defende a gênese natural dos areais. Por outro lado, autores como Cordeiro e Soares (1975) e Souto (1984) acreditam que a origem do processo de arenização está vinculada a degradação do solo, tendo sua origem em ações antrópicas ligadas ao sobrepastoreio e ao mau uso do solo. Atualmente, há um consenso de que as condições naturais e atividade agropecuária interagem e contribuem de forma conjunta para o surgimento ou intensificação dos processos degradativos do solo.

Mais recentemente, o Sudoeste do Rio Grande do Sul passou a ter demasiada importância e repercussão estadual. O surgimento de novos setores de investimentos prometeu dar início a um novo ciclo de desenvolvimento na região.

Tais perspectivas deverão, ao longo do tempo, alterar o cenário de estagnação econômica e a realidade das comunidades locais (BENEDETTI, 2010). A expansão da silvicultura será importante para o desenvolvimento da região, sobretudo do Bioma Pampa, entretanto, como avaliar a dinâmica dessa paisagem e monitorar tais processos?

Uma das técnicas que podem contribuir para o entendimento acerca do processo de arenização é a modelagem dinâmica do uso e cobertura da terra (BURROUGH, 1998), que ao longo do tempo, tem se destacado em trabalhos de engenharia florestal, biologia, geografia, dentre outros. O propósito da modelagem dinâmica é simular mudanças espaço-temporais nos atributos do meio ambiente sendo atrelada a um território geográfico. Sua concepção permite o entendimento dos mecanismos influentes que determinam a função de mudança e, assim, avaliar de que forma um sistema evolui diante de um conjunto de circunstâncias definidas pelo modelador (BENEDETTI, 2010).

No geoprocessamento, um dos principais desafios é desenvolver métodos que possibilitem modificar sistemas essencialmente estáticos, em ferramentas capazes de representar a realidade de processos espaço-temporais. Nesse caso, a modelagem dinâmica procura transcender as limitações atuais dessa tecnologia, ainda fortemente baseada numa visão estática e bidimensional do mundo.

Nesse contexto, o estudo possibilitará o estabelecimento e a identificação de uma possível relação do uso da cobertura da terra com o aumento ou diminuição de áreas de areal e cobertura florestal, apropriando-se de técnicas de modelagem dinâmica da paisagem a partir de pesquisas de campo e dados de sensoriamento remoto. Tais informações justificam-se por serem relevantes para a difusão da

gestão florestal no Rio Grande do Sul, contribuindo para sustentabilidade da microrregião da Campanha Ocidental, pois se constituem de importante ferramenta para a formulação de políticas públicas e ambientais mais efetivas.

### **1.1 Objetivo geral**

Esta pesquisa constitui-se na aplicação de um modelo para simular a dinâmica do processo de arenização e da cobertura florestal, no Sudoeste do Rio Grande do Sul, denominada microrregião da Campanha Ocidental, no período de 1996 a 2011 e, com base nessas técnicas, efetuar a projeção de cenários futuros.

### **1.2 Objetivos específicos**

1. Identificar os padrões de uso e cobertura da terra, quantificá-los de acordo com imagens de satélites LANDSAT 5 e 8, as quais recobrem a microrregião da Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul;

2. Avaliar a relação existente entre as classes temáticas e as mudanças no processo de arenização e na cobertura florestal;

3. Construir modelos dinâmicos que representem as mudanças das áreas da cobertura florestal e da arenização identificando quais fatores seriam determinantes para tais mudanças;

4. E, com base nesse modelo, fazer a projeção de simulações futuras, identificando a intensidade e a localização das mudanças sofridas ao longo do tempo no processo de arenização e na cobertura florestal.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Bioma Pampa

Conforme o IBGE (2006), Bioma é um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria. No Brasil ocorrem dois distintos grupos vegetacionais: o florestal, que ocupa mais de 60% do território nacional, e o grupo vegetacional campestre, no qual se encontra inserido o Bioma Pampa.

O Bioma Pampa, mais conhecido como estepe, abrange uma área de 176.496 km<sup>2</sup>, o que representa 2,07% do território brasileiro, sendo constituído por vegetação de tipologia aberta, que ocorre no extremo Oeste do Rio Grande do Sul, do planalto e da campanha, ocupando 63% do território gaúcho. É caracterizado pela reunião de formações ecológicas que se inter cruzam em uma formação ecopaisagística única, com intenso tráfego de matéria, energia e vida em campos, matas ciliares (de galeria), capões de mato e matas de encostas, suas principais formações (IBGE, 2006). A biodiversidade da vegetação dos Campos foi estimada em, aproximadamente, 3000 espécies de plantas, sobretudo pertencentes às famílias Asteraceae, Poaceae, Leguminosae, e Cyperaceae (BOLDRINI, 2002; ARAÚJO, 2003; LONGHI-WAGNER, 2003; MATZENBACHER, 2003).

O clima do Bioma Pampa é classificado como mesotérmico brando superúmido e invernos frios (NIMER, 1977). É comum as temperaturas baixarem a 0°C, e os verões serem quentes, com temperaturas superiores a 24°C entre os meses de dezembro a março (SUERTEGARAY, 1998). O relevo é caracterizado de suave a ondulado, variando de 200 a 220 metros de altitude, formando um ambiente denominado coxilhas (AB'SABER, 1969).

Os Campos Sulinos abrigam fauna e flora próprios e com grande diversidade de espécies e modos de vida. Esse ecossistema também é singularmente importante como habitats de espécies endêmicas e ameaçadas de extinção, e

distintas escalas geográficas. Tais características conferem grande valor biológico às formações campestres do Sul do Brasil e as tornam merecedoras de esforços de conservação. A erosão desse patrimônio biológico, por outro lado, representa uma perda significativa em termos de recursos genéticos, ambientais, econômicos, recreacionais e culturais (BENCKE, 2009). Entretanto, a área total ocupada por campos naturais no Sul do Brasil, em 1970, totalizava cerca de 18 milhões de hectares, já em 1996, essa área diminuiu para 13,7 milhões (IBGE, 2006). Entre os principais fatores envolvidos no processo de descaracterização dessa paisagem estão o aumento das fronteiras agrícolas, a expansão da pecuária e o aumento da população nessa região.

O manejo pecuário, atualmente, empregado por parte dos pecuaristas, reduz a heterogeneidade e a variabilidade inerentes aos ecossistemas campestres do Sul do Brasil (BENCKE et al., 2003), resultando no empobrecimento da estrutura da vegetação e, conseqüentemente, do solo, pois com a entrada de novos cultivos e de áreas de pastagem, somando-se a fragilidade do solo desnudo, torna o Bioma Pampa vulnerável à degradação. Essa fragilidade é formada por areais, o qual é o tema desta tese, na qual se pretende explicar o porquê do fenômeno e sua dinâmica ao longo dos anos.

## **2.2 Processo de arenização na microrregião da Campanha Ocidental**

Deserto? Desertificação? Areal? Arenização? Causas naturais? Causas antrópicas? Ou ambas? Tais conceitos e causas foram pesquisados durante décadas por estudiosos de diferentes áreas. Inicialmente, acreditava-se que algumas áreas do Sudoeste do Rio Grande do Sul fossem constituídas de deserto, pelas suas características de clima e vegetação hostis. Assim descreve Souto (1984), em seu livro intitulado “Desertos, uma ameaça? Estudo dos núcleos de desertificação na fronteira sudoeste do RS.” Para Sobrinho (1978), desertificação é a diminuição ou destruição do potencial biológico da Terra, baseado no conceito formulado na Conferência das Nações Unidas, em 1977:

Desertificação é a diminuição ou a destruição do potencial biológico da terra, o qual desemboca em definitivo em condições do tipo desértico. A desertificação é um aspecto da deterioração generalizada dos ecossistemas sob pressões combinadas de um clima adverso e flutuante e de uma exploração excessiva (SOBRINHO, 1978, p. 20).

Historicamente, acreditava-se que a região da Campanha passava por um processo de desertificação, denominando-se essas áreas de desertos. Embora a vegetação seja estépica, as condições pluviométricas são de elevada umidade, em torno ou superiores a 1400 mm. Contudo, tendo-se a concepção de deserto/desertificação sob ponto de vista climático, deduz-se que, as áreas arenosas do Sudoeste do Rio Grande do Sul, não correspondem a áreas desérticas (SUERTEGARAY, 1998). Com o mesmo pensamento, Marchiori (1995) menciona que o termo deserto, utilizado com frequência no meio jornalístico, é inadequado, sendo preferível designar de areal. Segundo o mesmo autor, o resultado desse fenômeno foi o retrabalhamento do solo de origem não antrópica, pela ação de agentes climáticos atuando sobre um substrato pouco consolidado e propício a erosão, não restando dúvidas sobre a origem natural dos areais.

Diversos estudos apontam para a evolução paleoclimática da área, segundo Ab'Saber (1971): O Cretáceo Inferior comportou grandes desertos no País (deserto de Botucatu), porém, com o passar dos anos, houve uma sensível atenuação da aridez. A formação Botucatu é representada por arenitos avermelhados, com baixo teor de argila, originados de dunas eólicas formadas em ambiente desértico. O arenito Botucatu se formou a, aproximadamente, 200 milhões de anos, no período jurássico – Era Mesozóica, e representa um ambiente desértico que se estendia onde hoje é a região Sul do Brasil, até o Estado de São Paulo, mais precisamente na cidade de Botucatu (HOLZ, 1999).

Conforme Möller et al. (1975), no passado geológico, a região de ocorrência dos atuais areais da fronteira Sudoeste do Rio Grande do Sul apresentava clima árido, responsável por um ambiente típico de deserto, constituído essencialmente por areais. Com o passar do tempo, a variação do clima permitiu o desenvolvimento de vegetação e a conformação da paisagem atual, composta por vegetação de campo e matas de galeria. Suertegaray (1987) menciona que essa região caracteriza-se por uma paisagem frágil, derivada de um paleoambiente semiárido ou semiúmido estepário que, mais recentemente, sofreu umidificação. Essa umidificação, por sua vez, foi suficiente para permitir o surgimento de uma

vegetação arbórea nas áreas úmidas de vales ou nas vertentes de encostas abrigadas, formando-se as matas de galeria ou as matas de encosta respectivamente. Por outro lado, esse tipo de clima foi insuficiente para mascarar e/ou eliminar os vestígios da paisagem pré-moderna, acarretando na atual paisagem em processo de constituição pedogenética e de vegetação recente (SUERTEGARAY, 1995). Nesse sentido, Suertegaray (1987) elaborou o conceito de arenização:

Retrabalhamento de depósitos areníticos (pouco consolidados) ou arenosos (não consolidados) que promove nessas áreas dificuldade de fixar a vegetação, devido à constante mobilidade dos sedimentos. O retrabalhamento desses depósitos, no caso de formações superficiais, provavelmente quaternárias, resultou de uma dinâmica morfogenética onde os processos hídricos superficiais, particularmente o escoamento concentrado do tipo ravina ou voçoroca, associados a chuvas torrenciais, expõe, transporta e deposita areia, dando origem à formação de areais que, em contato com o vento, tendem a uma constante remoção (SUERTEGARAY, 1987, p. 53).

Os areais são formados por areias quartzosas com grânulos de sílica, além de concreções e nódulos de ferro. Estão associados a depósitos coluviais no sopé das colinas e cerros, gerados com a remoção das partículas de menor granulometria e concentração do material arenoso (PAULA e ROBAINA, 2003). Segundo Suertegaray (1995), a gênese dos areais está vinculada a três processos naturais: a deflação, o escoamento superficial e o escoamento concentrado sob a forma de ravinas e voçorocas. Nos meses de verão, predomina a deflação. As chuvas ocasionais e de curta duração, associadas às altas temperaturas e à evaporação, provocam, em alguns locais, o ressecamento do solo, favorecendo a movimentação de suas partículas pela ação dos ventos. O choque entre partículas maiores e menores ocasiona o fracionamento das mesmas, em unidades cada vez menores, até o tamanho de um grão de areia.

A localização das manchas de areais na microrregião da Campanha Ocidental concentra-se nos Municípios de Alegrete, Itaqui, Maçambará, Manoel Viana, Quaraí, São Borja, São Francisco de Assis e Uruguaiana. Nessa região, predomina os tipos de solos apresentados na Tabela 1. Tais solos, geralmente, apresentam baixa resistência às intempéries como, por exemplo, vento e a precipitação, sendo susceptíveis à erosão. Acrescentando a textura arenosa e a baixa profundidade, o antropismo aumenta a fragilidade desses tipos de solos.

Tabela 1 – Tipos de solo da Microrregião da Campanha Ocidental, no Sudoeste do Rio Grande do Sul, e suas respectivas características.

Solo	Resistência	Material de Origem	Erosão	Declive	Drenagem	Textura
Argissolo Amarelo alítico típico	Baixa	Siltito/Arenito	Moderada/Forte	6	Imperfeita	Arenosa/Média
Argissolo Bruno acinzentado alítico abruptico	Média	Siltito/Argilito	Moderada/Forte	7 a 8	Moderada	Média/Argila
Argissolo Vermelho-amarelo distrófico	Alta	Siltitos	Moderada	8	Bem	Argila
Chernossolo Ebânico carbonático vértico	Baixa	Basalto	Nula/Fraca	3	Imperfeita	Argila expansiva
Gleissolo Háptico Tb eutrófico típico	Muito baixa	Sedimentos de basalto	Nula	0 a 3	Muito mal	Argila
Latossolo Vermelho distroférico típico	Alta	Basalto	Fraca/Moderada	3 a 10	Bem	Argila
Latossolo Vermelho distrófico típico	Média	Arenito	Moderada	8 a 10	Acentuada	Média
Neossolo Flúvico Ta ou Tb distrófico ou eutrófico	Muito baixa	Sedimentos	Nula	0 a 3	Muito mal	
Neossolo Litólico distro-umbrico fragmentário	Muito baixa	Basalto ou granito	Forte	10	Moderada/bem	Média
Neossolo Quartzarênico órtico típico	Muito baixa	Sedimentos arenosos	Forte	0-8	Excessiva	Areia
Neossolo Regolítico húmico léptico ou típico	Muito baixa	Xisto	Moderada/Forte	5 a 8	Bem	Média
Nitossolo Vermelho eutroférico típico	Alta	Basalto	Fraca/Moderada	3 a 8	Bem	Argila
Planossolo Háptico eutrófico arênico	Muito baixa	Sedimentos	Nula	3 a 5	Imperfeita	Arenosa/Argila
Planossolo Háptico eutrófico solódico	Muito baixa	Sedimentos de granito	Nula	0 a 3	Imperfeita	Média/Argila
Plintossolo Argilúvico eutrófico	Baixa	Basalto	Nula/Fraca	5	Imperfeita	Argila expansiva
Vertissolo Ebânico órtico chernossólico	Baixa	Basalto	Moderada/Forte	5	Imperfeita	Argila expansiva

Fonte: Adaptado de KÄMPF (2008).

Na microrregião da Campanha Ocidental, têm-se como principais atividades a agricultura e a pecuária extensiva. Na agricultura, a produção é baseada no plantio do arroz irrigado próximo às drenagens. Segundo Paula (2003), nas colinas ocorre o cultivo da soja, introduzido na região ao final da década de 60, realizado em médias e grandes propriedades da região. A pecuária é representada, predominantemente, pela criação de bovinos de corte. A pecuária extensiva tem sido, por mais de duzentos anos, a forma tradicional de aproveitamento econômico dos campos sulinos. Porém, essa região é uma das raras paisagens em que essa atividade econômica provoca pouco impacto ambiental, sendo o grande risco sobre esse ambiente decorrente da expansão da fronteira agrícola, especialmente no que se refere às culturas de soja e arroz (CONSERVA, 2005).

As observações da dinâmica de formação dos areais na microrregião da Campanha Ocidental demonstram que em áreas planas, a principal causa da arenização é a atividade agropecuária executada sem práticas conservacionistas. Já em locais com elevações do relevo, como nos platôs de arenito silicificado, a fragilidade natural do ecossistema predomina como causa da degradação, especialmente da composição mineralógica com baixo grau de agregação. Nos areais formados em relevo plano, nota-se maior influência da erosão eólica no transporte de partículas, enquanto que, nos morros de arenito silicificado, a precipitação tem importante papel na movimentação de sedimentos em sentido descendente, formando depósitos nas bases (ROVEDDER, 2003).

Para Trindade (2003), em areais manejados sob pastoreio ocorre redução do número de espécies, da abundância-cobertura das espécies e do mantilho. Em contrapartida, provoca o aumento de substrato exposto. Com isso, perdem-se nutrientes e a mobilização dos sedimentos, que por sua vez, dificultam a continuidade da pedogênese e a fixação da vegetação, resultando nos atuais areais (SUERTEGARAY, 2011). Nas últimas décadas, tem-se notado a preocupação com essas áreas e o aumento das pesquisas referentes ao uso e ocupação dessas, possibilitando maior esclarecimento sobre o padrão e a gênese dos areais, além de fornecerem conhecimento básico para nortear outros possíveis estudos na área (SOUTO, 1984; SUERTEGARAY, 1987; MARCHIORI, 1995; AUZANI, 2003; ROVEDDER, 2007; ELESBÃO, 2011).

Entre 1960 e 1970, em estudo realizado em areais antigos da região Sudeste do Rio Grande do Sul, conhecido popularmente como “Deserto de São João”, foram

testados diferentes métodos de contenção da erosão eólica, obtendo-se maior eficiência para conter o processo de arenização quando realizado plantio de eucalipto na borda de transição entre o areal e o campo nativo (SOUTO, 1984). Uma prática comum na área são os florestamentos de eucaliptos e pinus, especialmente junto às áreas de arenização (Figura 1).

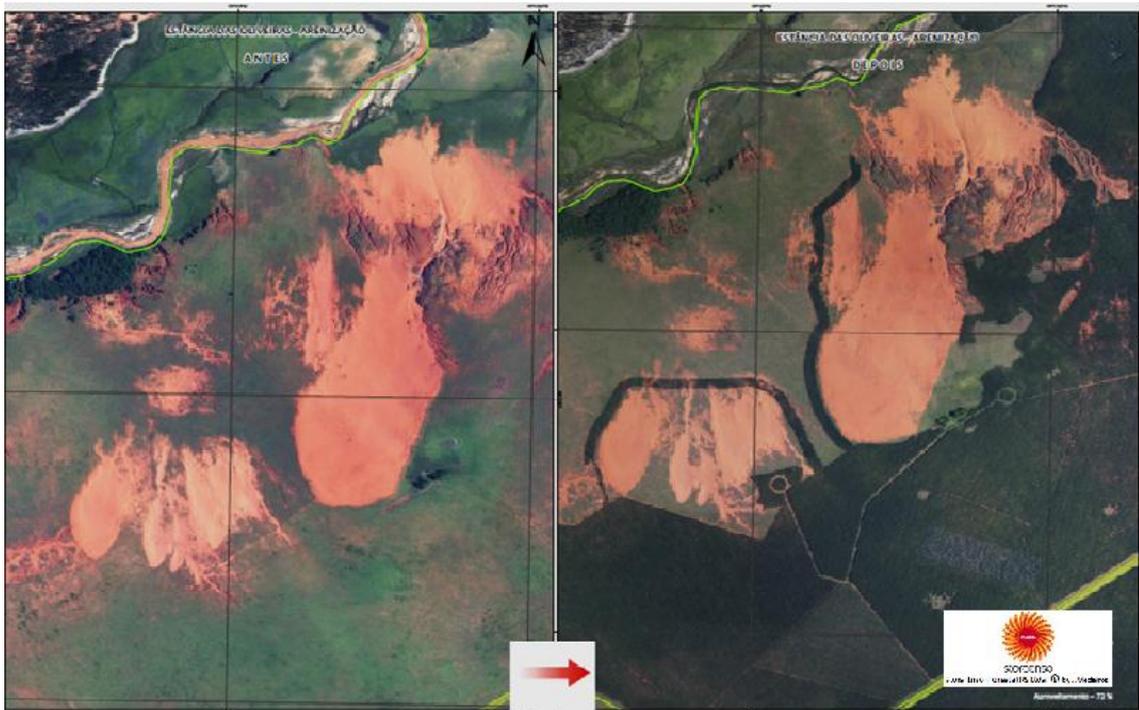


Figura 1 – Plantio de *Eucalyptus* spp. na borda de transição entre o areal e o campo nativo na microrregião da Campanha Ocidental, Sudoeste do Rio Grande do Sul.

Fonte: Stora Enso (2007).

O uso controlado da pecuária, o isolamento total da área por longo período, o plantio direto e aproveitamento econômico de cultivos de eucaliptos (Figura 2), bambus, uvas-japonesas, capins-elefante e outras gramíneas viáveis à região, também têm sido alternativas utilizadas para proteger e impedir o avanço dos areais.



Figura 2 – Plantio de *Eucalyptus* spp. e sua estabilização na recuperação dos areais na microrregião da Campanha Ocidental - RS.

Fonte: Stora Enso (2007).

Solos arenosos do Bioma Pampa são, portanto, de difícil recuperação após serem perturbados, apresentando baixa resiliência, especialmente em virtude da fragilidade dos componentes do solo e da cobertura vegetal. Nesse caso, um dos principais passos para recuperação é o restabelecimento da cobertura vegetal nos locais de solo exposto e a manutenção desta em qualquer atividade antrópica estabelecida na região (ROVEDDER, 2007).

Portanto, tem-se uma nova configuração no que os areais representam para a região, pois sempre estiveram presentes, e partindo-se de novas metodologias e pesquisas, tem sido possível maior conhecimento acerca do assunto. Dessa forma, diante da necessidade de sobrevivência sócio-econômica dos habitantes dos pampas gaúchos frente a problemática exposta, possibilitou-se aliar alternativas sustentáveis passíveis de serem praticadas, visando obtenção de benefícios econômicos e a conservação dessas áreas em longo prazo.

### 2.3 Dinâmica do uso e ocupação da terra

O aumento da população mundial e da demanda por alimentos que supram a necessidade da humanidade, fez com que o homem transformasse o ambiente para expandir as fronteiras agropecuárias. É bem verdade que o homem além de ser o maior agente causador de degradações, pode ser também um agente conservacionista. Mas unir os fatores econômico, social e ambiental, igualmente, em uma comunidade que necessita cada vez mais de alimentos, é ainda um desafio para a civilização atual, pois sempre o fator econômico é prioridade.

Todas as ações naturais e antrópicas estão interligadas, o uso da terra, por exemplo, exerce influência direta sobre o clima. Ultimamente, as ações antrópicas vêm causando mudanças ambientais em dimensões cada vez maiores, gerando relevantes impactos sobre a biosfera. Entre essas ações, as mudanças no uso e cobertura da terra podem ser citadas como as mais significativas (TORRES, 2011). Silva (2011) menciona que a expansão desordenada das atividades humanas pode acarretar a redução da cobertura vegetal, o aumento de processos erosivos e de áreas impermeabilizadas, com decorrente contaminação dos cursos d'água. O mesmo autor relata que, além de serem correlacionadas, algumas dessas causas possibilitam o aparecimento de assoreamento de cursos de água e reservatórios que, por sua vez, é desencadeado pelo desmatamento e por atividades antrópicas não sustentáveis.

Quando iniciados os processos de degradação ambiental sem que exista uma rápida ação de recuperação, torna-se inviável economicamente a tentativa de solucionar esse problema. Entretanto, tais processos podem ser minimizados por estudos da paisagem que gerem subsídios para a elaboração de planos ordenados visando equilibrar a relação entre o homem e a natureza. Por isso, atualmente, pesquisas têm sido desenvolvidas no intuito de identificar as principais causas, os causadores e as consequências da degradação do meio ambiente, assim como, para a busca de alternativas que mitiguem os efeitos da degradação ambiental (DUARTE, 2009).

De acordo com Pinton e Cunha (2008), a intensificação das atividades antrópicas trouxe consigo o desenvolvimento de técnicas que resultaram no

estabelecimento das mais diversas formas de uso e ocupação da terra, as quais deram início ao processo denominado de erosão acelerada. Neste contexto, esses autores consideram que, uma análise integrada dos atributos naturais de certa área e da dinâmica do uso da terra inserida na mesma, contribui para compreensão do desenvolvimento tanto dos processos erosivos laminares quanto dos processos erosivos lineares. Santos (2004) salienta a importância de estudos sobre o uso e ocupação da terra como de fundamental importância, pois se trata de um tema básico para o planejamento ambiental, retrata as atividades humanas que podem significar pressão e impacto sobre os elementos naturais, configurando-se um elo importante entre as informações dos meios biofísico e socioeconômico.

O conhecimento acerca da forma como se utiliza a terra, somado a informação do uso histórico, remete a um fator importante e imprescindível ao estudo dos processos em que uma região se desenvolve. Dessa forma, tem-se conhecimento necessário e de fundamental importância para uma resposta eficaz, na medida em que os efeitos do mau uso da terra avançam deteriorando o ambiente. Uma das técnicas que possibilitam o estudo e a caracterização da dinâmica do uso e ocupação da terra é o Sensoriamento Remoto. Segundo Santos (2003), a caracterização do uso e ocupação das terras em séries temporais, quando bem espacializadas e avaliadas, constitui eficiente forma de análise das mudanças, sendo determinadas por períodos que indicam fortes alterações ou determinação do grau de evolução de uma específica atividade ou característica do meio.

## **2.4 Sensoriamento Remoto**

Define-se Sensoriamento Remoto (SR) como sendo uma tecnologia capaz de registrar informações entre a radiação eletromagnética e as substâncias constituintes da Terra, por meio de instrumentos sensores localizados em plataformas presentes em satélites ou aeronaves (JENSEN, 2009). Segundo Novo (2011), sensoriamento remoto é a utilização conjunta de modernos sensores, que são equipamentos para processamento e transmissão de dados, com o objetivo de estudos do ambiente terrestre pelo registro e análise das interações entre a radiação

eletromagnética e as substâncias constituintes do planeta Terra, em suas mais diversas manifestações.

O SR tem sido uma das ferramentas mais utilizadas para o estudo da Terra, por fornecer visão panorâmica de uma dada região, sendo esta uma importante característica para a realização de estudos de fenômenos dinâmicos (CENTENO, 2003), tais como inventários de recursos naturais, avaliação de impactos ambientais, conservação da natureza e análise de solo. Essa tecnologia também fornece subsídios para elaborar, executar e monitorar projetos, possibilitando a obtenção de informações de uma região em menor tempo e possui custo relativamente baixo se comparado com outras técnicas.

O uso de SR para a elaboração de mapas de uso e ocupação da terra numa determinada área, em séries temporais, têm sido eficiente recurso para a avaliação da evolução de uma situação. Segundo Rodrigues et al. (2011), trabalhos voltados à pesquisa do uso e da cobertura da terra e do monitoramento de ecossistemas, que utilizam imagens orbitais, auxiliam na detecção das tendências de mudanças de ordem global, regional e local.

Segundo Sausen (2000), os recursos naturais e o meio ambiente estão em mudança contínua, decorrente da resposta à evolução natural e às atividades humanas. Para compreender o complexo inter-relacionamento dos fenômenos que causam tais mudanças, é necessário realizar observações com uma gama de escalas temporais e espaciais. A observação da Terra por meio de satélites, utilizando as técnicas de SR, é uma das maneiras mais efetivas e econômicas de coletar os dados necessários para monitorar e modelar esses fenômenos, especialmente em países de grande extensão territorial, a exemplo do Brasil.

O SR como “descendente” natural da fotografia convencional, teve seu crescimento juntamente com a ciência da computação, a partir do final dos anos 50, em virtude da necessidade do Programa Espacial Norte Americano em adquirir imagens em larga escala e de uma forma mais ampla. O desenvolvimento conjunto dessas tecnologias fez com que o SR viesse a englobar não apenas diferentes tipos de imagens e sensores, mas, também, o emprego de técnicas de processamento de imagens digitais, propiciando a geração de produtos mais variados que os oferecidos até então pelas técnicas e sensores fotográficos tradicionais (PEREIRA, 1997).

Hoje, os dados de SR são provenientes de satélites e são imediatamente registrados digitalmente. Nesses satélites, os sistemas sensores são discriminados em passivos, os quais registram a radiação refletida ou emitida da superfície terrestre, ou sensores ativos, que têm uma fonte de iluminação praticamente própria e, assim, permitem o imageamento diurno e noturno, tais como o sistema laser e radar (OLIVEIRA, 2010). Segundo Eastman (2001), usualmente, o SR se utiliza de sensores passivos, onde o Sol é a principal fonte de energia. Porém, nem todos os sensores utilizam essa energia, podendo sensores no infravermelho termal e de micro-ondas medir emissões da energia natural da Terra (energia térmica).

Conforme Novo (2011), algumas características são intrínsecas do SR, destacando-se:

1. A distribuição espectral da radiação solar refletida e emitida pelos objetos não são uniformes. Os níveis da radiação solar variam no tempo e lugar e os diferentes materiais na superfície terrestre emitem radiação em diferentes níveis de eficiência;

2. A atmosfera altera a intensidade e a distribuição espectral da Radiação Eletromagnética (REM) recebida por um sensor em função do comprimento de onda, do tipo de sensor utilizado e da forma de aplicação;

3. As interações da energia com o material na superfície terrestre apresentam ambiguidades. Tipos de materiais radicalmente distintos uns dos outros podem apresentar uma grande similaridade espectral, tornando difícil o trabalho de diferenciação;

4. Os sensores possuem limites fixos de sensibilidade espectral e variações na sua resolução espectral, que é uma indicação de seu nível de capacidade em registrar detalhes de natureza espacial;

5. A capacidade atual de gerar dados excede a capacidade corrente de processar esses mesmos dados, em se tratando dos procedimentos de interpretação visual e assistidas por computador.

6. As pessoas que utilizam os dados gerados por qualquer sistema de SR são essenciais à aplicação bem-sucedida desse sistema. Os dados gerados somente se tornam informação quando alguém possui bom entendimento acerca de sua geração, interpretação e forma de utilização. Assim sendo, as técnicas visuais e digitais são complementares por natureza, e considerações criteriosas devem ser

feitas antes de definida a abordagem (ou combinação de abordagens) a ser adotada para uma determinada aplicação.

Algumas etapas são inerentes no estudo utilizando SR. Inicialmente, se estabelece o problema a ser averiguado; em seguida, identificam-se os procedimentos adequados de aquisição dos dados de SR para a tarefa a ser realizada; posteriormente, coletam-se os dados e determina-se os procedimentos e interpretação dos mesmos. A partir daí, identifica-se os critérios pelos quais a qualidade da informação pode ser julgada, converte-se os dados gerando informação e, por fim, os apresenta.

O SR divide-se em dois subsistemas: coleta de dados e a análise desses dados. A coleta de dados depende da existência de fontes de radiação, propagação da radiação pela atmosfera, incidência da radiação sobre a superfície terrestre, interações entre a REM e o material, e o retorno da radiação ao sistema sensor. Os sensores captam as informações que são resultantes da interação da REM com o alvo. A energia proveniente dos alvos pode ser refletida, transmitida, absorvida ou emitida pela superfície e, a partir destas interações com a atmosfera ou ambiente, pode-se inferir características físicas (dimensão, forma, temperatura e cor) e químicas (composição) dos alvos em estudo.

Todo o processo de aquisição de dados ocorre dentro de faixas do espectro eletromagnético, o qual é dividido em regiões que possuem características peculiares em termos de processos físicos (INPE, 2012). Um sistema sensor imageador produz imagem bidimensional da radiância ou emitância das trocas energéticas, num determinado instante e espaço físico, tornando-se apto a extrair informações sobre dada região (ROCHA, 2000).

As imagens oriundas dos sistemas sensores possuem alguns parâmetros, tais como resolução e largura da faixa imageada. A largura da faixa imageada depende do satélite em questão. O satélite LANDSAT, o qual foi utilizado neste estudo, possui faixa de varredura de 185 Km<sup>2</sup>. De acordo com Silva (1995), esses parâmetros são definidos como: resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica e resolução temporal. A resolução espacial é o menor elemento de área que o sensor é capaz de distinguir, sendo esta diretamente relacionada com o tamanho do pixel da imagem (MOREIRA, 2011). A resolução espectral representa a menor porção do espectro eletromagnético que um sensor é capaz de segmentar, determinando se o alvo pode ser visto na imagem em função de seu comportamento espectral

(PEREIRA, 1997). A resolução radiométrica é a menor diferença de brilho que um sensor é capaz de perceber em função de seu contraste. Está relacionada com o número de níveis de cinza, ou seja, quanto maior o número de níveis maior será a resolução (INPE, 2012). A resolução temporal é a frequência que um sistema sensor é capaz de imagear um mesmo alvo. Esta resolução é importante na identificação de processos que se modificam no decorrer do tempo, permitindo o seu monitoramento (PEREIRA, 1997).

#### 2.4.1 Geoprocessamento

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi parte importante das atividades das sociedades organizadas. Até recentemente, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, o que impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Com o desenvolvimento da tecnologia de Informática, na segunda metade deste século, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento (CÂMARA e DAVIS, 2004).

O termo Geoprocessamento denota uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas, que abrange um conjunto de procedimentos de entrada, manipulação, armazenamento e análise de dados. Essa tecnologia tem influenciado de maneira significativa as áreas de Cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. Nos países de grande dimensão e com carência de informações adequadas para tomada de decisões sobre problemas urbanos e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em técnicas de custo relativamente baixo, em que o conhecimento é adquirido localmente (CÂMARA e MEDEIROS, 1998).

Para Hendges (2007), o Geoprocessamento não é considerado uma ciência, e sim, um conjunto de técnicas em prol desta. Para conseguir atingir um tratamento e análise de dados satisfatórios o geoprocessamento incorpora técnicas de última geração, envolvendo desde satélites de observação da Terra, técnicas de

mensuração por sistemas de posicionamento, até sofisticados sistemas e equipamentos de informática.

Quando falamos de geoprocessamento, devemos primeiramente definir seus instrumentos computacionais, dessa definição, surge um novo conceito denominado de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que é definido por Moreira (2011), como um conjunto de ferramentas que permitem análise envolvendo dados espaciais e não espaciais sobre o espaço terrestre. Um SIG permite a associação de dados geográficos (posicionais) a uma infinidade de atributos (dados alfanuméricos), possibilitando assim realizar consultas, análises e simulações, envolvendo todo o tipo de informação em que a variável “espaço” é importante. Segundo Aronoff (1989), um SIG refere-se a um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados. Também é considerado como sistema de captação, armazenamento, visualização, análise e apresentação de dados.

De acordo com Câmara e Queiroz (2004), existem três maneiras de utilizar um SIG: (i) ferramenta para produção de mapas, (ii) suporte para análise espacial de fenômenos e (iii) banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial. Numa visão abrangente, Moreira (2011), define que um SIG é composto de cinco componentes independentes, porém ligados uns aos outros por funções específicas, sendo: (i) interface com o usuário; (ii) entrada e integração de dados; (iii) funções de consultas e análise espacial; (iv) visualização e plotagem; e (v) banco de dados geográficos (Figura 3).

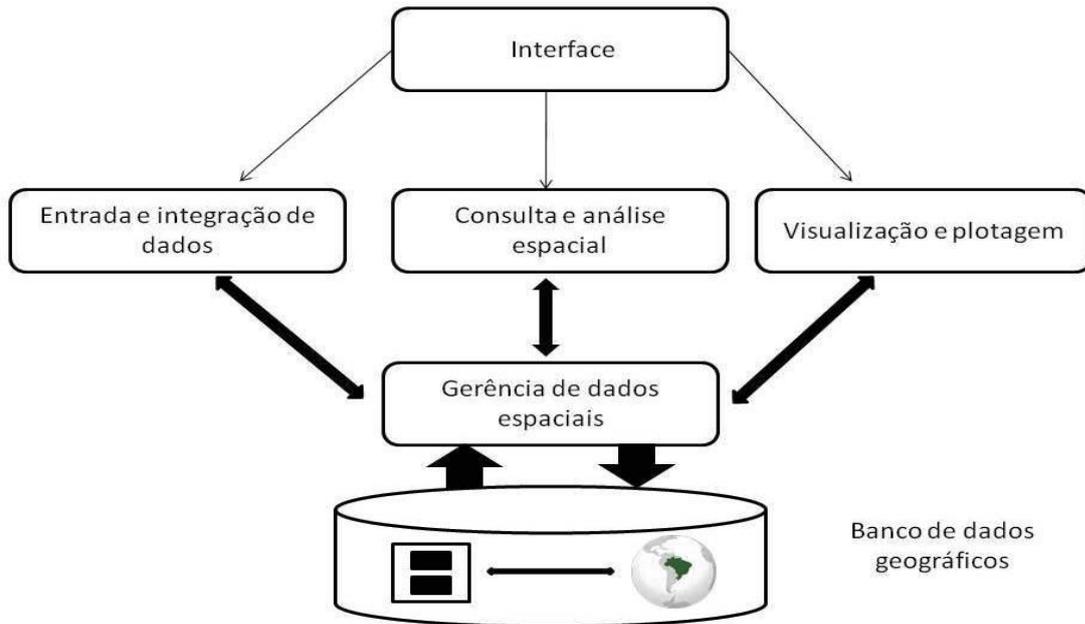


Figura 3 – Desenho esquemático de um sistema de informação geográfica.

Fonte: adaptada de Câmara e Medeiros (1996).

De acordo com Silva et al. (2004), a base de dados de um SIG admite a relação de elementos e atributos que podem gerar um conjunto de informações temáticas gerenciáveis por meio de “temas” ou “camadas”, e este conjunto de informações possuem tipos de dados alfanuméricos e gráficos. A representação digital destas informações pode apresentar-se de dois modos distintos, no que diz respeito aos aspectos espaciais (gráficos): formato vetorial, no qual o desenho é representado por vetores (ou mais especificamente, pontos, linhas e polígonos), ou formato raster (ou matricial), no qual os desenhos são representados por células (*pixels* ou *picture elements*).

#### 2.4.1.1 Processamento digital de imagens

Por Processamento Digital de Imagens (PDI) entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar PDI é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer subsídios para a sua interpretação,

inclusive na geração de produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos (SPRING, 1996). Segundo Crosta (1992), o processamento digital envolve técnicas (Tabela 2) para identificação, extração, condensação e realce da informação de interesse a partir de dados que compõem a imagem.

Segundo Moreira (2011), programas computacionais utilizam algoritmos para o reconhecimento dos padrões espectrais. De acordo com o algoritmo utilizado, a classificação pode ser supervisionada ou não-supervisionada, envolvendo as fases de treinamento e a classificação propriamente dita. A classificação supervisionada necessita a tomada de amostras pelo analista para as classes temáticas criadas, e a classificação não-supervisionada baseia-se na análise de agrupamentos realizadas pelo computador. A vantagem da classificação não-supervisionada, segundo Novo (2011), é o não requerimento de conhecimento prévio da área de estudo por parte do analista, não sendo necessário, então, a obtenção de amostras de campo.

Tabela 2 – Técnicas de processamento digital de imagens utilizadas no Sensoriamento Remoto.

Pré-processamento	Consiste na transformação em dados corrigidos radiométrica e geometricamente. Também se faz o realce da imagem, através da manipulação de contraste, filtragem espacial e rotação de imagens. Na georreferência da imagem, utilizam-se pontos de apoio conhecidos para seu registro.
Classificação	Consiste na associação de cada pixel a uma informação qualitativa (a uma classe ou tema).

Fonte: adaptada de Moreira (2011).

Em qualquer abordagem aplicada ao SR, não se deve apenas estabelecer a combinação correta de técnicas de aquisição e interpretação de dados, mas também a combinação correta de técnicas modernas de SR e aquelas ditas “convencionais”.

O especialista deve ter em mente que o SR é uma ferramenta que produz melhores resultados quando utilizada em conjunto com outras. Além disso, o SR nos dá, literalmente, a capacidade de “ver o invisível”, sendo assim, essa tecnologia transcende as fronteiras disciplinares, tornando-se vasta em suas possibilidades de aplicação, ao ponto de tornar inútil a tentativa de denotá-la como ferramenta puramente civil (monitoramento ambiental, de safras agrícolas, de catástrofes, de poluição marinha, estudos geológicos, entre outros) ou eminentemente militar (inteligência de imagens) (PEREIRA, 1997).

É uma questão inerente o fato de que o SR continuará a desempenhar um papel crescente nos processos de decisão, sejam esses de caráter estratégico ou não. A evolução tecnológica de sistemas sensores, plataformas espaciais ou referentes aos sistemas de comunicações, de posicionamento global, de processamento de imagens digitais e de informações geográficas ocorre numa base quase que diária. Resta aos reais e potenciais usuários desse tipo de tecnologia manter a capacidade de utilização da mesma, a fim de acompanhar todo o processo de maneira efetiva.

#### 2.4.1.2 Classificação de imagens

O mapa temático obtido da interpretação de imagens de satélites tem como objetivo representar o universo real. Em geral, o que se busca é representar espacialmente as feições contidas na área imageada e quantificar as classes de uso e ocupação do solo (MOREIRA, 2011). Por meio da interpretação do que é real para o que foi obtido existem, sem dúvidas, erros relacionados às análises dos dados, principalmente se tratando de imagens de média resolução como são os casos do sensor TM e OLI.

A coleta dos dados de referência, ou seja, aqueles que representam a situação real de campo à época da obtenção da imagem, é uma parte essencial de qualquer projeto de classificação e mapeamento envolvendo dados obtidos por meio de sensoriamento remoto. Esses dados são usados para verificar a exatidão da classificação entre classes e como entrada no processo de refinamento da classificação (CONGALTON e BIGING, 1992).

No entanto, todo o processo de classificação está sujeito a erros dos mais diversos tipos e fontes. A avaliação da acurácia dos dados extraídos das imagens está diretamente relacionada com a qualidade do mapeamento. Todas as classes que compõem a imagem ou o mapa temático devem estar associadas a um controle de qualidade para que estas possam ser validadas. Entende-se que um mapeamento temático só deve ser utilizado como fonte fidedigna de informações quando associados a processos de avaliação da acurácia dos dados que o compõem (FERRARI, 2008).

No processo de análise dos dados do sensoriamento remoto, um passo fundamental é a avaliação da precisão temática. Os usuários necessitam saber quão confiáveis são os dados provenientes dos mapas temáticos, derivados da classificação de um produto do sensoriamento remoto, e por meio da matriz de confusão é possível derivar medidas e conseqüentemente verificar erros oriundos do processo de atribuição dos pixels a determinadas classes (VIEIRA, 2000).

Segundo Silva (2011), a avaliação da acurácia pode ser obtida por meio de coeficientes de concordância, sendo que estes podem ser expressos como concordância total ou para classes individuais. Entre os coeficientes de concordância se podem citar: *Kappa* (COHEN, 1960) e Tau (KLECKA, 1980).

Dentro desse contexto, uma das maneiras de se saber a exatidão de uma classificação temática com eficiência é o coeficiente *Kappa* (*K*), pois segundo Congalton e Green (1999), o índice é obtido mediante a adoção de uma referência para comparação dos mapeamentos produzidos, e neste caso, a análise da exatidão é obtida por meio 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.

Silva (2011), ainda ressalta que 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 e Biging (1992) destacaram 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 (Equação 1):

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

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.

Os valores do índice de *Kappa* ( $K$ ) variam entre -1 e 1, o qual o valor 1 reflete uma total concordância entre a imagem classificada e a imagem real e o valor -1 quando há uma total discordância. Esses valores são comparados e confrontados com os conceitos definidos por Landis e Koch (1977), que servem para avaliar a exatidão do mapa temático obtido da classificação da imagem (Tabela 3).

Tabela 3 – Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente *Kappa*.

<b>Valor do <i>Kappa</i></b>	<b>Qualidade da classificação</b>
< 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).

## 2.5 Modelagem dinâmica espacial

O desenvolvimento tecnológico amplia a capacidade em se obter informações de acontecimentos e fenômenos para posterior análise. Uma relevante quantidade de informação deve ser processada antes de ser transformada em conhecimento. Portanto, são necessárias ferramentas estatísticas que apresentem uma visão global dos fenômenos (MOITA NETO, 2004).

A geração de Sistema de Informação Geográfica (SIG) configura uma tecnologia estabelecida para armazenar, organizar, recuperar e modificar informações sobre a distribuição espacial de recursos naturais, dados geodemográficos, redes de utilidade pública e outros tipos de dados localizados na superfície da Terra. Nessa área, um dos principais desafios para os próximos anos é transformar estes sistemas, essencialmente estáticos, em ferramentas capazes de prover representações realistas de processos espaço-temporais. A modelagem de elevada quantidade de processos físicos, em aplicações como geomorfologia, estudos climáticos, dinâmica populacional e impacto ambiental, requer que os SIGs tenham capacidade de representar os tipos de processos dinâmicos encontrados em estudos de sistemas físicos e socioeconômicos (PEDROSA e CÂMARA, 2002).

Modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo. Segundo Lambin (1994), o modelo de um fenômeno deve responder às seguintes questões: 1) Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno, e quais são os processos ecológicos e socioeconômicos existentes por trás do fenômeno?, 2) Como o processo evolui?, e 3) Onde ocorrem os fenômenos?

O estudo de mudanças na paisagem vem sendo desenvolvido pela aplicação de técnicas de modelagem e da criação de modelos. Soares-Filho (1998) refere-se ao termo modelagem como o processo de pesquisa que leva à geração do modelo (representação) de um sistema. Esse processo se desenvolve, então, pela definição de um conjunto de hipóteses ou previsões, as quais 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.

A modelagem dinâmica tenta superar as limitações que existem na tecnologia do geoprocessamento, transcendendo a visão estática e bidimensional do mundo. Segundo Burrough (1998), o objetivo dos modelos dinâmicos em SIG é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, como nos modelos hidrológicos, que simulam o fluxo e transporte de água. Segundo esse autor, um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta às variações nas forças dirigidas.

Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao se construir um modelo, dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro desses elementos. Nessa visão, os modelos podem ser classificados em empíricos e de sistemas. Modelos empíricos focalizam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, partindo da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Modelos de sistemas são descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações entre todos os componentes de um sistema (LAMBIN, 1994).

Pedrosa (2004) propõe o uso de modelos espaciais dinâmicos pois descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, sendo capazes de simular cenários de sustentabilidade local e regional. No Brasil, pesquisas de maior relevância no meio científico tratam da modelagem de fenômenos de desmatamento, especialmente na região Amazônica e de evolução urbana. No Rio Grande do Sul, Hendges (2007) procurou desenvolver um modelo adequado para representar a dinâmica florestal, projetando a expansão de áreas florestais para o ano de 2020. Benedetti (2010) desenvolveu um modelo dinâmico para simular mudanças na cobertura florestal das Serras do Sudeste e Campanha Meridional até 2016.

O resultado de um modelo de simulação espacial (Figura 4) permite que se testem hipóteses para a predição de cenários, que por sua vez contribuem fortemente com o planejamento a médio e longo prazo (SOARES FILHO et al., 2004). Nesse caso, para se dar o primeiro passo na construção de um modelo de simulação de mudanças, é necessário definir um modelo conceitual, no qual são definidos os elementos e/ou estados da paisagem com suas respectivas transições possíveis.

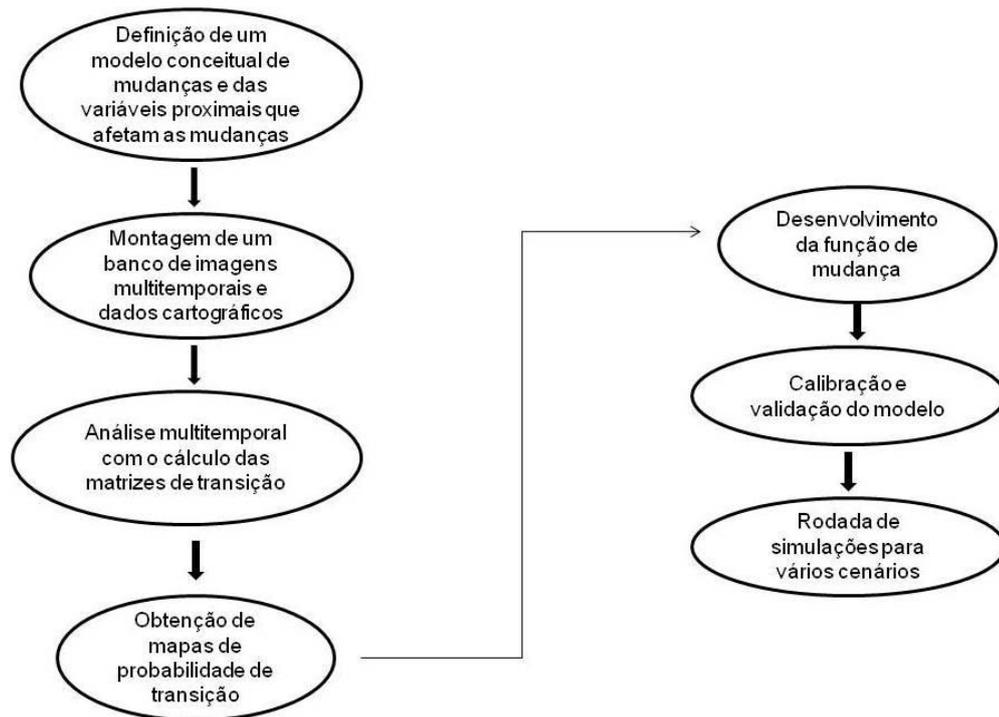


Figura 4 – Fluxograma de desenvolvimento e aplicação de um modelo de simulação espacial.

Fonte: Adaptado de Soares Filho et al. (2004).

Dessa forma, tem-se toda a estrutura genérica de um modelo necessário para realizar a simulação de cenários de uso e ocupação da terra. Dependendo apenas da capacidade do modelador e do objetivo do fenômeno que será observado.

### 2.5.1 Modelo estocástico

Um dos modelos de estudos da paisagem, classificados como estocásticos, é descrito por Pedrosa e Câmara (2002) como modelos matemáticos empíricos. Segundo Pedrosa (2004), os modelos empíricos, em sua dimensão procedimental, possuem três componentes chaves: configuração inicial, função de mudança e configuração de saída. A configuração inicial de um modelo dinâmico pode ser obtida partindo-se de dados históricos do fenômeno em estudo, chamados de séries temporais. Neste caso, equações diferenciais (totais ou parciais), que incluem pelo menos um termo derivado no tempo, podem ser utilizadas para representar o

modelo, sendo o processo classificado como determinístico. Quando variáveis aleatórias são utilizadas para explicar um sistema, o processo é classificado como estocástico-probabilístico. Entre os modelos estocásticos mais empregados para simulação do uso da cobertura da terra, destaca-se a cadeia de Markov, que é caracterizada por descrever processos estocásticos, sendo determinadas por (Equação 2):

$$\Pi_{T+1} = P^n \times \Pi_t \quad (2)$$

Sendo  $\Pi_t$ , o estado do sistema no tempo  $t$ ,  $\Pi_{T+1}$ , o estado do sistema após o instante  $t+1$ , e  $P^n$ , os estados possíveis de acontecer, que são representados em matrizes de possibilidades de transição. 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 cadeia de Markov não ignora o passado, mas assume que toda a informação do passado está concentrada no presente estado do sistema. Desta forma, as interações são instantâneas, sendo irrelevante o tempo de permanência das variáveis em cada estado (SOARES FILHO, 1998). Pedrosa (2004) menciona que uma das características das cadeias de Markov é que as probabilidades de transição não mudam com o tempo, o que o caracteriza como um processo estacionário. Suas principais vantagens são a simplicidade operacional e matemática aliadas à facilidade com que podem ser aplicadas a dados provenientes de sensoriamento remoto e implementadas em SIG. Outra grande vantagem da cadeia de Markov é o fato de não necessitar de elevada quantidade de dados antigos para prever o futuro.

De acordo com Godoy (2004), para se modelar os dados de mudança do uso da terra, são utilizados os conceitos de modelos distribucionais estocásticos, baseados nos conceitos das cadeias de Markov, cuja formulação matemática baseia-se na matriz de transição. O processo de Markov modela a mudança do uso da terra de maneira multi-direcional, considerando que partes de solo podem, na teoria, mudar de uma categoria de uso para outra, em um intervalo de tempo qualquer, por representação matemática matricial.

A matriz de transição descreve um sistema que muda em intervalos discretos de tempo, nos quais o valor de qualquer variável em um dado período de tempo é a

soma das porcentagens fixas dos valores de todas as variáveis do passo de tempo precedente (Equação 3). A soma das frações ao longo da coluna da matriz de transição é igual a 1 (SOARES FILHO et al., 2009).

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{1j} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{2j} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{3j} \\ P_{j1} & P_{j2} & P_{j3} & P_{jj} \end{bmatrix}^v \times \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad (3)$$

Ferrari (2008), afirma que a cadeia de Markov é adequada para a geração de prognósticos de mudanças de uso e cobertura da terra. Podendo ser usada para se estimar a quantidade global de mudança quando dados sobre o uso e cobertura da terra em uma dada fronteira de um período de simulação forem ausentes, posto que dados sobre o uso e cobertura da terra em tempo inicial e final do período de simulação anterior são conhecidos.

Por ser um modelo de processo estacionário, pode-se ajustar as cadeias de Markov incorporando efeitos de mais alta ordem, como influências de variáveis exógenas e endógenas, ajustando então os modelos markovianos na simulação de cenários de uso da terra.

### 2.5.2 Método de Pesos de Evidências

Bonham Carter (1994), define o método de Pesos e Evidências como a probabilidade de um evento ocorrer, considerando fatores que o influenciam, ou seja, combinando evidências. Modelos baseados no método bayesiano já foram aplicados em diversas áreas, inclusive em diagnósticos médicos e mapeamento de potencial mineral. Segundo, Perrota (1998), no método “Bayesiano”, a combinação de uma coleção de dados (ou mapas) é feita utilizando-se uma estrutura de probabilidades. As probabilidades são medidas de proporções entre as áreas dos mapas de evidência e a das ocorrências. A unidade de área corresponde a uma célula, ou pixel, que deve ser suficientemente pequena para representar uma ocorrência.

Para Almeida (2003), o teorema de Bayes define que a mudança de um uso  $i$  para  $j$  ocorre em função de uma evidência  $x$ , também definida como variável explicativa. Miranda (2005), com o mesmo pensamento, define o modelo de probabilidade bayesiano como a razão entre a probabilidade que um evento ocorra sobre a probabilidade que ele não ocorra. Portanto, a fórmula para se definir a ocorrência de um uso  $R$  para  $J$  em relação à presença de uma evidência  $S$  é definida por Almeida (2003), como (Equação 4):

$$P \{R|S\} = \frac{P \{R \cap S\}}{P\{S\}} \quad (4)$$

Sendo  $P \{R/S\}$  a probabilidade condicional de ocorrência do evento de transição  $R$ , dada a presença da variável explicativa ou evidência  $S$ . Mas,  $P \{R \cap S\}$  é igual à proporção da área total ocupada por  $R$  e  $S$  juntos. Sendo  $N$  a contagem de células dos mapas (área de um evento ou uma evidência), a Equação 4 pode ser reescrita para (Equação 5):

$$P \{R|S\} = \frac{N \{R \cap S\}}{N\{S\}} \quad (5)$$

Ao se considerar que o método de pesos de evidência relaciona variáveis utilizando probabilidades de ocorrência, a probabilidade a posteriori de transição  $I$  para  $J$  (evento  $R$ ) é definida pela relação da probabilidade a priori de transição já definida e relacionada à probabilidade condicional de estar ou não na área da evidência  $S$ , ou seja, pela Equação 6:

$$P \{R|S\} = \frac{N \{S \cap R\}}{N\{R\}} \quad (6)$$

Como  $P \{S \cap R\}$  é o mesmo que  $P \{R \cap S\}$ , as Equações 5 e 6 podem ser combinadas para determinar  $P \{R / S\}$  (Equação 7):

$$P\{R|S\} = \frac{P\{R\} \times P\{S|R\}}{P\{S\}} \quad (7)$$

Porém, não basta para o modelo estocástico calcular o peso da probabilidade de ocorrência de uma transição de uso da terra *a posteriori* em relação à presença de uma variável evidência S. Logo, tem-se que calcular também a probabilidade de ocorrência da transição dada a ausência da variável S (Equação 8):

$$P\{R|\bar{S}\} = \frac{P\{R\} \times P\{\bar{S}|R\}}{P\{\bar{S}\}} \quad (8)$$

As Equações 7 e 8 podem ser expressas sob a forma de odds, que são definidos como a razão da probabilidade de que um evento irá ocorrer pela probabilidade de que ele não irá ocorrer. O método de pesos de evidência usa os logaritmos naturais dos odds, conhecidos por log odds ou logits. Para tornar mais claro essa abordagem, as equações anteriores serão convertidas para odds. Para tanto, basta dividirem-se os dois lados da equação por:  $P\{R/S\}$ :

$$\frac{P\{R|\bar{S}\}}{P\{\bar{R}|S\}} = \frac{P\{R\} \times P\{S|R\}}{P\{\bar{R}|S\} \times P\{S\}} \quad (9)$$

Mas, a partir das definições de probabilidade condicional e as equações 7, 8 e 9, tem-se que (Equação 10):

$$P\{\bar{R}|S\} = \frac{P\{\bar{R} \cap S\}}{P\{S\}} = \frac{P\{S|\bar{R}\} \times P\{\bar{R}\}}{P\{S\}} \quad (10)$$

Relacionando e substituindo as equações 9 e 10, chega-se a seguinte Equação 11:

$$\frac{P\{R|S\}}{P\{\bar{R}|S\}} = \frac{P\{R\}}{P\{\bar{R}\}} \times \frac{P\{S\}}{P\{S\}} \times \frac{P\{S|R\}}{P\{S|\bar{R}\}} \quad (11)$$

Substituindo-se odds nas probabilidades de ocorrência pela presença e ausência de transição, tem-se a Equação 12:

$$O\{R|S\} = O\{R\} \times \frac{P\{S|R\}}{P\{S|\bar{R}\}} \quad (12)$$

Em que o odds condicional (*a posteriori*) de R dado S é o odds *a priori* de R; multiplicado pelo que se convencionou chamar modelos de modelagem como razão de suficiência (LS). No Método de Pesos de Evidência, calcula-se o logaritmo natural de ambos os lados da equação 12, e o log de LS é denominado peso positivo de evidência  $W^+$ , estimado na presença da variável. Assim, tem-se a Equação 13, que postula o valor do peso para uma transição em decorrência de uma variável endógena que influencia, de certa forma, a mudança do uso da terra:

$$\log\{R|S\} = \log\{R\} + W^+ \quad (13)$$

Tratamentos algébricos semelhantes levam à derivação de uma expressão de odds para a probabilidade condicional de R dada a ausência da evidência S, como sendo (Equação 14):

$$O\{R|\bar{S}\} = O\{R\} \times \frac{P\{\bar{S}|R\}}{P\{\bar{S}|\bar{R}\}} \quad (14)$$

O termo  $P\{\bar{S}|R\} / P\{\bar{S}|\bar{R}\}$  é chamado de razão de necessidade ou *necessity ratio* (LN). No método de pesos de evidência, o *peso negativo de evidência*  $W^-$  é o logaritmo natural de LN. Portanto, a forma de log é expressa pela Equação 15:

$$\log\{R|\bar{S}\} = \log\{R\} + W^- \quad (15)$$

Almeida (2003) afirma que LS e LN são também denominadas razões de probabilidade ou *likelihood ratios*. Quando evento e evidência são positivamente

correlacionados, o valor de  $LS$  é maior do que 1, ao passo que  $LN$  situa-se no intervalo  $[0,1]$ . Entretanto, se uma evidência é negativamente correlacionada com o evento,  $LN$  será maior do que 1 e  $LS$  se encontrará no intervalo  $[0,1]$ . Se a evidência é descorrelacionada com o evento, então  $LS=LN=1$ , e a probabilidade *a posteriori* se iguala à *priori*, além da probabilidade de um evento não se alterar pela presença ou ausência de uma dada evidência.

Quando a evidência de vários mapas é combinada, os pesos são calculados para cada mapa independentemente e, então, combinados em uma única equação. A probabilidade condicional de um evento ocorrer, dada a presença de duas evidências  $S_1$  (declividade) e  $S_2$  (buffer de infraestrutura) é (Equação 16):

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = \frac{P\{R \cap S_1 \cap S_2\}}{P\{S_1 \cap S_2\}} \quad (16)$$

Podendo ser escrita como (Equação 17 e 18):

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = \frac{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\}}{P\{S_1 \cap S_2\}} \quad (17)$$

$$= \frac{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\}}{P\{S_1 \cap S_2 / R\} \times P\{R\} + P\{S_1 \cap S_2 / \bar{R}\} \times P\{\bar{R}\}} \quad (18)$$

No teorema de Bayes, há apenas duas hipóteses mutuamente exclusivas,  $R$  e  $\bar{R}$  com  $P\{R\} + P\{\bar{R}\} = 1$ . Os efeitos da interação entre  $S_1$  e  $S_2$  podem ser ignorados supondo-se a independência condicional entre eles. Isso fornece uma simplificação, pois permite que os efeitos de cada mapa de evidência sejam avaliados individualmente e, então, combinados pela multiplicação (ou adição no caso log-linear) dos fatores dos vários mapas juntos.

A suposição de independência condicional pode ser expressa pela Equação 19:

$$P\{S_1 \cap S_2 / R\} = P\{S_1 | R\} \times P\{S_2 | R\} \quad (19)$$

Permitindo que a mesma seja simplificada pela Equação 20:

$$P\{R|S_1 \cap S_2\} = P\{R\} \times \frac{P\{S_1|R\}}{P\{S_1\}} \times \frac{P\{S_2|R\}}{P\{S_2\}} \quad (20)$$

Usando-se a forma de *odds*, o *odds* condicional ou posterior é dado pela Equação 21:

$$O\{R|S_1 \times \cap S_2\} = O\{R\} \times LS_1 \times LS_2 \quad (21)$$

Utilizando-se a forma log-linear de pesos de evidência, tem-se (Equação 22):

$$\text{logit}\{R|S_1 \cap S_2\} = \text{logit}\{R\} + W_1^+ + W_2^+ \quad (22)$$

Qualquer que seja a formulação usada para o modelo, há quatro modos diferentes de se combinar dois mapas de evidência: S1 e S2 presentes, S1 presente e S2 ausente, S1 ausente e S2 presente, e S1 e S2 ausentes. Na forma log-linear, essas combinações são escritas pelas Equações 23, 24, 25:

$$\text{logit}\{R|S_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit}\{R\} + W_1^+ + W_2^- \quad (23)$$

$$\text{logit}\{R|\bar{S}_1 \cap S_2\} = \text{logit}\{R\} + W_1^- + W_2^+ \quad (24)$$

$$\text{logit}\{R|\bar{S}_1 \cap \bar{S}_2\} = \text{logit}\{R\} + W_1^- + W_2^- \quad (25)$$

De acordo com Bonham Carter (1994), as vantagens do modelo Bayesiano são: a objetividade, que impede a escolha subjetiva de fatores de ponderação; a possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais; a incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos; a possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade); a modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos.

Entre as desvantagens tem-se: a combinação de mapas de entrada assume que os mesmos são condicionalmente independentes entre si; o teste para independência condicional só é possível quando o método for aplicado de maneira orientada aos dados, considerando que ele requer a tabulação cruzada entre pares de mapas de evidência; e a limitação da aplicação do modelo aos casos em que a variável resposta (evento) é bem conhecida.

## **2.6 Satélite LANDSAT (Land Remote Sensing Satellite)**

Em 1967, o Programa Landsat foi criado pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), sendo denominado de *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS), a qual tinha exclusividade na observação dos recursos naturais terrestres. Composto por sete satélites, a série Landsat foi lançada com intervalos de três a quatro anos para cada satélite (ROCHA, 2000).

Conforme Novo (2011), o uso de satélites para a coleta de dados sobre a superfície terrestre teve início com a ideia das fotografias aéreas, as quais mostraram a possibilidade de se utilizar plataformas espaciais. O primeiro sensor utilizado foi o Return Beam Vidicon (RBV), que é um sistema semelhante a uma câmera de televisão. O RBV permite captação instantânea da imagem de uma determinada área, transferindo-a telemetricamente a uma antena de recepção terrestre. Estudos realizados pela United States Geological Survey (USGS) e pelo United States Department of Agriculture (USDA) determinaram os sensores que seriam colocados a bordo do primeiro satélite da série, inclusive as premissas básicas de sua constituição.

Segundo Jensen (2009), o primeiro satélite da série – ERST-1 – foi lançado como sistema experimental em 23 de julho 1972, passando a ser chamado de Landsat 1, em janeiro de 1978, em virtude do seu significativo desempenho. Este levou dois instrumentos a bordo: os sensores RBV e MSS (Multispectral Scanner System), o qual opera em quatro canais (dois no visível próximo e dois no infravermelho próximo) e apresenta resolução espacial de 30 metros.

O segundo satélite (Landsat 2) foi lançado em 22 de janeiro de 1975 e o terceiro satélite (Landsat 3) em 5 de março de 1978. Este teve seu sistema RBV

modificado para fornecer dados com melhor resolução espacial em uma única faixa do espectro. Inclusive, nesse satélite, foi acrescentada uma faixa espectral ao seu sistema MSS, com a função de operar na região do infravermelho termal.

O Landsat 4 começou a operar em 16 de julho de 1982. A carga útil do satélite passou a contar com o sensor TM (*Thematic Mapper*), projetado para dar suporte às pesquisas em diversas áreas especializadas em recursos naturais. Novo (2011) diz que o sensor TM oferece subsídios para mapeamentos temáticos na área de recursos naturais, opera com sete bandas nas regiões do visível, infravermelho próximo, médio e termal. Apresenta melhor resolução espacial (30 metros e 120 na região do termal), acurácia radiométrica e posicionamento geométrico se comparado ao seu antecessor, o sensor MSS. Os dados do sensor TM foram utilizados em pesquisas e definições de metodologias em amplas áreas do conhecimento científico e tiveram importância singular para a evolução das técnicas utilizadas no sensoriamento remoto mundial.

Dois anos mais tarde (1 de março de 1984), conforme Jensen (2009), o Landsat 5 entrou em órbita com os mesmos instrumentos sensores do Landsat 4. Em 1993, esses satélites já haviam superado sua vida útil.

O sexto satélite da série Landsat, lançado em 5 de outubro de 1993, falhou ao ser colocado em órbita, em decorrência de problemas no lançamento. O Landsat 6 foi projetado com o sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper), com configurações semelhantes ao seu antecessor, inovando na inclusão da banda 8 pancromática com 15 metros de resolução espacial.

O Landsat 7, foi lançado em 15 de abril de 1999, que evoluiu para o sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Esse satélite opera de forma idêntica ao TM, diferindo apenas pelo acréscimo de uma banda pancromática e o aumento de ganho na banda termal.

O último e mais atual satélite lançado do Landsat, foi a série 8 no dia 11 de fevereiro de 2013 pelo veículo Atlas-V rocket Acoplado ao satélite o sensor Operational Land Imager (OLI), o qual possui 9 bandas em nível espectral e 2 bandas no infravermelho termal. Outra característica desse satélite é o tamanho da faixa imageada 170 km x 185 km possuindo 16 bits de resolução radiométrica, com tempo de revisita de 16 dias e uma banda pancromática de 15 metros de resolução espacial.

Trabalhando-se com as bandas do Landsat 5, a fim de maximizar as análises das imagens, o INPE (2009) recomenda as seguintes combinações para fotos coloridas: (i) bandas 1, 2 e 3: imagens em "cor natural", com boa penetração na água, realçando as correntes, a turbidez e os sedimentos. A vegetação aparece em tonalidades esverdeadas; (ii) bandas 2, 3 e 4: define melhor os limites entre o solo e a água, ainda mantendo algum detalhe em águas pouco profundas, e mostrando as diferenças na vegetação que aparece em tonalidades de vermelho; (iii) bandas 3, 4 e 5: mostra mais claramente os limites entre o solo e a água, com a vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidades de verde e rosa; e (iv) bandas 2, 4 e 7: mostra a vegetação em tons verdes e permite discriminar a umidade tanto na vegetação como no solo.

Cada pixel da imagem tem uma resolução espacial de 30 metros, isto é, representa um quadrado no solo de 30 metros de lado, com exceção da banda 6, que tem uma resolução espacial de 120 metros.

Já no mais novo satélite da série, o Landsat 8, recomenda-se as seguintes combinações: (i) bandas 3, 4 e 5 para o infravermelho definindo melhor os limites entre o solo e água, mostrando diferenças na vegetação que aparece em tons de vermelho; (ii) bandas 2, 3 e 4: imagens em "cor natural"; (iii) bandas 2, 5 e 6 combinação que serve para discriminar solos agrícolas.

## **2.7 Aplicativos computacionais**

### **2.7.1 Aplicativo SPRING**

O aplicativo SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georreferenciadas), é um banco de dados geográfico desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial), para ser utilizado em ambientes Unix, Windows e em versões na web. Possui características como operação de bancos de dados geográficos, suportando grande volume de dados, sem limitações de escalas, projeção e fuso.

Permite a utilização de dados vetoriais e matriciais, fazendo a integração de sensoriamento remoto, processamento de imagens com dados espaciais e não-espaciais. No Spring, as características dos dados são separados por Planos de Informações (PI's), e um projeto que serve para definir a projeção cartográfica e o limite da área de estudo.

Para cada PI está associado uma categoria e depende do tipo do dado (Temático, Numérico, Imagem, Cadastral ou Rede):

Temático: Refere-se a dados que classificam uma posição geográfica quanto a um determinado tema;

Numérico: Dados que possuem uma variação contínua de seus valores numéricos em função da sua superfície;

Imagem: Refere-se a dados oriundos do sensoriamento remoto em formato matricial ou fotografias transformadas em imagens digitais;

Cadastral: Distingue-se de um mapa temático por não possuir temas e considerar seus elementos como objetos geográficos que possuem atributos e podem estar representados em vários mapas de diferentes escalas e projeções;

Rede: utiliza a topologia arco-nó e armazena a localização e a simbologia associadas a estruturas linearmente conectadas.

O Spring possui implementado na sua interface o LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), ferramenta que possibilita a realização de análises espaciais através de álgebra de mapas utilizando programação. Segundo o INPE, é composto por três componentes:

Declaração: Nesta parte definem-se os dados. Cada plano de informação (PI) a ser manipulado é declarado explicitamente, dando-lhe um nome e associando-o à sua categoria no esquema conceitual.

Instanciação: Nesta parte recuperam-se os dados existentes do banco de dados ou criam-se os novos PIs. Um novo PI pode então ser associado ao resultado de operações em LEGAL.

Operação: Nesta parte, realizam-se as operações da álgebra de mapas. As seguintes operações estão disponíveis: transformação, booleana, matemática, classificação contínua, vizinhança, reclassificação por atributos.

Sendo assim, com o aplicativo é possível realizar diversas operações integrando diversas fontes de dados na realização de mapas finais e dados para simulação de cenários.

### 2.7.2 Aplicativo Dinamica EGO

Na proposta deste trabalho de simulações de cenários, foi utilizado o aplicativo Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objects), que é baseado em autômatos celulares com a programação escrita em C++ enquanto que a parte gráfica é escrita em java.

É um ambiente de modelagem com diversas possibilidades para construção de modelos, desde o mais simples modelo espacial estático até modelos dinâmicos bastante complexos, os quais podem envolver iterações aninhadas, retroalimentações dinâmicas, abordagem multiregiões, manipulação e combinação algébrica de dados em vários formatos, como mapas, tabelas, matrizes e constantes, processos de decisão para bifurcação e união de fluxos de execução, e uma série de algoritmos espaciais complexos para a análise e simulação de fenômenos espaço-temporais (SOARES FILHO et al., 2009).

Os algoritmos *expand* e *patch* são responsáveis pelas características espaciais das transições de uso da terra no Dinamica EGO. A função *expand* responde pela expansão de manchas previamente existentes de uma classe de uso da terra, e a função *patch*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes, ou seja, a função *expand* executa transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado *j* e a função *patch* 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., 2009).

Segundo os mesmos autores, o aplicativo contém uma série de algoritmos denominados de funtores, onde cada um executa um tipo de operação. Esses funtores são ligados em sequência para estabelecer um fluxo de dados na forma de grafos, permitindo que os usuários possam criar modelos apenas selecionando, arrastando e conectando os funtores por meio de seus portos, os quais representam conexões específicas para tipos de dados, como por exemplo mapas, tabelas, matrizes e expressões matemáticas.

Esses funtores podem ser armazenados em containers, que é outro tipo de functor usado para executar iterações ou processar dados em determinadas regiões específicas dos mapas. E, dessa forma, são construídos modelos como se fossem

diagramas e a execução segue um fluxo encadeado de dados. Após o processamento os arquivos são salvos em linguagem de scripts no formato XML ou na própria linguagem de programação EGO.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Localização e características da área de estudo

Esta pesquisa foi realizada na Microrregião da Campanha Ocidental, Mesorregião do Sudoeste do Rio Grande do Sul, localizada entre as latitudes 27°56'37" S e 30°33'41" S e entre as longitudes 54°42'7" W e 57°41'28" W abrangendo os Municípios de Alegrete, Barra do Quaraí, Garruchos, Itaqui, Maçambará, Manoel Viana, Quaraí, São Borja, São Francisco de Assis e Uruguaiana (Figura 5). No ano de 2010, a população dessa região foi estimada em 364.249 habitantes, com densidade de 11,70 hab./Km<sup>2</sup> e IDH de 0,768 (IBGE, 2010). Segundo Müller Filho (1970), geologicamente, essa região integra a província arenítico-basáltica com litologias dispostas em sequência, tendo basalto de pouca espessura, caracterizando-se pelas formações litológicas do Botucatu (arenítica) e Serra Geral (basáltica).

De acordo com Köppen, o clima da mesorregião do Sudeste do Rio Grande do Sul está classificado como Cfa, subtropical úmido, sem estação seca e com temperaturas médias variando de 14,3°C no inverno a 26,3°C no verão, com média de precipitação anual de 1400 mm (MORENO, 1961). A velocidade dos ventos na região varia entre ameno no outono-inverno e intenso na primavera-verão (SOUTO, 1984; SUERTEGARAY, 1998). O relevo desta região é suave ondulado com áreas planas, em decorrência do desgaste geológico, compondo uma superfície aplainada inferior que contrasta com os platôs de arenito silicificado da paisagem regional (SOUTO, 1984).

A geologia é formada, especialmente por áreas de arenito Botucatu, o que caracteriza a fragilidade do solo, e a presença de gramíneas que proporcionam cobertura de baixa a média, com os campos se assemelhando fisionomicamente a estepes (MEDEIROS et al., 1995). Rovedder (2007), salienta que a vegetação dessa região é fortemente influenciada pelas características edáficas, com predomínio de formações campestres que possibilitam cobertura escassa, a exemplo das poáceas.

Em conjunto com a vegetação campestre, distribuídos esparsamente, ocorre vegetação arbustiva, de conformação retorcida, semelhante à vegetação de cerrado e savanas. Ao longo de rios e arroios ocorre mata ciliar. Há também grandes extensões de florestas plantadas de pinus e eucaliptos.

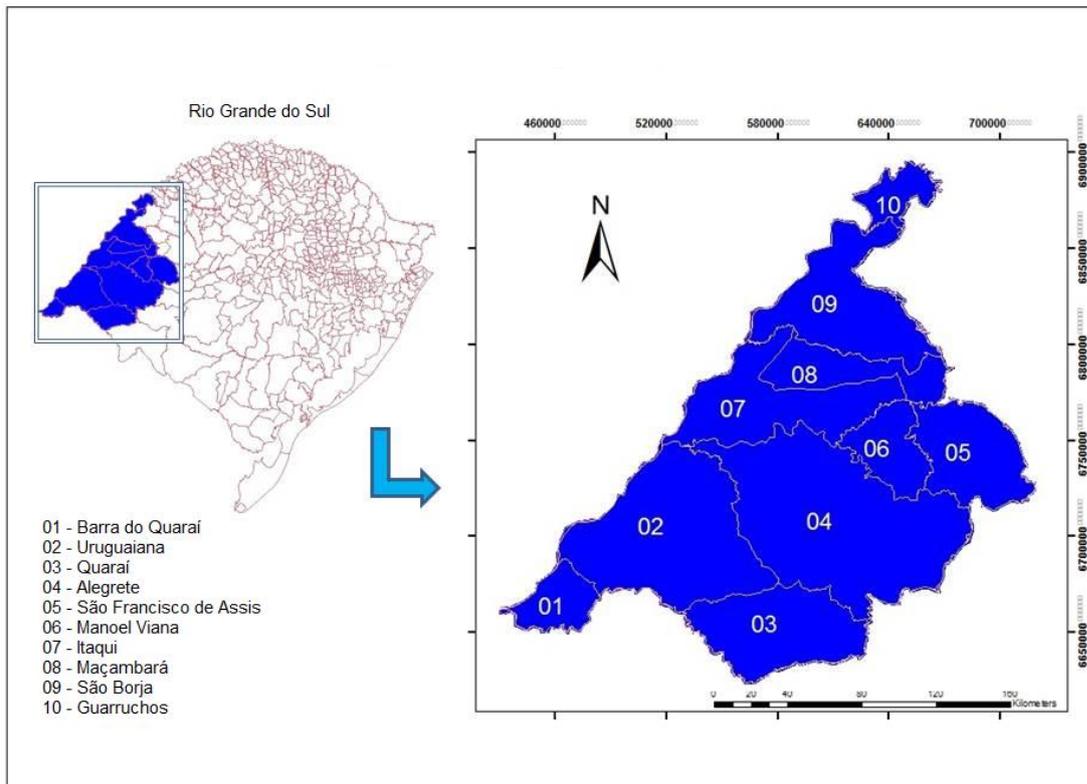


Figura 5 – Esquema de localização da Microrregião da Campanha Ocidental, localizada na Mesorregião do Sudoeste do Rio Grande do Sul, Brasil.

Em relação à rede de drenagem, destaca-se na Mesorregião do Sudeste do Rio Grande do Sul o Rio Ibirapuitã, com extensão de 259 km e o Rio Ibicuí, com extensão de 385 km. Nessas áreas, a economia se baseia na pecuária e na agricultura, destacando-se o cultivo de arroz irrigado, que constitui o principal uso da água, pois quase toda a extensão dessa região possui uma densa mata de galeria, tornando o solo do entorno muito fértil.

### 3.2 Material

Primeiramente, antes de formar o banco de dados geográficos referente ao estudo foram definidos os períodos da pesquisa de acordo com sua disponibilidade e qualidade das imagens. Para a execução deste trabalho, foram utilizadas imagens de diferentes datas do satélite LANDSAT 5 sensor TM (*Thematic Mapper*) e para comparação da modelagem as imagens do LANDSAT 8 sensor OLI (*Operational Land Imager*). Foram utilizados na execução do trabalho os seguintes aplicativos: Sistema operacional Windows 7; Aplicativo computacional de processamento de informações geográficas SPRING na versão 5.2.1; Dinamica EGO na versão 2.2.8, a ser utilizado nas simulações de uso e cobertura da terra.

### 3.3 Métodos

A metodologia que se segue possibilitou a aquisição de um banco de dados geográficos referente às imagens multitemporais e, a partir daí, o desenvolvimento do processo de modelagem espacial dinâmica. Basicamente foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- I. Aquisição e organização da base cartográfica;
- II. Georreferenciamento (LANDSAT 5 sensor TM);
- III. Processamento digital de imagens (técnica de realce, segmentação e classificação digital);
- IV. Quantificação das áreas classificadas;
- V. Análise em Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico (LEGAL);
- VI. Elaboração dos mapas temáticos;
- VII. Modelagem dinâmica de uso da terra.

### 3.3.1 Criação do banco de dados

Inicialmente, foi construído um banco de dados espacial no Sistema de Processamento de Informações Geográficas – SPRING. Esse produto opera como banco de dados geográficos sem fronteiras e suporta elevada quantidade de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), administrando tanto dados matriciais como vetoriais. Além disso, o SPRING mantém a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo o banco, realizando a integração de dados de Sensoriamento Remoto em um SIG. Em seguida, foi criado um projeto com o objetivo de definir a projeção cartográfica utilizada, sendo definido no presente trabalho a projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*) e datum de referência WGS-1984 (*World Geodetic System*). Os primeiros dados inseridos ao banco foram os limites do Rio Grande do Sul e suas microrregiões, e em seguida foram separadas as áreas de interesse do trabalho.

### 3.3.2 Aquisição e processamento digital de imagens LANDSAT 5 e 8

As imagens do Landsat 5 sensor TM utilizadas no presente estudo foram adquiridas, gratuitamente, na página do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) (<http://www.inpe.br>), na qual também podem ser encontradas imagens atualizadas de diversos satélites. Já as imagens do Landsat 8 foram adquiridas gratuitamente, na página do United States Geological Survey ([www.earthexplorer.usgs.gov](http://www.earthexplorer.usgs.gov)). Foram utilizadas sete cenas que recobrem a área de estudo nos anos de 1985, 1996, 2011 e 2013, as imagens foram obtidas em meses semelhantes para que não houvesse diferença quanto a resposta espectral dos alvos (Tabela 4).

Tabela 4 – Relação das cenas que recobrem a Microrregião Campanha Ocidental – RS e suas respectivas datas.

Cena	Órbita	Ponto	Ano 1985	Ano 1996	Ano 2011	Ano 2013
1	223	80	02/04	10/06	19/05	22/04
2	223	81	14/05	07/04	03/05	22/04
3	224	79	11/05	16/05	24/04	02/07
4	224	80	02/05	16/05	24/04	02/07
5	224	81	03/06	16/05	24/04	13/04
6	225	80	10/06	23/05	17/05	20/04
7	225	81	10/06	23/05	14/03	20/04

As imagens foram adquiridas no formato .geotiff, que é utilizado no armazenamento de imagens de alta resolução, sendo convertidas no aplicativo IMPIMA (módulo do SPRING) para o formato .spg, compatível com o SPRING. A seguir, as imagens do Landsat 5 (TM) foram georreferenciadas utilizando 20 pontos de controle distribuídos em todas as regiões das imagens, adotou-se erros médios inferiores a 0,7. As imagens do Landsat 8 (OLI) foram adquiridas previamente georreferenciadas sem precisar passar pelo mesmo tratamento das imagens do Landsat 5.

Após o registro das imagens, foi realizado o mosaico das mesmas, a fim de unir cada uma das imagens adquiridas separadamente, obtendo-se o recobrimento total da área de estudo. Realizou-se o realce por contraste linear nas imagens, para melhoria de sua qualidade sob os critérios subjetivos do olho humano (Figura 6: A e B).

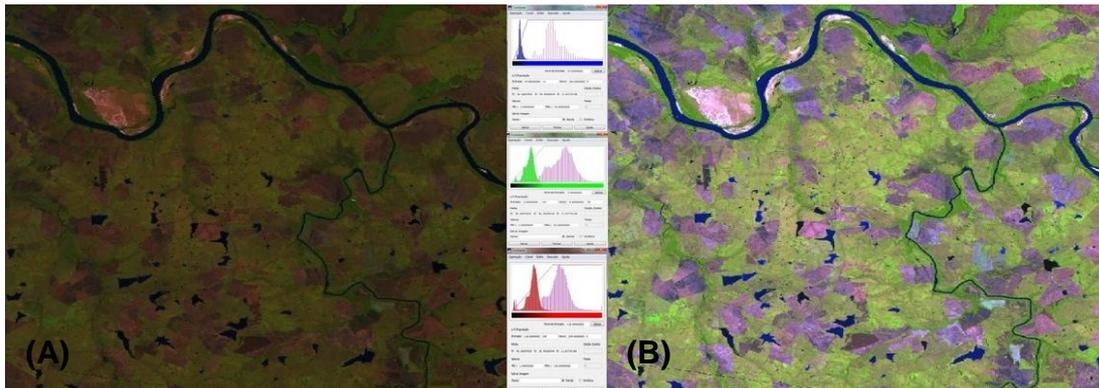


Figura 6 – (A) Antes da aplicação do contraste linear; (B) Após aplicação do contraste linear.

O processo de segmentação representa o primeiro passo no sentido de preparar as imagens para uma futura classificação temática pelo método de crescimento de regiões, passo este que pode determinar o eventual sucesso ou fracasso de uma análise. O ato de segmentar uma imagem consiste em agrupar pixels com características similares em termos tonais e texturais, formando regiões homogêneas. Essas regiões são correspondentes às feições da superfície terrestre e irão servir de base para análise e cartografia temática (DLUGOSZ et al., 2008). Todas as imagens foram segmentadas com uso do método de crescimento de regiões com similaridade 10 e área 100. Outros valores foram testados como similaridade 5, 15 e 20 e valores de área 10, 20, 50, porém a similaridade 10 e área 100 apresentaram maior qualidade no agrupamento de pixels. O método foi escolhido por demonstrar áreas com aspecto mais contínuo, onde cada área possui características espectrais diferentes daquelas que as cercam (Figura 7).



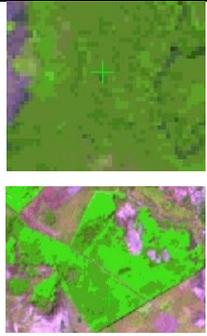
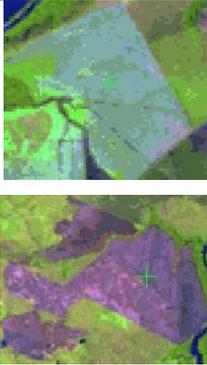
Figura 7 – Imagem segmentada através do método crescimento de regiões numa fração de área da microrregião da Campanha Ocidental.

Neste trabalho, foi realizada a classificação supervisionada. O algoritmo classificador foi o *Bhattacharya*, com limiar de aceitação de 99%. Este é um classificador de regiões e mede a distância média entre as distribuições de probabilidade de classes espectrais. A escolha do *Bhattacharya* se deve ao fato de discriminar de forma mais precisa as classes de uso e cobertura da terra.

Realizou-se a confiabilidade da classificação digital do uso e cobertura da terra da região de estudo por meio da matriz de confusão das áreas de treinamentos que foram classificadas aplicando-se o coeficiente de *Kappa*, no qual gerou-se relatórios pelo aplicativo SPRING nos anos analisados (1985, 1996, 2011 e 2013).

Sendo assim, as classes temáticas foram as seguintes: Floresta, Campo, Agricultura, Areal e Água (Tabela 5). Com isso foi possível gerar mapas do uso e cobertura da terra para as cinco classes.

Tabela 5 – Chave de interpretação das classes de uso da terra na microrregião da Campanha Ocidental, referentes a falsa-cor em uma composição colorida R5G4B3 do sensor TM.

Classe	Cor	Forma	Amostra
Floresta	Verde	Irregular/Regular	
Campo	Amarelo	Irregular	
Agricultura	Salmão	Geométrica	
Areal	Vermelho	Irregular	
Água	Azul	Geométrica /Irregular	

### 3.3.3 Mapas Temáticos

Os mapas temáticos foram desenvolvidos no aplicativo SPRING, na versão 5.2.1. Anterior ao processo da classificação das imagens, o limite territorial do trabalho, as estradas e as redes de drenagem foram importados para o banco de dados espaciais em forma de *shapes files* (CPRM, 2012). Por meio da classificação digital das imagens, foram confeccionados os mapas de uso e cobertura da terra para todos os períodos analisados. Esses mapas temáticos foram criados após a aplicação das técnicas de processamento digital de imagens visando identificar os padrões de mudanças do uso e cobertura da terra nos anos de 1985, 1996, 2011 e 2013.

### 3.3.4 Mapas estáticos

Foram selecionadas as seguintes variáveis estáticas: declividade, hipsometria, rede de drenagem, estradas, geologia, renda per capita, população urbana, população rural, PIB, ovinos e bovinos (Apêndice A ao K). Na elaboração de mapas de declividade e hipsometria, foram utilizados dados de radar da *Shuttle Radar Topography Mission - SRTM* (NASA, 2012), com resolução espacial de 90 metros. As imagens foram importadas em formato GeoTiff e convertidas em um Modelo Numérico do Terreno (MNT). As cotas Hipsométricas foram confeccionadas em intervalos de 50 metros de altitude com 5 classes e para os mapas de declividade foram utilizados intervalos em 5 graus e 9 classes pré-definidas.

Os mapas de rede de drenagem, estradas e geologia foram obtidos pelo geobank da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na base cartográfica de 1:750.000. Os arquivos foram importados no aplicativo SPRING e recortados para a área de interesse da região.

Os dados econômicos, sociais e agropecuários foram obtidos conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As informações adquiridas foram importadas para o aplicativo SPRING seguindo as informações geográficas das sedes municipais. Utilizou-se o estimador do inverso do quadrado da distância

para a distribuição espacial dos dados para a área de estudo. Por fim, sobre a grade criada, realizou-se o fatiamento em 9 classes de iguais intervalos.

### 3.3.5 Mapas de transições

Para os mapas de transições de uso e cobertura da terra, em todos os períodos analisados, foi necessária a criação de uma programação em Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico – LEGAL (Apêndice L), no aplicativo SPRING versão 5.2.1. Partindo dessa programação foi possível gerar mapas temáticos de transição de uso da cobertura da terra para cada par de datas (1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013).

Segundo Barbosa e Cordeiro (2001), um programa em LEGAL é estruturado em uma lista de sentenças que descrevem um procedimento, ou um conjunto de ações sobre dados espaciais. Tais sentenças são estruturadas em quatro grandes grupos: declarações das variáveis, instanciações das variáveis, operações de álgebra de mapas e comandos de controle.

### 3.3.6 Modelagem Dinâmica

Na modelagem foi utilizado os mapas dinâmicos dos anos de 1996 e 2011 e o mapa dinâmico do ano de 2013 serviu para fazer a comparação entre o mapa simulado e o mapa real.

Após a confecção dos mapas estáticos e dinâmicos no SPRING, estes foram exportados em formato Geotiff, o qual se adequa ao aplicativo Dinamica EGO. A importância dessa etapa é dar início ao processo de modelagem, adequando os dados ao formato necessário à modelagem.

Todos os mapas foram confeccionados com os mesmos números de linhas e colunas (1104 x 1083), mesma escala, mesmo datum e separados em variáveis estáticas e dinâmicas. As classes utilizadas para simulação foram: Floresta, Campo, Agricultura e Areal.

No Dinamica EGO, os modelos são construídos partindo de uma sequência de “*functores*” conectados através de portas de entrada e saída compatíveis. Assim, os dados fluem por meio desses operadores para produzir um resultado desejável, que representa a solução de uma questão a respeito de algum aspecto do ambiente (SOARES-FILHO et al., 2009). Esses funtores são ligados em sequência para estabelecer um fluxo de dados na forma de grafos. A organização dessa etapa é chamada de container “*Group*”, que é responsável pelo controle de todo o modelo, executando as interações e processamento de dados em regiões específicas de um mapa.

#### 3.3.6.1 Cálculos das matrizes de transição

Para o cálculo da matriz de transição utilizou-se 2 “*functores*” de “*categorical maps*” para os mapas iniciais e finais dos períodos analisados, interligando-se esses conjuntos de dados no “*functor*” de matriz de transição sendo descrito o parâmetro de diferenças de tempo do mapa inicial para o mapa final, por exemplo, entre os mapas de 1996 para 2011 a janela de tempo foi de 15 anos. Em seguida, interligou-se os resultados do cálculo da matriz com dois “*functores*” de saída de passo simples e passo múltiplos (a primeira matriz envolve as transições que ocorrem de ano em ano e, a segunda matriz, as transições que ocorrem em todo o período de análise), e os resultados são salvos em um arquivo CSV (Figura 8).

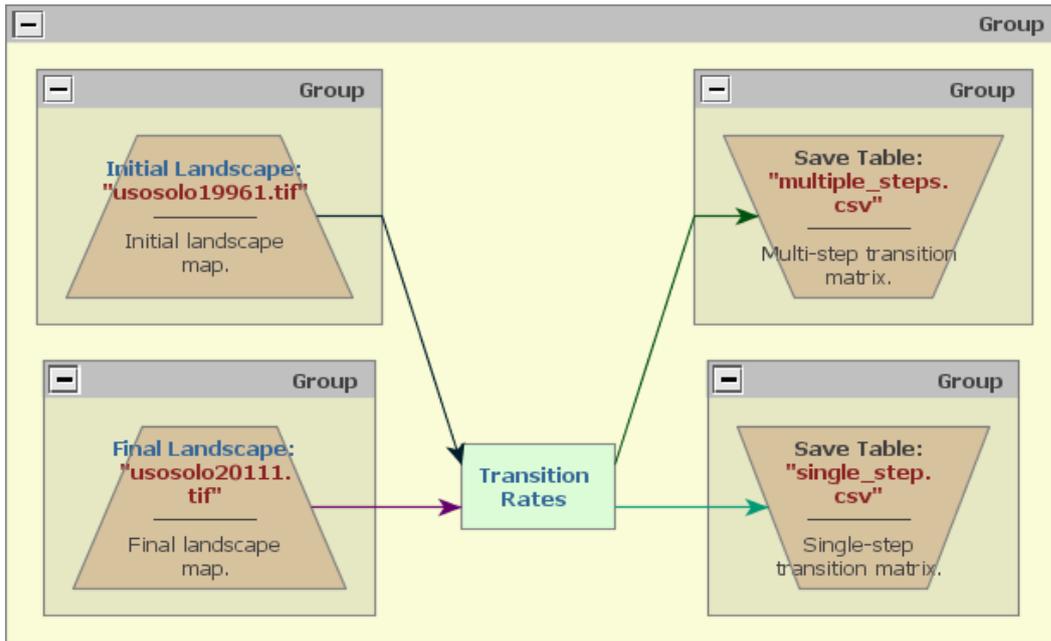


Figura 8 – Modelo de cálculo para matriz de transição.

### 3.3.6.2 Cálculo dos intervalos para categorização das variáveis contínuas

Para o cálculo dos pesos de evidências, precisou-se agrupar as variáveis estáticas em um único arquivo chamado “Cubo” (Figura 9) e, com isso, facilitar a inserção no programa, dos mapas que serviram para o cálculo das variáveis contínuas.

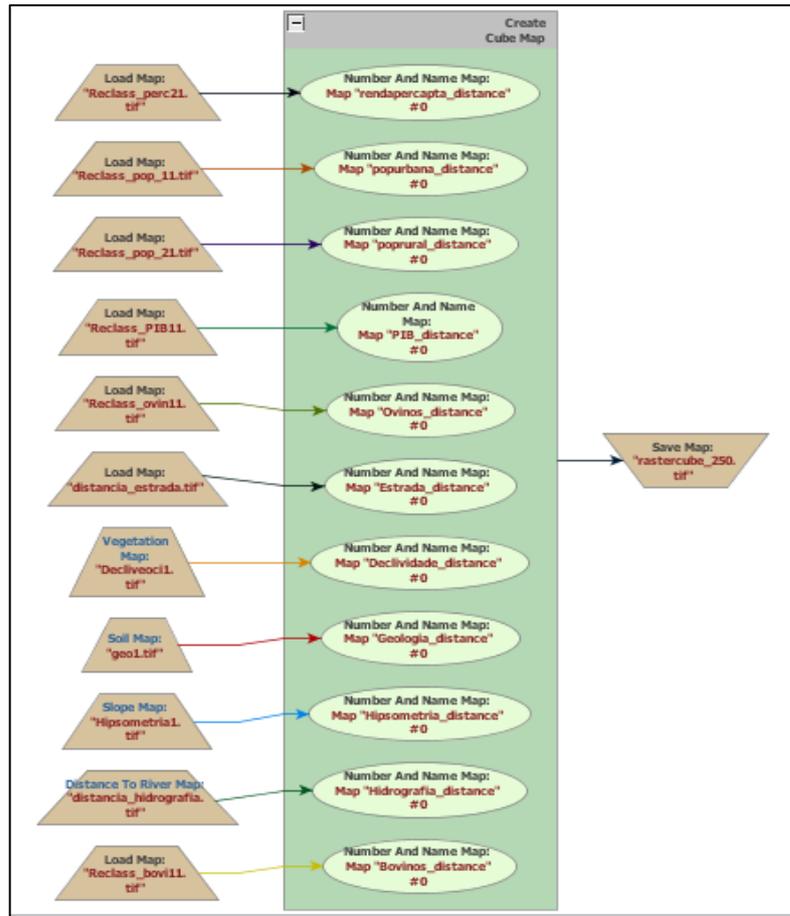


Figura 9 – Esqueleto da criação do Cubo de variáveis estáticas.

Nessa etapa, foi utilizado o método dos Pesos de Evidências para que fosse produzido o mapa de probabilidades de transição. Foram inseridos os mapas de uso e cobertura da terra inicial e final, acrescentando-se os mapas de variáveis estáticas representado pelo Cubo. Utilizou-se os funtores "*Calc Distance Map*", responsável pelo cálculo de distâncias dos mapas com a inserção do número de classes de uso consideradas, e do "*Determine Weights of Evidence Ranges*", o qual determina as faixas dos Pesos de Evidências. Dentro desse *functor*, classificou-se as variáveis em categóricas (variáveis que não sofrem mudanças, por exemplo, hipsometria e geologia) e não-categóricas (variáveis que sofrem mudanças com o tempo, por exemplo, as distâncias de cada classe de uso e cobertura da terra).

Como saída, foi originado o arquivo de dados denominado "*skeleton.dcf*". Na Figura 10, é apresentado o esqueleto do modelo criado para essa etapa de

determinação do fatiamento das variáveis estáticas em relação às transições dos mapas de uso e cobertura da terra.

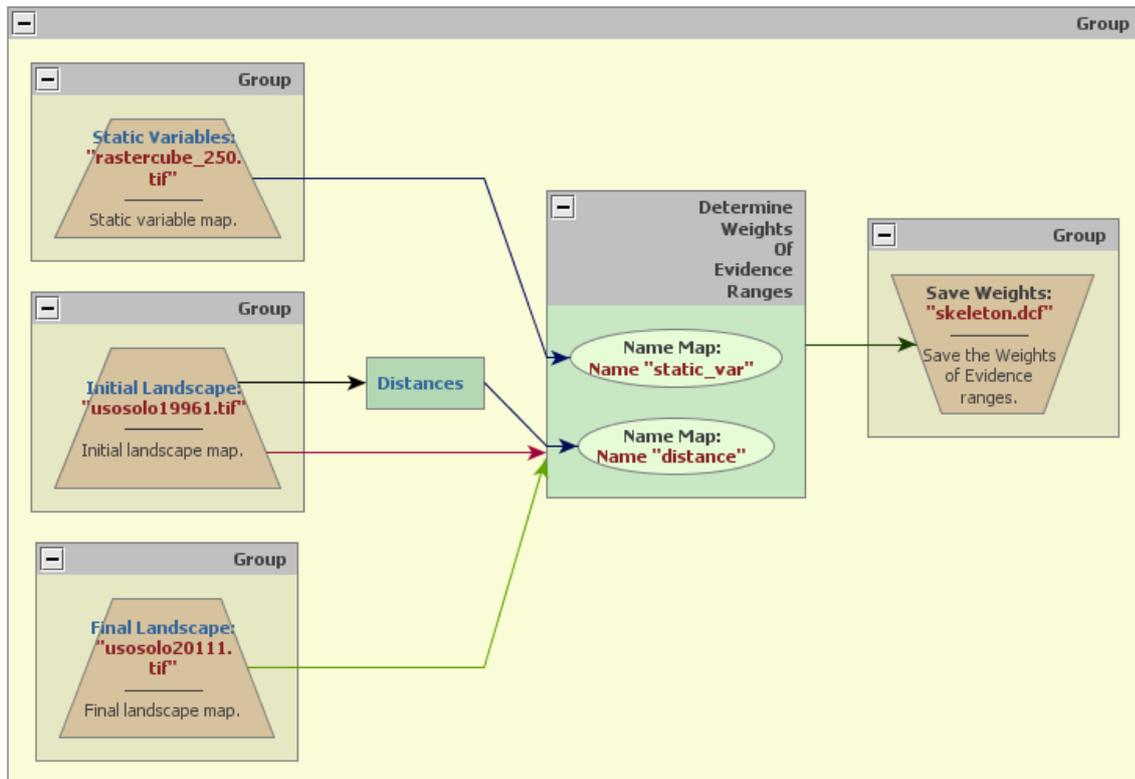


Figura 10 – Esquema para cálculo dos intervalos para categorização das variáveis contínuas.

### 3.3.6.3 Cálculo dos coeficientes dos Pesos de Evidência

Após o cálculo que definiu as faixas de distâncias, foram calculados os coeficientes dos Pesos de Evidência para selecionar as variáveis que influenciam na dinâmica das transições do uso e cobertura da terra, criando as probabilidades locais das diferenças.

Utilizou-se nessa etapa, como parâmetros de entrada, os mapas inicial e final, o Cubo com os mapas estáticos, o arquivo de fatias “Skeleton” criado na etapa anterior, o *functor* “*Determine Weights of Evidence Coefficients*” e como parâmetro

de saída o salvamento do arquivo dos Coeficientes de Pesos de Evidência “Weights.dcf” (Figura 11).

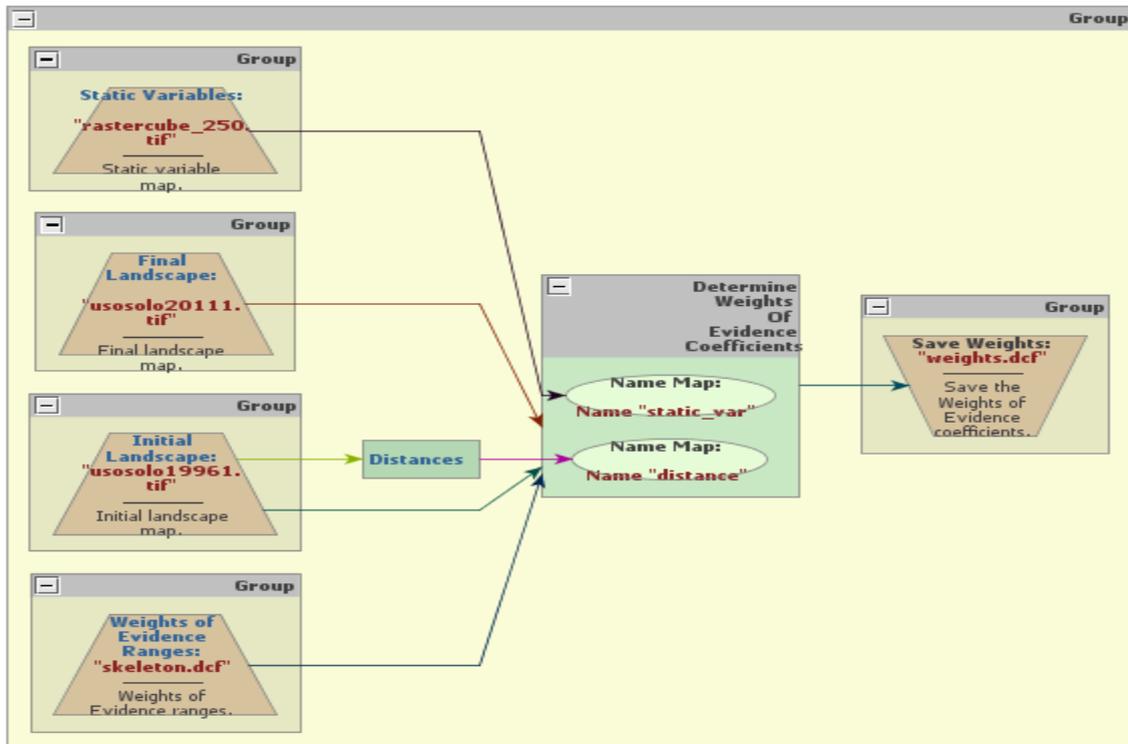


Figura 11 – Esquema para a obtenção do cálculo dos Coeficientes dos Pesos de Evidência.

#### 3.3.6.4 Cálculo da correlação entre as variáveis

Nesta etapa da modelagem, observou-se o quão independente espacialmente as variáveis são, ou seja, a associação espacial entre duas variáveis, eliminando-se do modelo àquelas que apresentaram alta correlação entre si. A seleção das variáveis deve considerar a avaliação da independência entre essas para explicar uma mesma transição de uso e cobertura da terra. Os parâmetros utilizados para obtenção dos “mapas de correlação” são os índices Cramer ( $V$ ) e Incerteza de Informação Conjunta ( $U$ ) que auxiliaram na decisão de quais variáveis deveriam ser mantidas no modelo. O Índice de Cramer ( $V$ ) é definido por Bonham-Carter (1994) pela Equação 26:

$$V = \sqrt{\frac{\chi^2}{T..M}} \quad (26)$$

Sendo:

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

$\chi^2$  = 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.

Assim, a “Incerteza de Informação Conjunta” de A e B, U (A,B), pode ser usada como medida de associação, sendo definida pela Equação 27:

$$U (A,B) = 2 \left[ \frac{H (A) + H (B) - H (A,B)}{H (A) + H (B)} \right] \quad (27)$$

Segundo Almeida (2003), o índice U varia entre 0 e 1, sendo que, quando os dois mapas são completamente independentes,  $H(A,B) = H(A) + H(B)$  e  $U(A,B)$  é 0 (zero) e, quando os dois mapas são completamente dependentes,  $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$  e  $U(A,B)$  é 1 (um). Os valores que forem inferiores a 0,5, tanto para U quanto para V, apresentam menor associação e valores acima de 0,5 demonstram uma alta correlação.

Ferrari (2008), ressalta que esse procedimento é indispensável, uma vez que o método de Pesos de Evidências é baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes. Segundo esse teorema, a seleção de variáveis para a análise de modelagem deve considerar a avaliação da independência entre pares de variáveis explicativas selecionadas para explicar o mesmo tipo de transição de uso e cobertura da terra.

Foram utilizadas nessa etapa, o mapa de uso inicial, o Cubo de variáveis estáticas, arquivo de Pesos de Evidência (weights.dcf), o *functor* “Determine Weights

of *Evidence Correlation*”, com o cálculo do mapa de distância dos números de classes de uso desejada e um *functor* que salvou os dados gerados em uma tabela no formato “csv” para posterior análise. A execução do procedimento pode ser visualizada na Figura 12.

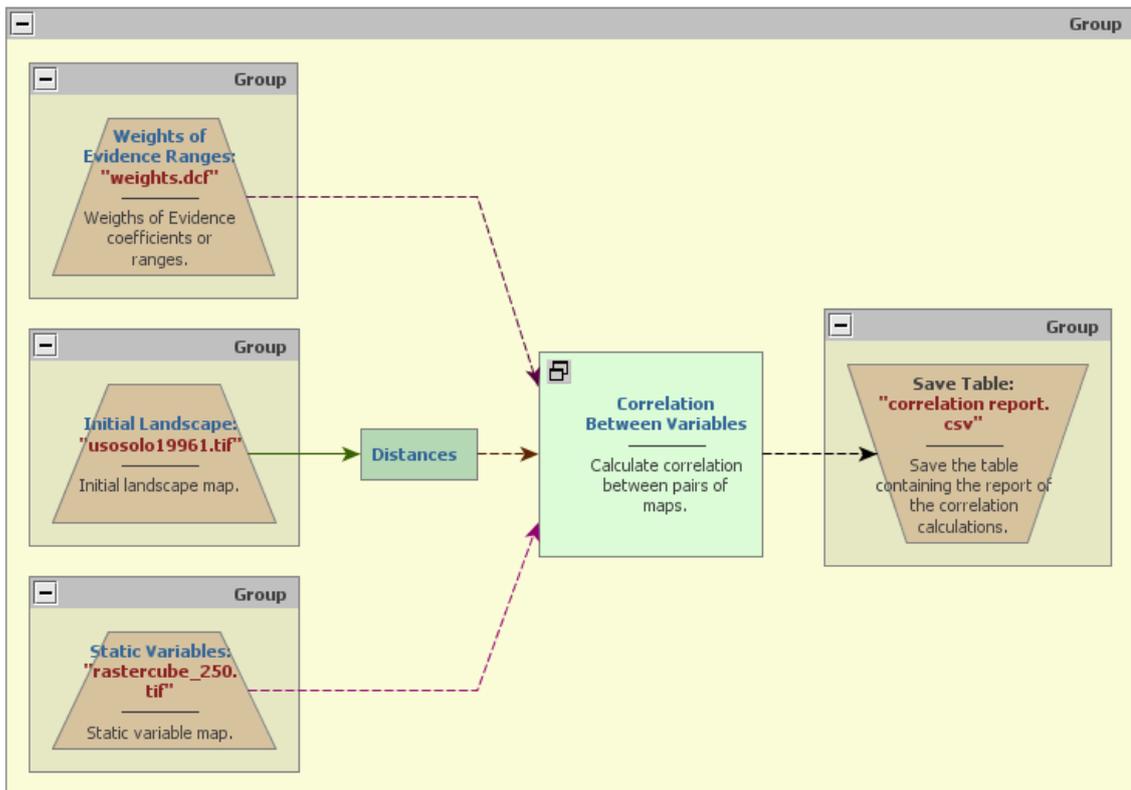


Figura 12 – Esquema contendo a interface gráfica para o cálculo da correlação dos Pesos de Evidência.

### 3.3.6.5 Rodando o modelo de simulação

Após a etapa de correlação das variáveis, utilizou-se os funtores com o uso do mapa inicial, o Cubo de variáveis, a matriz de transição de um ano para outro e o arquivo de Pesos de Evidência. Adicionou-se um contêiner denominado “Repeat”, que tem a função de executar as operações durante os intervalos de tempo, por exemplo entre os anos de 1996 e 2011 o parâmetro utilizado foi o de 15 anos.

Dentro desse container foram inseridos funtores para realização do processo do modelo como:

“Mux Categorical Map” – Utilizado para reinjetar os mapas produzidos de uma iteração para outra seguinte, o qual permite a retroalimentação dos mapas;

“Calc Distance” – Tem como finalidade calcular os mapas de distâncias;

“*Modulate Change Matrix*” – Onde foram definidas as taxas percentuais de mudança para as transições;

“Expander” – Foi utilizado no processo para expansão ou contração das manchas que já se encontravam de uma certa classe;

“Patcher” - Teve a função de gerar ou formar novas manchas por meio do mecanismo de semeadura, ou seja, procurando por células ao redor da localização escolhida para uma transição conjunta;

“Calc W. OF. E. Probability Map” – Foi inserido para calcular um mapa de probabilidade de transição para cada transição especificada somando os Pesos de Evidência;

Por fim, foram inseridos os parâmetros de saída, sendo um com a geração da paisagem dos mapas anuais e o outro com a geração dos mapas de probabilidades de mudanças na paisagem anual. Dessa forma, obteve-se os mapas simulados para os anos finais e os mesmos comparados com os mapas reais. Os procedimentos adotados para a simulação dos modelos podem ser visualizados na Figura 13.

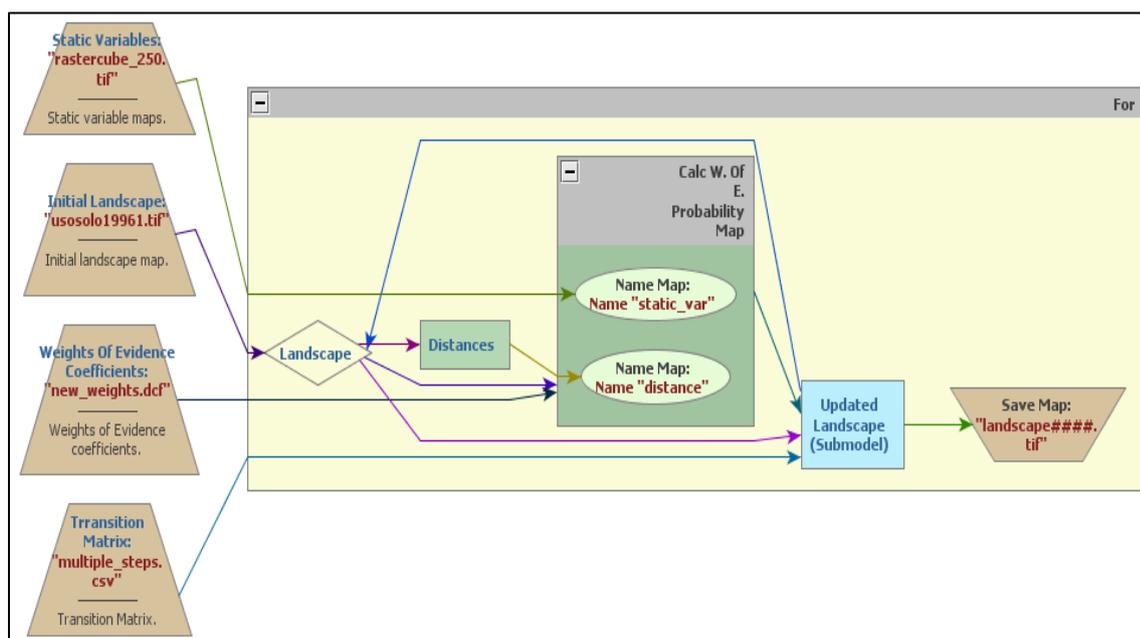


Figura 13 – Modelo para procedimento na simulação de geração de mapas de probabilidades e de paisagem anual.

### 3.3.6.6 Teste de validação do modelo simulado

Para avaliar o desempenho do modelo simulado, aplicou-se o teste de validação, o qual consiste no emprego de um método baseado em Lógica fuzzy, por meio das funções de decaimento exponencial e de decaimento constante. O método utilizado pelo Dinamica EGO é uma adaptação do método de Hagen (2003); tal método emprega uma função de decaimento com a distância para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central, como pode ser visualizado na Figura 14.

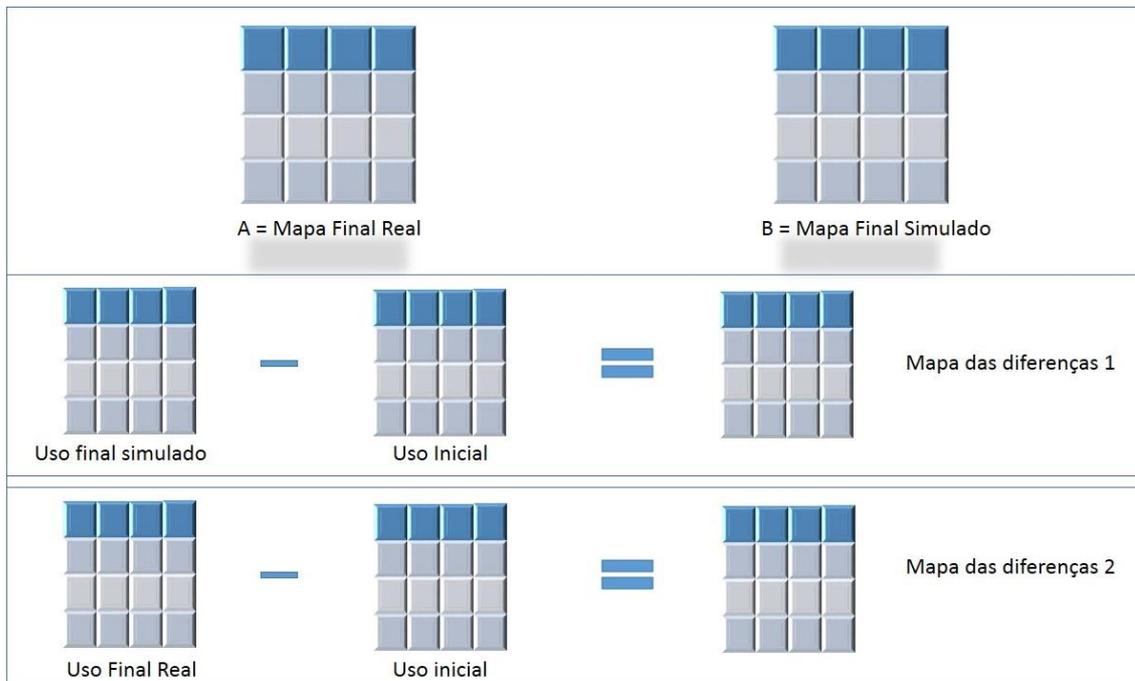


Figura 14 – Método de aplicação dos algoritmos de similaridade fuzzy.

Fonte: Adaptada de Ferrari (2008).

Sendo assim, o método utilizado nesse trabalho é o da lógica Fuzzy, que é baseado na dubiedade de localização (“fuziness of location”), o qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor proporção, pelas células vizinhas. A validação é determinada por um vetor “crisp” (exato) que é associado a cada célula no mapa, ou seja, tantos elementos quantos forem as categorias de uso

e cobertura da terra, e assume valores de 1 para a categoria  $i$  e 0 para categorias que diferem de  $i$ .

Dentro desse contexto, o vetor de vizinhança fuzzy (Vnbhood) para cada célula é dado por:

$$\text{Vnbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{\text{nbhood } 1} \\ \mu_{\text{nbhood } 1} \\ M \\ \mu_{\text{nbhood } C} \end{bmatrix}$$

$$\mu_{\text{nbhood}} = \left| \mu_{\text{crisp}(i,1)} * m_1, \mu_{\text{crisp}(i,2)} * m_2, \dots, \mu_{\text{crisp}(i,n)} * m_n \right| \max \quad (28)$$

Em que:

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

$\mu_{\text{crisp } ij}$  é a pertinência da categoria  $i$  para a célula vizinha  $j$ , assumindo-se no vetor *crisp* 1 para  $i$ , e 0 para categorias diferentes de  $i$  ( $i \in C$ );

$m_j$  é a pertinência baseada em distância da célula vizinha  $j$ , em que  $m$  refere-se a uma função de decaimento da distância, por exemplo, um decaimento exponencial ( $m = 2^{-d/2}$ ).

No decaimento exponencial as etapas do processo não sofrem alterações em suas definições, porém são essenciais para o bom funcionamento do modelo, podendo ser visualizado na Figura 15. Já para aplicar o algoritmo de decaimento constante, na aplicabilidade para se avaliar o índice de similaridade, foram definidos alguns parâmetros como um mapa de uso inicial (1996), mapa de uso final (2011) e um mapa simulado final (2011). No entanto, a maioria dos parâmetros são iguais ao decaimento exponencial, mudando alguns índices de saída, que são as tabelas de Máximo e Mínima similaridade entre os mapas para as janelas 3x3, 5x5, 7x7, 9x9 e 11x11 (Figura 16).

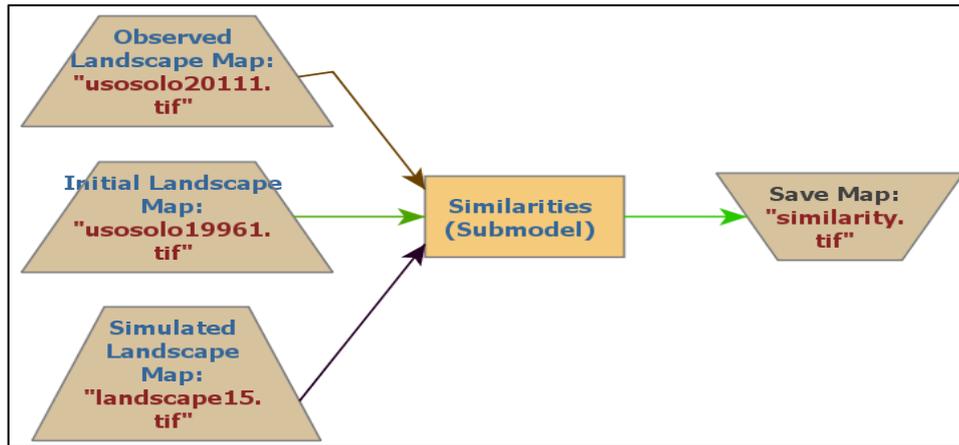


Figura 15 – Esquema de validação utilizando o decaimento exponencial no Dinamica EGO.

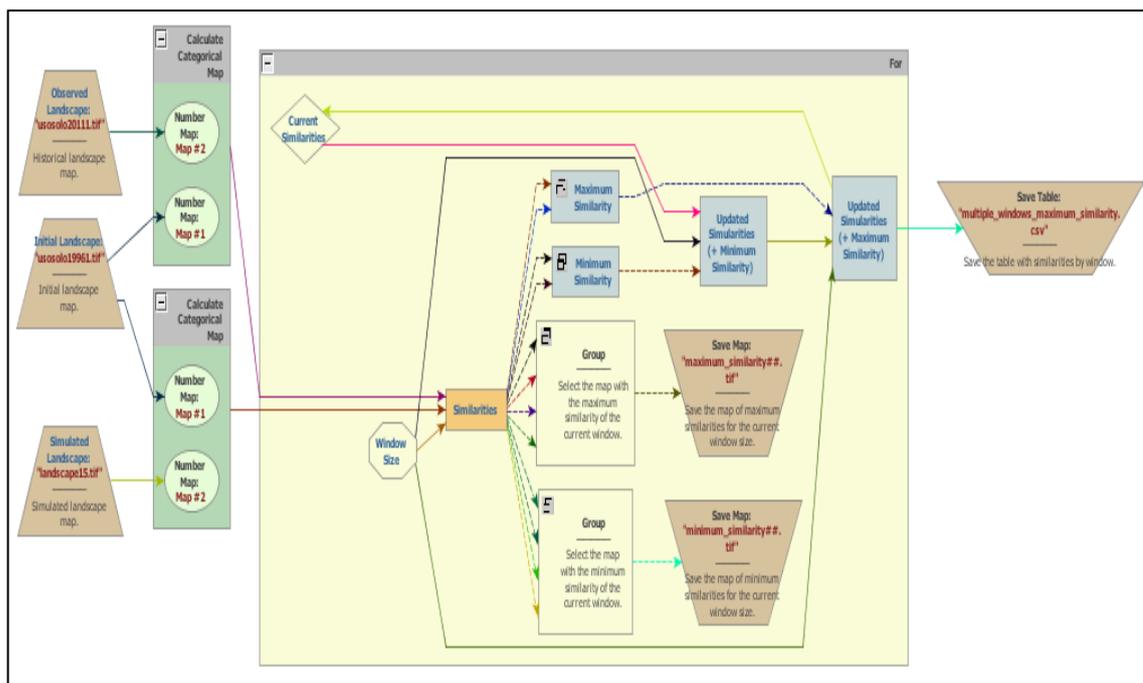


Figura 16 – Esquema de validação utilizando o decaimento constante no Dinamica EGO.

### 3.3.6.7 Simulação do modelo

Após a validação do modelo, foi realizado o procedimento de simulação dos cenários para 2026 (Figura 17), sendo que os mapas criados foram exportados para

o SPRING e quantificados quanto ao uso e cobertura da terra. Também foi realizado o cálculo das matrizes de transições para os anos de 2011 a 2026 para que fossem observadas as tendências das mudanças de ano a ano e das mudanças totais no período de 15 anos.

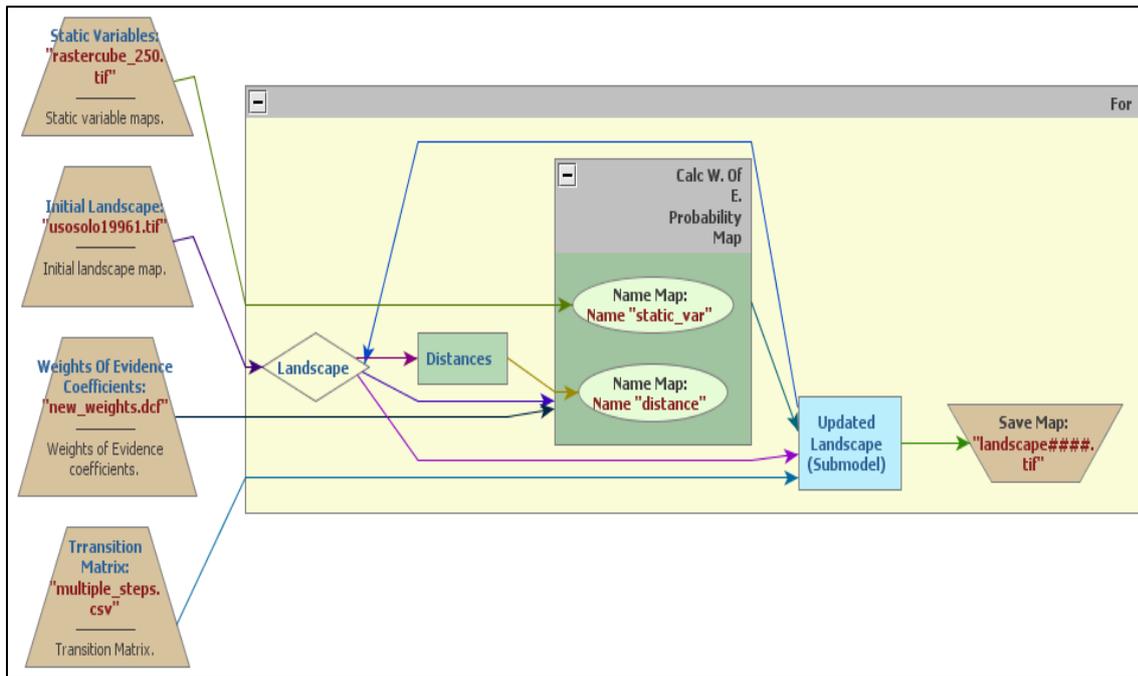


Figura 17 – Esquema de simulação do modelo na criação de cenários futuros.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Avaliação quanto a confiabilidade da classificação

Os índices *Kappa* nos anos de 1985, 1996, 2011 e 2013, realizados por meio do algoritmo *Battacharya*, foram obtidos por meio das próprias amostras adquiridas no treinamento pelo SPRING 5.1.8. A seguir as Tabelas 6, 7, 8 e 9 representam as matrizes de erros de classificação e o índice de *Kappa* para os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 respectivamente.

Tabela 6 – Matriz de confusão do ano de 1985 gerada no aplicativo SPRING

Matriz de Erros de Classificação - 1985								
	Água	Floresta	Agricultura	Campo	Areal	Abstenção	∑ Linha	
Água	385343	0	0	0	0	0	385343	
Floresta	0	207178	0	0	0	0	207178	
Agricultura	0	0	452072	0	0	0	452072	
Campo	0	0	1872	268817	0	0	270689	
Areal	0	0	1512	0	59818	0	61330	
∑ Coluna	385343	207178	455456	268817	59818	0	1376612	
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas								
∑ Linha = ∑ Coluna	1376612							
∑ Linha <sup>2</sup>	4,728E+11							
∑ Diagonal	1373228							
Índice <i>Kappa</i>	0,9968							
		$K = \frac{(1376612 \times 1373228) - 4,728E+11}{(1376612)^2 - 4,728E+11}$						
		<b>K=0,9968</b>						

Tabela 7 – Matriz de confusão do ano de 1996 gerada no aplicativo SPRING

Matriz de Erros de Classificação - 1996							
	Água	Floresta	Agricultura	Campo	Areal	Abstenção	∑ Linha
Água	300859	0	0	0	0	0	<b>300859</b>
Floresta	0	408711	0	0	0	0	<b>408711</b>
Agricultura	1370	0	628546	0	0	0	<b>629916</b>
Campo	0	0	0	450808	0	0	<b>450808</b>
Areal	0	0	244	0	81138	0	<b>81382</b>
∑ Coluna	<b>302229</b>	<b>408711</b>	<b>628790</b>	<b>450808</b>	<b>81138</b>	<b>0</b>	<b>1871676</b>
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas							
∑ Linha = ∑ Coluna	1871676	$K = \frac{(1871676 \times 1870062) - 8,642E+11}{(1871676)^2 - 8,642E+11}$ <p style="text-align: center;"><b>K=0,9986</b></p>					
∑ Linha <sup>2</sup>	8,642E+11						
∑ Diagonal	1870062						
Índice <i>Kappa</i>	<b>0,9986</b>						

Tabela 8 – Matriz de confusão do ano de 2011 gerada no aplicativo SPRING.

Matriz de Erros de Classificação - 2011							
	Água	Floresta	Agricultura	Campo	Areal	Abstenção	∑ Linha
Água	344613	0	0	0	0	0	<b>344613</b>
Floresta	0	348375	0	0	0	0	<b>348375</b>
Agricultura	4031	303	664901	0	0	0	<b>669235</b>
Campo	0	0	0	834876	0	0	<b>834876</b>
Areal	0	0	244	0	50297	0	<b>50541</b>
∑ Coluna	<b>348644</b>	<b>348678</b>	<b>665145</b>	<b>834876</b>	<b>50297</b>	<b>0</b>	<b>2247640</b>
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas							
∑ Linha = ∑ Coluna	2247640	$K = \frac{(2247640 \times 2243062) - 1,388E+12}{(2247640)^2 - 1,388E+12}$ <p style="text-align: center;"><b>K=0,9972</b></p>					
∑ Linha <sup>2</sup>	1,388E+12						
∑ Diagonal	2243062						
Índice <i>Kappa</i>	<b>0,9972</b>						

Tabela 9 – Matriz de confusão do ano de 2013 gerada no aplicativo SPRING.

Matriz de Erros de Classificação - 2013								
	Água	Floresta	Agricultura	Campo	Areal	Abstenção	∑ Linha	
Água	346460	0	0	0	0	0	<b>346460</b>	
Floresta	0	351788	0	0	0	0	<b>351788</b>	
Agricultura	4031	303	668186	0	0	0	<b>672520</b>	
Campo	0	0	0	881566	0	0	<b>881566</b>	
Areal	0	0	192	0	50297	0	<b>50489</b>	
∑ Coluna	<b>350491</b>	<b>352091</b>	<b>668378</b>	<b>881566</b>	<b>50297</b>	<b>0</b>	<b>2302823</b>	
Cálculo do índice de <i>Kappa</i> das amostras adquiridas								
∑ Linha = ∑ Coluna	2302823							
∑ Linha <sup>2</sup>	1,476E+12							
∑ Diagonal	2298297							
Índice <i>Kappa</i>	<b>0,9973</b>							
		$K = \frac{(2302823 \times 2298297) - 1,476E+12}{(2302823)^2 - 1,476E+12}$						
		<b>K=0,9973</b>						

Nota-se que a melhor classificação foi encontrada no ano de 1996, porém as demais também se enquadraram no índice excelente de classificação segundo escala (0,80 – 1,0) proposta por Landis e Koch (1977). Houve confusão na classificação nos anos estabelecidos nas classes água e agricultura. Esse fator é devido as áreas irrigadas da rizicultura, o que leva a confusão do modelador quanto a classificação de uma classe a outra. Notou-se também a confusão na classificação entre agricultura e os areais devido ao solo agrícola abandonado próximo a essas áreas, em determinadas amostras a reflectância dos alvos foi semelhante o que pode levar a confusão na obtenção da amostra.

#### 4.2 Mapeamento do uso e cobertura da terra

Com base na classificação de imagens LANDSAT 5 e 8, foi possível quantificar o uso e cobertura da terra da microrregião da Campanha Ocidental de modo satisfatório. Nas Tabelas 10 e 11 são descritos os resultados encontrados nas classificações dos anos avaliados nas classes escolhidas em relação ao tamanho da área em hectare e a porcentagem. Essas indicam tendência de aumento de áreas

florestadas para a região, ao longo dos anos analisados, bem como aumento de áreas agriculturáveis.

Essas conversões em prol da agricultura e aumento de áreas florestadas podem estar relacionadas com o incentivo fiscal governamental, o melhoramento e modernização da produção, estando esses atrelados à diminuição de áreas de campo. A Lâmina d'água sofreu queda no período avaliado. Em 1985, houve forte influência de chuvas na região, assim nesse ano essa classe apresentou a maior alta nos resultados dentre os demais anos que praticamente se estabilizaram quando comparados ao elevado aumento ocorrido em 2013.

A classe Areal, apresentou considerável diminuição ao longo do tempo, porém entre os anos de 1985 e 1996 houve aumento em sua área. Este resultado se revela em função de uma conscientização e preservação dessas áreas afetadas pelo fenômeno de arenização. Diversas pesquisas vêm sendo realizadas, além de reflorestamentos e investimentos de empresas privadas, o que corrobora com Suertegaray (1987), ao avaliar esse fenômeno como de ocorrência natural, mas que poderia sofrer influências antrópicas, tanto para seu aumento quanto para a sua diminuição dessas regiões.

O comportamento ao longo dos anos analisados das classes temáticas, observa-se que, as classes Agricultura e Campo, foram as que obtiveram os maiores valores em hectares e conseqüentemente em porcentagem, ou seja, são as classes predominantes na área de estudo. Essa relação é uma tendência devido ao aumento da produção, fazendo necessário abrir novas fronteiras agrícolas, para suprir a necessidade da população.

Tabela 10 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em hectares, nos anos de 1985, 1996, 2011 e 2013.

Classes de uso	1985	1996	2011	2013
	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)	Área (ha)
Floresta	328.311,12	420.624,37	437.403,04	440.322,97
Agricultura	951.523,05	822.481,69	991.585,94	1.228.581,67
Campo	1.684.038,73	1.734.035,50	1.555.366,89	1.305.476,14
Areal	16.944,78	17.357,61	11.419,22	11.338,15
Lâmina d'água	95.954,88	82.273,41	80.997,49	91.053,67
Total	3.076.772,58	3.076.772,58	3.076.772,58	3.076.772,58

Tabela 11 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em porcentagem da área total, entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013.

Classes de uso	1985 (%)	1996 (%)	2011 (%)	2013 (%)
Floresta	10,67	13,67	14,22	14,31
Agricultura	30,93	26,73	32,23	39,93
Campo	54,73	56,36	50,55	42,43
Areal	0,55	0,56	0,37	0,37
Lâmina d'água	3,12	2,67	2,63	2,96
Total	100	100	100	100

Os mapas de uso e cobertura da terra da microrregião da Campanha Ocidental, para os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013, podem ser visualizados nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

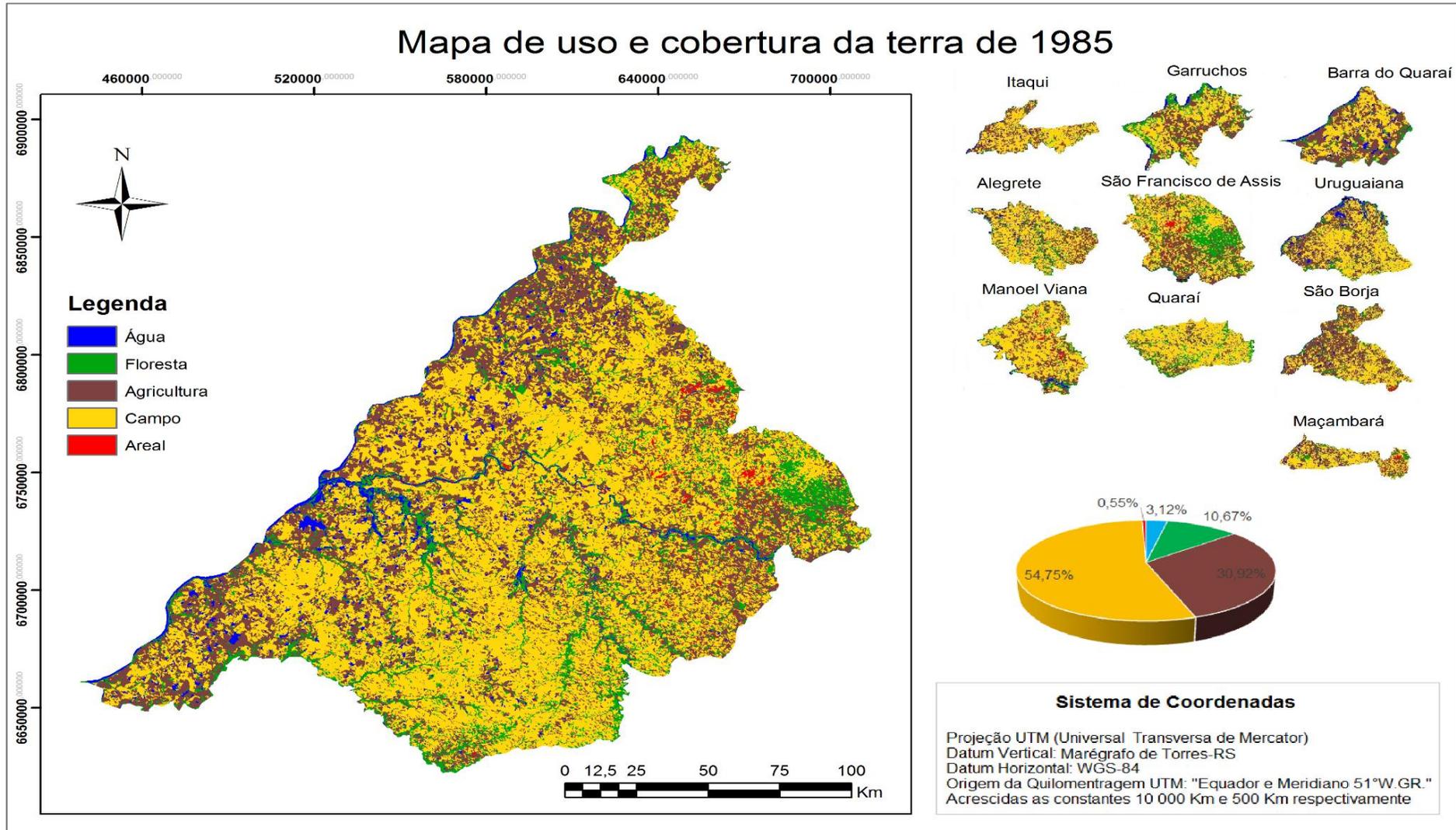


Figura 18 – Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental - RS, no ano de 1985.

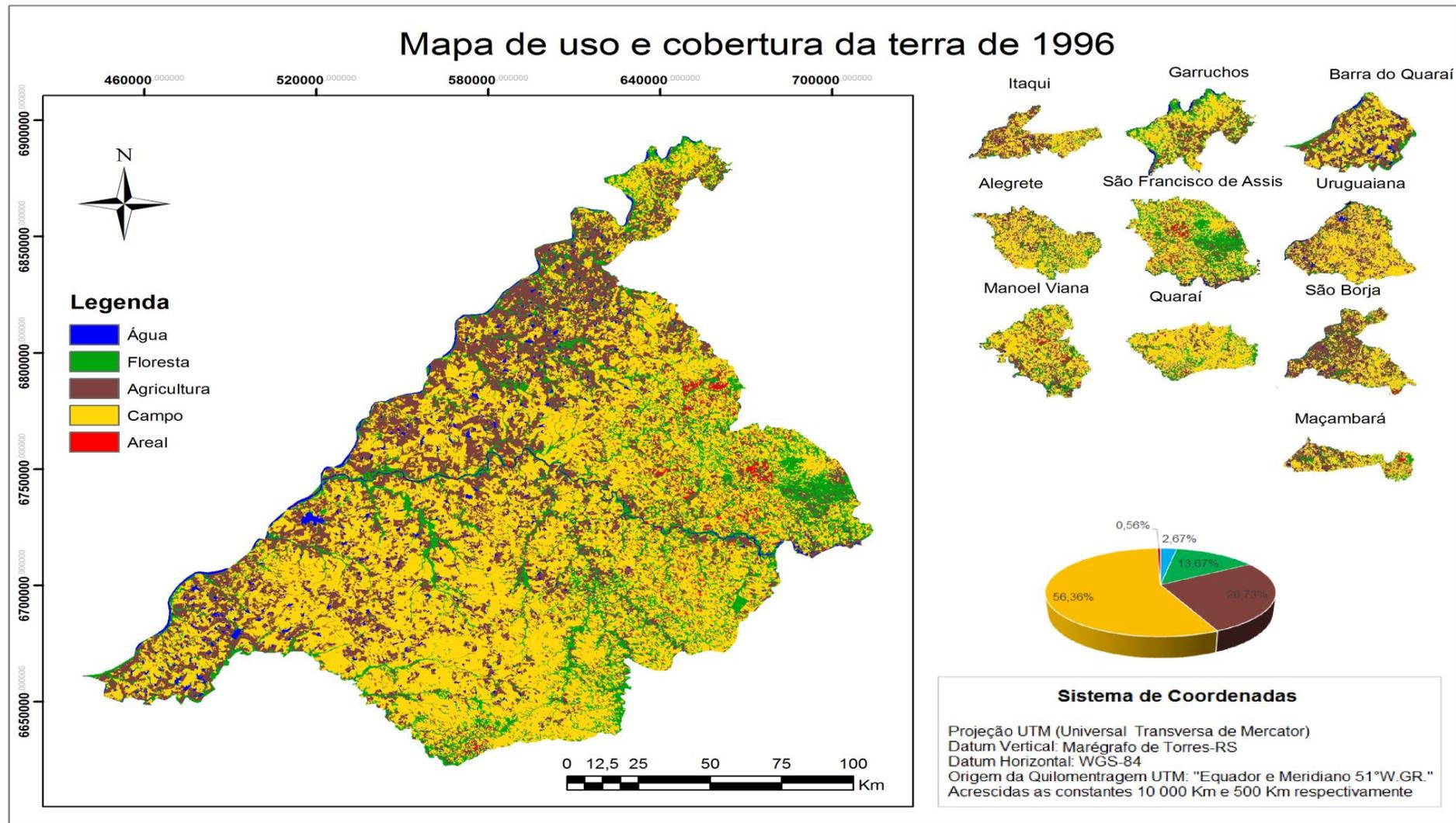


Figura 19 – Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental - RS, no ano de 1996.

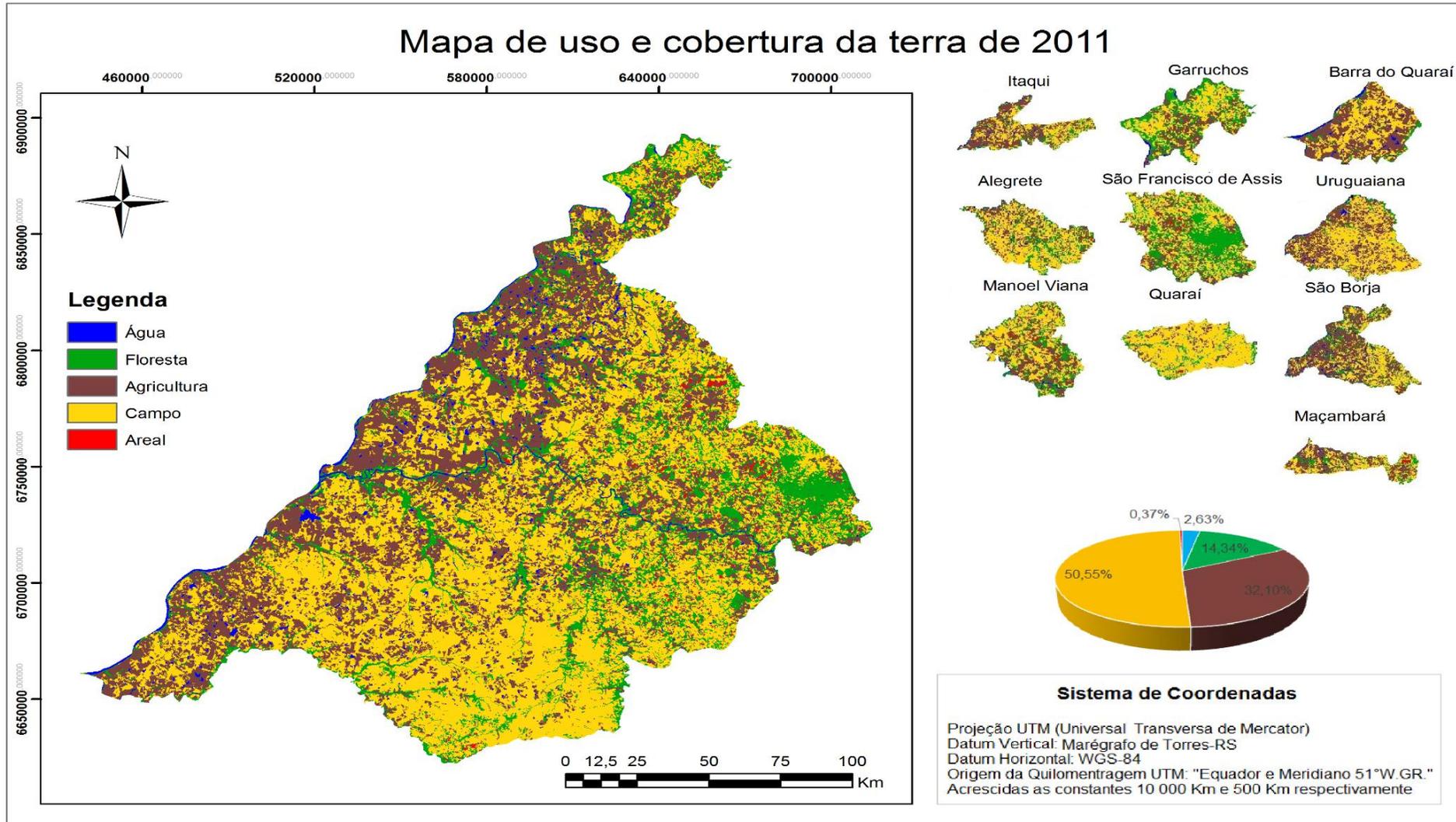


Figura 20 – Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental – RS, no ano de 2011.

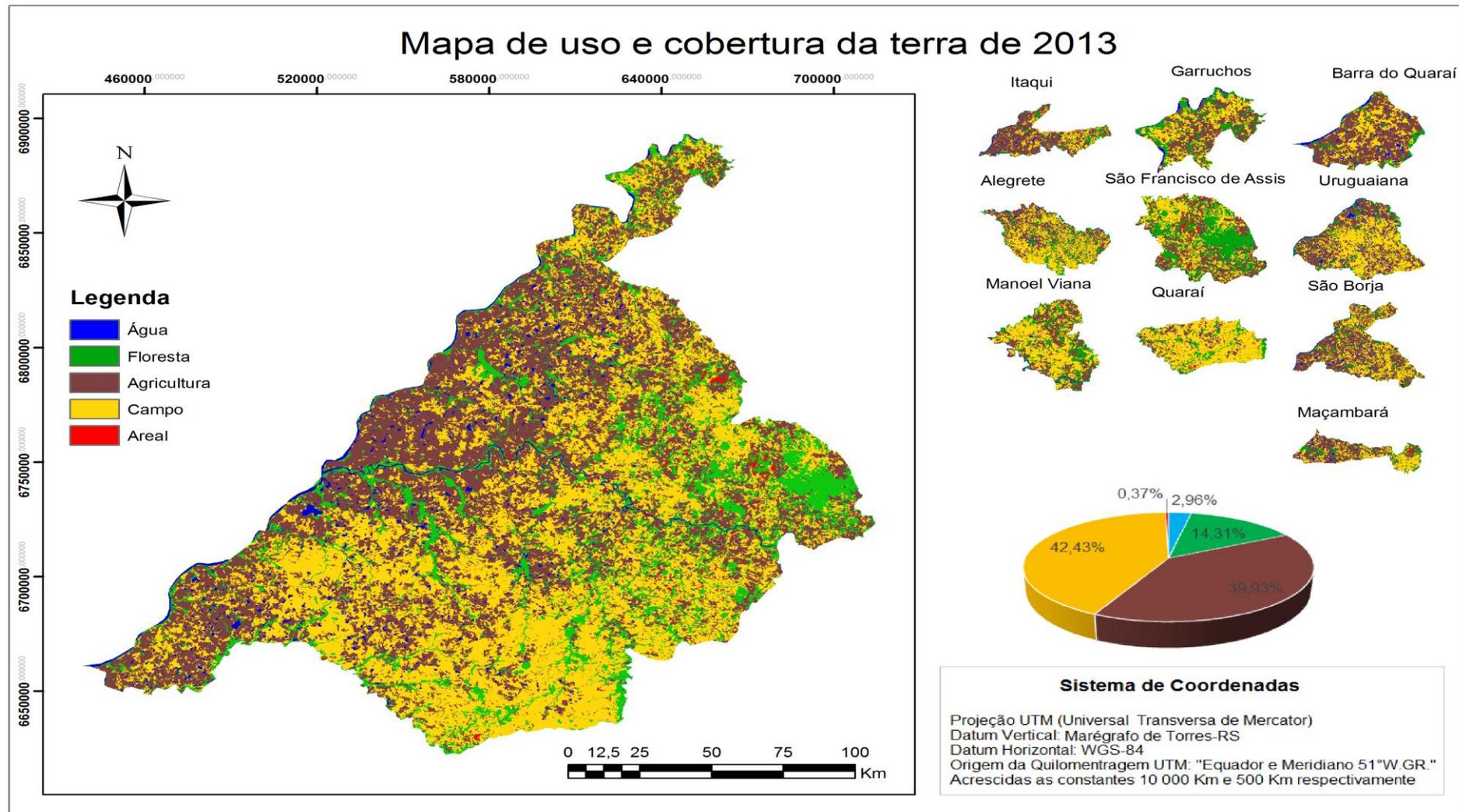


Figura 21 – Mapa de uso e cobertura da terra da microrregião Campanha Ocidental – RS, no ano de 2013.

### 4.3 Evolução do uso e cobertura da terra

Após a quantificação do uso e cobertura da terra, fez-se necessário uma avaliação mais detalhada acerca das classes pesquisadas, possibilitando a obtenção de resultados pontuais e comparativos entre os anos, em cada classe (Tabela 12).

Tabela 12 – Evolução do uso e cobertura da terra, em hectares, e suas respectivas porcentagens entre os anos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013 na microrregião Campanha Ocidental – RS.

Classes de Uso	1985-1996		1996-2011		2011-2013	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Floresta	92.313,28	28,12	16.778,67	3,99	2.919,93	0,67
Agricultura	-129.041,51	-13,6	169.104,24	20,56	236.995,73	23,90
Campo	49.996,81	2,97	-178.668,61	-10,30	-249.890,75	-16,07
Areal	412,86	2,44	-5.938,39	-34,21	-81,75	-0,71
Lâmina d'água	-13.681,44	-14,3	-1.275,92	-1,55	10.056,18	12,42

É possível verificar a evolução do uso e cobertura da terra nos períodos de estudo, onde está retratada a variação percentual e em área de cada classe, sendo que valores negativos representam redução de áreas da classe de uso. Destaca-se o considerável aumento de florestas, com 28,12% entre os anos de 1985 a 1996, 3,99% entre os anos de 1996 a 2011 e 0,67% entre o período de 2011 a 2013, indicando que houve preservação, regeneração das florestas e também o reflorestamento dessas áreas (Figura 22).

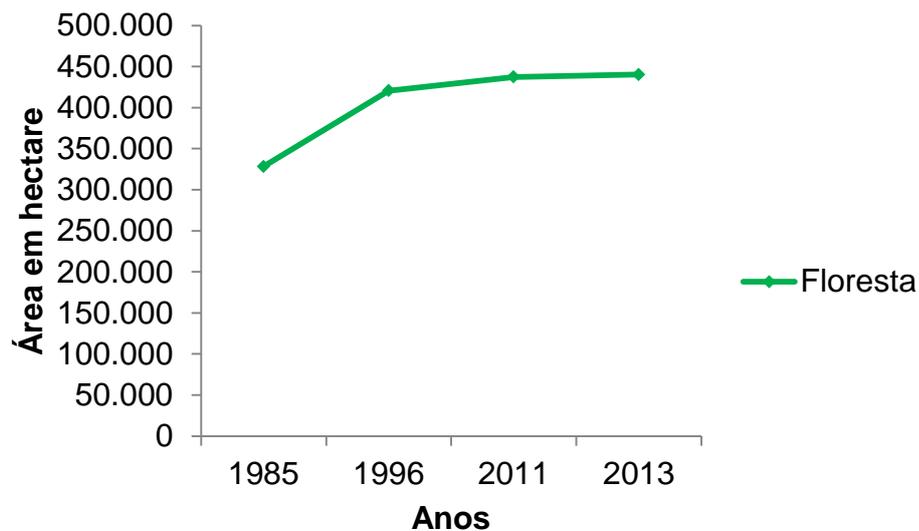


Figura 22 – Evolução florestal entre os anos de 1985, 1996 e 2011 na microrregião da Campanha Ocidental – RS.

O aumento de áreas reflorestadas, em virtude de maiores incentivos fiscais, foi observado no Inventário Florestal Contínuo realizado em todo o Rio Grande do Sul (SEMA, 2010). Esse fato pode ser justificado pelo abandono de áreas difíceis de serem cultivadas, pelo maior rigor da legislação e também pela conscientização dos proprietários sobre a importância das florestas para o meio ambiente e uma alternativa como fonte de renda.

Hendges et al. (2012), estudando a dinâmica e simulação das áreas de floresta nativa no Rio Grande do Sul, no período de 1988 a 2020, menciona que esse crescimento teve aumento médio de 1,15% por década de análise, em relação à área total do Estado, ou seja, ganho de aproximadamente 3.237,8 km<sup>2</sup> de florestas nativas a cada 10 anos.

Benedetti et al. (2013), utilizando o produto MOD13Q1 do sensor Modis para análise temporal e mapeamento das florestas nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul entre os anos de 2000 a 2008, obteve como resultado o aumento das áreas florestais. Os autores atribuem esse aumento 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.

Segundo os mesmos autores, a legislação para proteção ambiental e as práticas de fiscalização tornaram-se, com o passar dos anos, 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 de *Eucalyptus*, *Pinus* e *Acacia*, por meio de florestamentos e reflorestamentos.

Similarmente, Torres (2011) verificou aumento sistemático das áreas florestais em seu estudo na microbacia do Arroio Grande, região central do Rio Grande do Sul, utilizando-se de uma série temporal com cinco classificações digitais de imagens Landsat (1987, 1998, 2002, 2005 e 2007) e uma série de imagens do satélite ALOS de 2010.

Ferrari (2008), utilizando imagens Landsat para modelagem de uso e cobertura da terra da Quarta Colônia-RS, para previsão de um cenário para o ano de 2018, observou também aumento das áreas florestais na simulação de um cenário para o ano de 2018.

Os referidos resultados demonstram que o Estado está em processo de recuperação de áreas florestais, suprimindo a carência de áreas nativas, as quais em 2007 eram de apenas 15% da área total (HENDGES, 2012).

No presente estudo, foi observado que a classe Agricultura, no primeiro período analisado (1985-1996), sofreu queda de 13,6% dessas áreas (Figura 23). Essa diminuição pode ser explicada pelo fato da economia do Rio Grande do Sul, naquela época, ter passado por diversas transformações e crises econômicas.

Segundo Conceição et al. (2010), fazendo um balanço da economia gaúcha na visão das contas regionais entre 1981 a 2009, durante esses 28 anos, ocorreu um crescimento negativo do PIB em 11 deles.

As piores quedas aconteceram em 1990 (-6,6%), 1995 (-5,0%), o que seria um dos motivos para a queda da agricultura nesse período. Segundo o mesmo autor, em 1985, a agropecuária participava com 16,9% no VAB (Valor Acrescentado Bruto) total do Estado. Essa participação caiu para 14,4% em 1994. A revisão metodológica redimensionou seu tamanho para 9,7% em 1995. Nos anos seguintes, as taxas de crescimento do setor melhoraram, acarretando o aumento do seu tamanho relativo na economia gaúcha, que, em 2008, atingiu 11,2%.

Já na segunda época (1996-2011), houve incremento de 20,56%, com um aumento de 169.104,24 ha das áreas agriculturáveis, possivelmente ocasionada

pela abertura de fronteiras agrícolas, por novas tecnologias e pela necessidade do aumento da produção de alimentos. Furlan (2012), estudando modelagem dinâmica de uso e cobertura da microbacia do Arroio Grande (RS), utilizando imagens LANDSAT 5 e 7, também verificou aumento na atividade agrícola entre os períodos de 2002 a 2011. Apesar das áreas possuírem características diferentes essa é uma tendência no Estado de abertura de fronteiras agrícolas. Torres (2011), fazendo análise multitemporal do uso da terra e cobertura florestal com dados dos satélites Landsat e Alos, obteve em seus estudos o aumento das áreas de agricultura entre 1987 a 2009.

No terceiro período de análise (2011 a 2013), as áreas de agricultura continuaram crescendo com 236.995,73 ha, o que em porcentagem equivale a 23,90%.

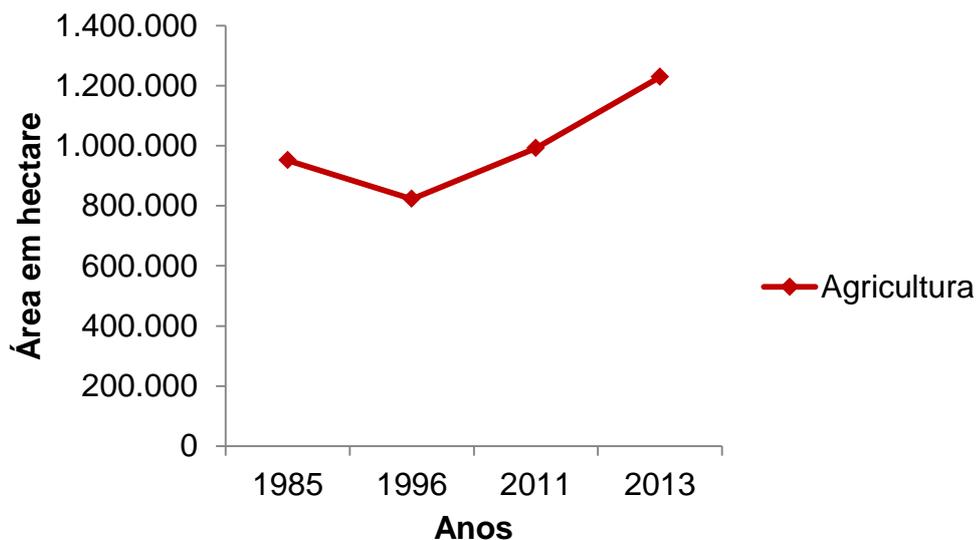


Figura 23 – Evolução da Agricultura entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental – RS.

Alonso (1997), em seu artigo intitulado “Panorama da economia do Rio Grande do Sul”, descreve que, para compreender o comportamento da economia gaúcha em 1996, é necessário observar o desempenho da mesma ao longo dos anos 90, haja vista que houve importantes mudanças a serem consideradas. Esse período pode ser dividido em duas épocas distintas. Na primeira época (1990 a

1993), o desempenho da economia do Estado, vis-à-vis a do País, repetiu, em termos gerais, o ocorrido nos anos 80, sendo observado resultados anuais negativos do Produto Interno Bruto (PIB), alternados com alguns anos de crescimento expressivo. Nos três anos seguintes (1994, 1995 e 1996), o crescimento da economia do Estado além de ter sido modesto, apresentou taxas decrescentes e negativas nos anos de 1995 e 1996.

A classe Campo, no primeiro período analisado, obteve aumento de 2,97%, o que representa incremento de 49.996,81 ha dessas áreas (Figura 24). Esse crescimento pode estar relacionado à diminuição de áreas agriculturáveis nesse primeiro momento. Já no segundo período, entre 1996-2011, houve um decréscimo na classe de 10,30%, totalizando 178.668,61 ha a menos do que no período anteriormente analisado neste estudo, possivelmente ocasionado pelo aumento das florestas e da agricultura na região. O terceiro período entre 2011 e 2013, apresentou queda nas áreas de campo com 249.890,75 ha a menos e um percentual negativo de 16,07. Segundo Kleinpaul (2005), a queda da classe Campo está relacionada, especialmente, pela conversão dessas áreas em agricultura, sendo o mesmo verificado por Ferrari (2008), Torres (2011) e Furlan (2012).

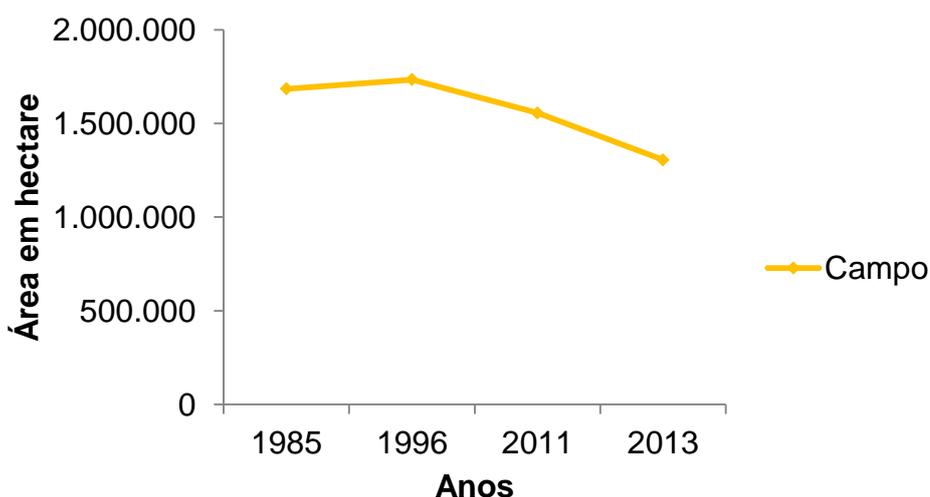


Figura 24 – Evolução do Campo entre os anos 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental – RS.

No período de 1985-1996, a classe Areal sofreu alta de 2,44%, totalizando incremento de 412,86 ha de novas áreas sofrendo com o processo de arenização (Figura 25). De certa forma, esse resultado era esperado, tendo em vista que a ocorrência de manchas arenosas está relacionada, principalmente, às cabeceiras das drenagens. Nessa porção Norte do rio Ibicuí, predominam drenagens com direção de escoamento Sul/Sudoeste, coincidentes com a orientação do relevo em direção da calha do rio principal (SUERTEGARAY et al., 2001).

Borges et al. (2007), utilizando imagens CBERS para a classificação por distância euclidiana no mapeamento de focos de arenização no setor Sul da alta bacia do Rio Araguaia e que possui a mesma geologia Botucatu, mencionam que, no período entre os anos de 1977 a 1989, não foram encontrados areais nessa área de estudo. Porém, após 1989 iniciaram-se os primeiros focos de áreas arenizadas, em virtude dos depósitos de materiais oriundos de voçorocas.

Os mesmos autores mencionam que até 1997 as áreas de arenização aumentaram consideravelmente, totalizando 97 novos areais. Entretanto, a partir de 2003 houve queda nas áreas de arenização.

No segundo período analisado neste estudo, entre 1996-2011, houve queda acentuada nas áreas de arenização, com um percentual de 34,21% a menos do que no período anterior analisado (Figura 26), o que representa decréscimo de 5.938,39 ha dessas áreas. No terceiro período entre 2011 a 2013, os areais se mantiveram praticamente estáveis apresentando uma queda de 81,75 ha e uma porcentagem de 0,71% a menos que no período anterior. Estes resultados podem estar relacionados com a utilização de técnicas conservacionistas, tais como o terraceamento para a contenção do fluxo superficial e a cobertura do solo por vegetação de rápido crescimento e boa cobertura.

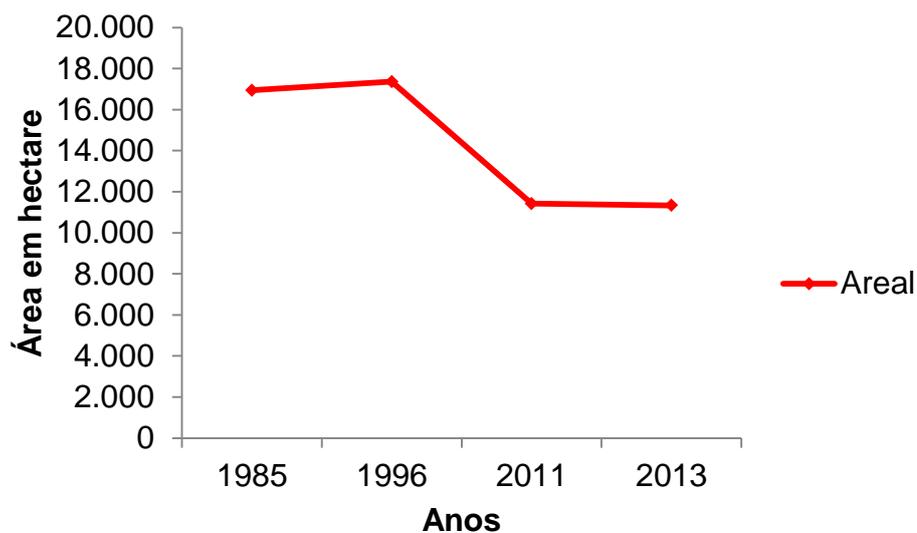


Figura 25 – Evolução dos areais entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental - RS.

Em entrevista ao Globo Repórter, Suertegaray em 2012 mencionou que:

Aqui é decorrente da natureza. O homem não tem culpa disso. É de origem natural. Eu me criei vendo estes areais e não era nenhum problema de degradação, não é nada. O meu avô me contava as histórias. Andava de carro por aqui e não achava que isso fosse grande problema. Eu estudo estas áreas desde 1983. E elas não têm grandes expansões. Esta vegetação atual vem se constituindo, vem se formando de três mil anos, dois mil anos pra cá. Então, é um tempo muito curto (SUERTEGARAY, 2012).

Algumas empresas, como é o caso da Stora Enso, vêm reflorestando parte dessas áreas com espécimes de eucaliptos e os resultados tem demonstrado eficácia visto que tem contribuído para contenção de avanços de novas áreas arenizáveis (Figura 26; A, B, C).

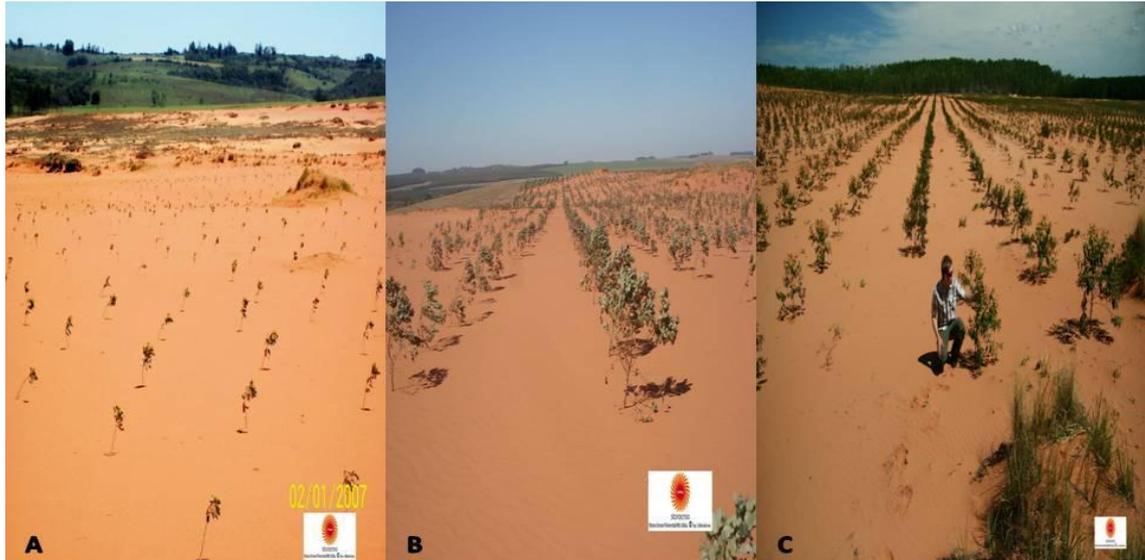


Figura 26 (A, B, C) – Reflorestamento em áreas com processo de arenização utilizando-se espécies de eucaliptos realizados pela Stora Enso na microrregião da Campanha Ocidental – RS.

Fonte: Stora enso (2007).

Neste estudo, a classe Lâmina D'água, no primeiro período de 1985-1996, foi caracterizada por um percentual de queda de 14,3%, o que em termos de hectare equivale a 13.681,44 ha a menos (Figura 27). Esse resultado que, de certa forma, é expressivo, pode estar associado ao acúmulo de chuvas no ano de 1985 associada ao uso dessas áreas alagadas pela agricultura irrigada. Já no período de 1996 a 2011, houve queda percentual dessa classe de apenas 1,55%, o que é praticamente insignificante. Já no último período analisado entre 2011 a 2013, houve um acréscimo de 10.056,18 ha o que corresponde a uma porcentagem de 12,42%. Essa característica depende basicamente do regime pluviométrico da região e da data da aquisição das imagens, o que faz com que essa classe oscile consideravelmente durante os anos de estudo.

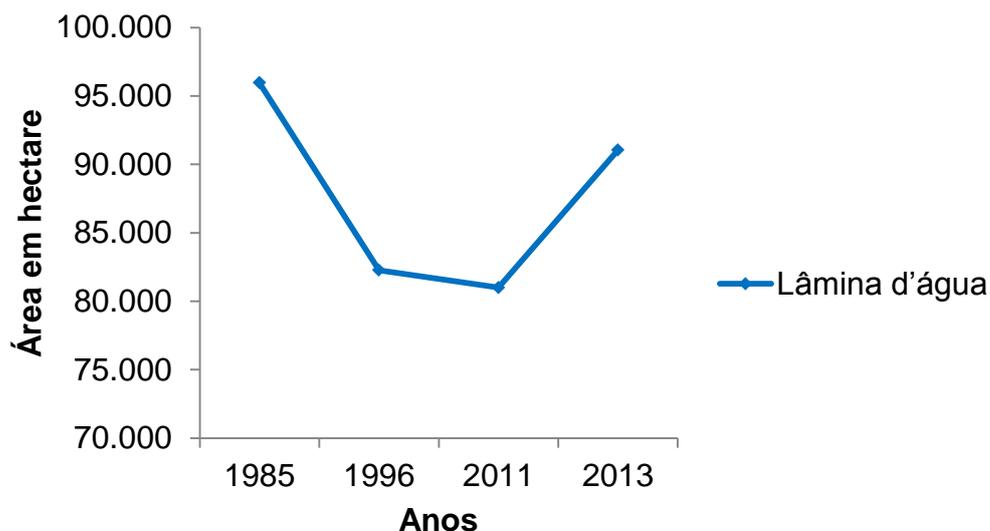


Figura 27 – Evolução da Lâmina D'água entre os anos de 1985, 1996, 2011 e 2013 na microrregião da Campanha Ocidental - RS.

#### 4.4 Transições de classes do uso e cobertura da terra

Após a identificação da evolução de cada classe, para os períodos avaliados, fez-se a análise das transições do uso e cobertura da terra, quantificando-as e qualificando-as por tabelas e mapas. Pode-se, então, obter informações sobre a influência de uma classe sobre a outra durante os períodos analisados.

Na primeira classe analisada, que pode ser visualizada na Tabela 13, observa-se que a maior expansão para classe água ocorreu na classe campo no período de 1985-1996; o que pode ter sido influenciado pelo aumento de barragens e áreas alagadas, já nos demais períodos (1996 - 2011 e 2011 - 2013) a classe agricultura foi a que mais influenciou a expansão da água, esse aumento pode estar relacionado com o aumento de áreas agrícolas para a rizicultura que necessita de áreas alagadas para seu cultivo. Entre 1985-1996 a classe água se manteve com 72,46% do seu total, ou seja, o que era água em 1985 continuou sendo água em 1996, e nos períodos seguintes, se manteve em 64,85% e 58,21%.

Tabela 13 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de água, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013.

Classes de Uso e Cobertura	Mudanças em ha 1985 - 1996		Mudanças em ha 1996 - 2011		Mudanças em ha 2011 - 2013	
		(%)		(%)		(%)
Água (Manutenção)	59.666,76	72,5	52.569,45	64,9	52.779,96	58,2
Floresta	3.359,07	4,08	9.053,37	11,2	5.527,89	6,1
Agricultura	8.326,80	10,1	10.205,46	12,6	20.952,36	23,1
Campo	10.887,93	13,2	8.129,16	10	11.264,04	12,4
Areal	107,91	0,13	1.109,88	1,37	151,4	0,17
Total	82.348,47	100	81.067,32	100	90.675,65	100

Espacializando os dados da Tabela 13 em mapas (Figura 28) evidencia-se o aumento de cursos d'água, influenciado pelos regimes de chuvas, pela criação de barragens e áreas alagadas pela agricultura ao longo dos períodos analisados.

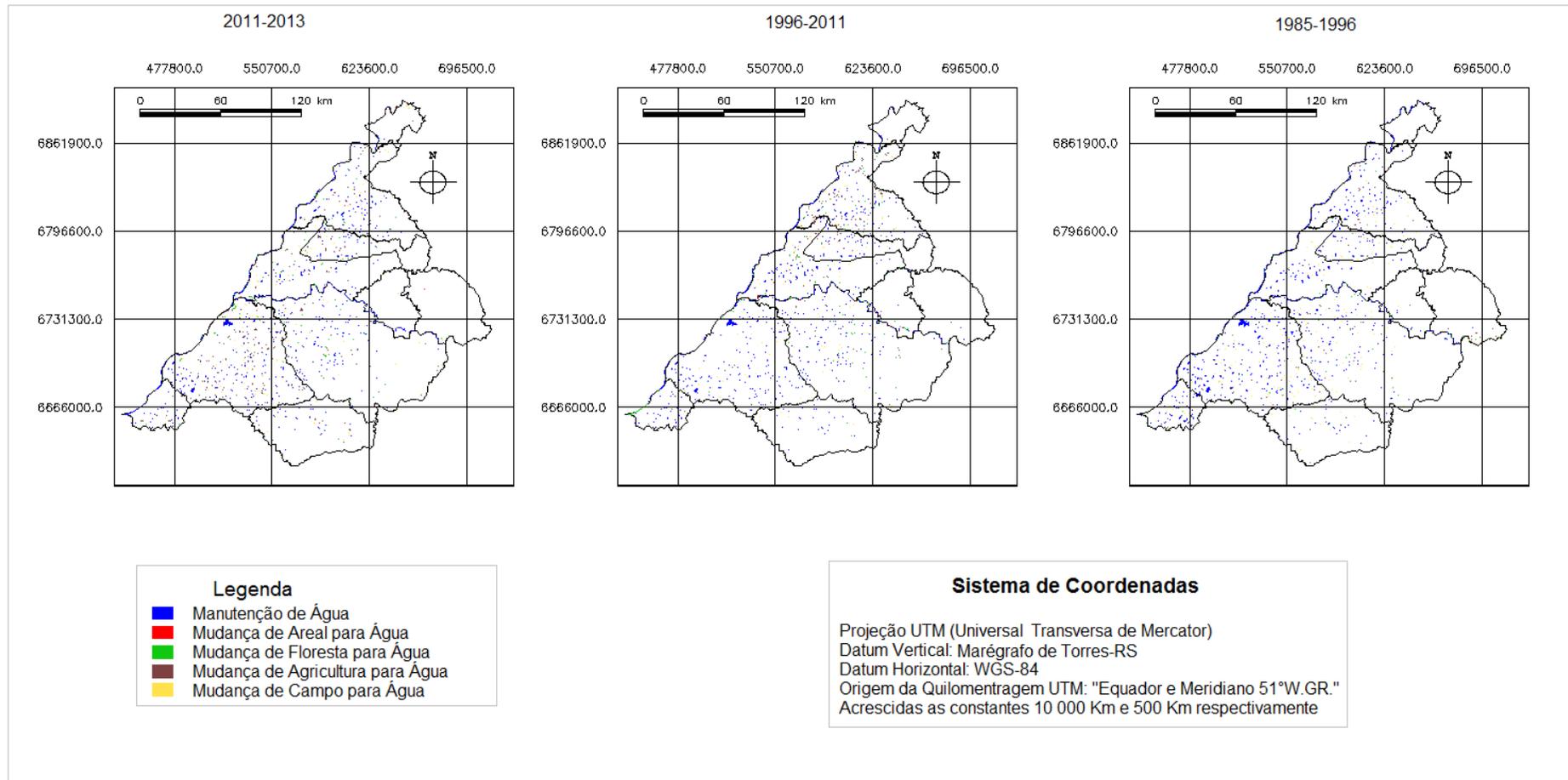


Figura 28 – Espacialização da expansão e manutenção da classe água nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.

A classe Floresta ao longo dos períodos analisados aumentou sua área (Tabela 14). No primeiro período da pesquisa entre os anos de 1985 a 1996 as florestas se mantiveram com um percentual de 46%. Nos demais, destaca-se a manutenção da classe floresta em 55,36% e 63,21% nos períodos de 1996 a 2011 e 2011 a 2013 respectivamente.

A classe que mais sofreu alteração, convertendo-se em floresta foi a classe Campo para todos os períodos analisados, seguido da agricultura.

Tabela 14 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Floresta, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013.

Classes de Uso e Cobertura	Mudanças em ha 1985 - 1996		Mudanças em ha 1996 - 2011		Mudanças em ha 2011 - 2013	
		(%)		(%)		(%)
Floresta (Manutenção)	194.475,51	46,2	244.218,24	55,4	278.137,80	63,2
Água	15.995,07	3,8	3.973,32	0,9	8.488,71	1,93
Agricultura	96.582,06	23	72.009,90	16,3	61.289,37	13,9
Campo	112.847,67	26,8	119.450,07	27,1	91.302,57	20,8
Areal	778,95	0,19	1.466,37	0,33	779,22	0,18
Total	420.679,26	100	441.117,90	100	439.997,67	100

É importante salientar a recuperação dos areais com florestas, no primeiro período com 778,95 ha e no segundo período com 1.466,37 ha de reflorestamentos. Mesmo no terceiro período, com um intervalo de 2 anos, houve também incremento de florestas em 779,22 ha.

Dessa forma, os dados da Tabela 15, quando espacializadas em um mapa como na Figura 29, apresentam as mudanças das classes dos períodos analisados para áreas de cobertura florestal.

A expansão florestal ocorre na parte leste da região, onde existe maior concentração de campo. Evidenciou-se que há aumento da cobertura florestal nas

bordas da rede de drenagem e em áreas de declividades mais elevadas, constatando-se, nessas áreas, o abandono da agricultura, pela dificuldade de cultivo no terreno íngreme e pela legislação ambiental cada vez mais rígida.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ferrari (2008), quando afirma que as mudanças para floresta ocorrem em bordas de áreas que já eram floresta -fato que permite considerar que houve processos de regeneração florestal. Porém, essas também ocorrem em áreas próximas a drenagem, demonstrando a ocorrência de conscientização ambiental na preservação da mata ciliar. Lippert (2014), analisando transições florestais observou, ao longo do estudo entre 2000 a 2012, o aumento em áreas florestais no Bioma Pampa em 19,3%, equivalente a 20.447,10 km<sup>2</sup> devido, principalmente, a expansão nas altitudes mais elevadas e nas vertentes mais íngremes dos afluentes da drenagem, onde áreas menos propícias para agricultura são abandonadas.

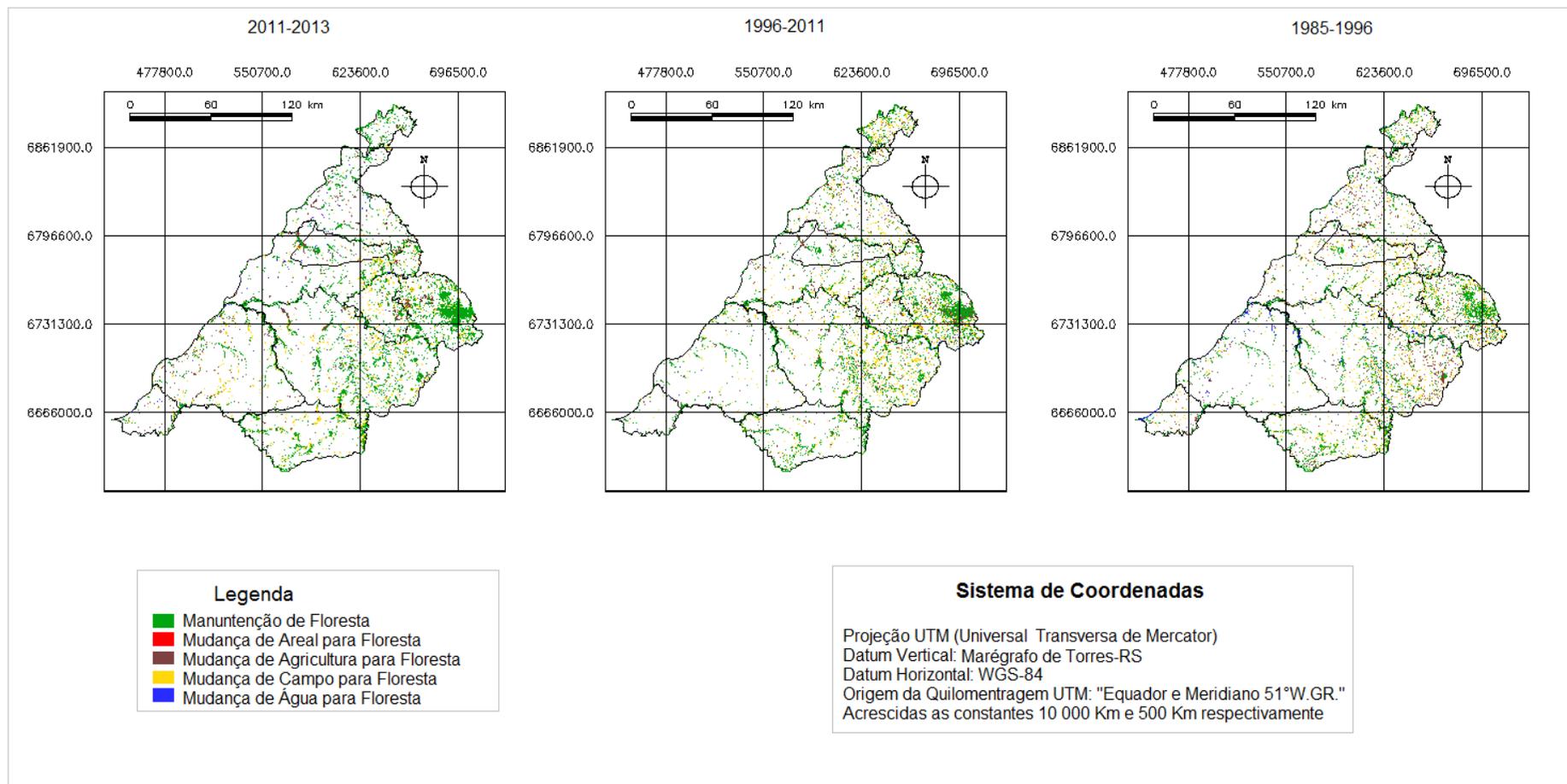


Figura 29 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Floresta nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.

Analisando a classe Campo (Tabela 15), observou-se a diminuição de sua área ao longo dos períodos analisados, entretanto, a classe que mais influenciou a sua expansão foi a agricultura, seguido pela classe Floresta com um percentual menor.

Tabela 15 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Campo, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013.

Classes de Uso e Cobertura	Mudanças em ha 1985 - 1996		Mudanças em ha 1996 - 2011		Mudanças em ha 2011 - 2013	
		(%)		(%)		(%)
Campo (Manutenção)	1.205.688,60	69,55	1.150.148,25	77,53	982.233,00	75,24
Água	9.474,93	0,55	9.381,24	0,61	4.636,80	0,36
Floresta	75.968,67	4,38	105.351,39	4,88	75.025,80	5,75
Agricultura	437.175,27	25,22	286.475,67	28,11	242.009,73	18,54
Areal	5.281,74	0,30	3.802,23	0,34	1.482,12	0,11
Total	1.733.589,21	100	1.555.158,78	100	1.305.387,45	100

Essa região é muito utilizada para a cultura de ovinos e bovinos. Dados censitários da pecuária do Rio Grande do Sul (IBGE, 2011) revelam que essa região possui 2.156.827 bovinos e 855.198 ovinos, o que explica a concentração dessas áreas. Na Figura 30, observa-se a espacialização da manutenção e mudança das classes para Campo.

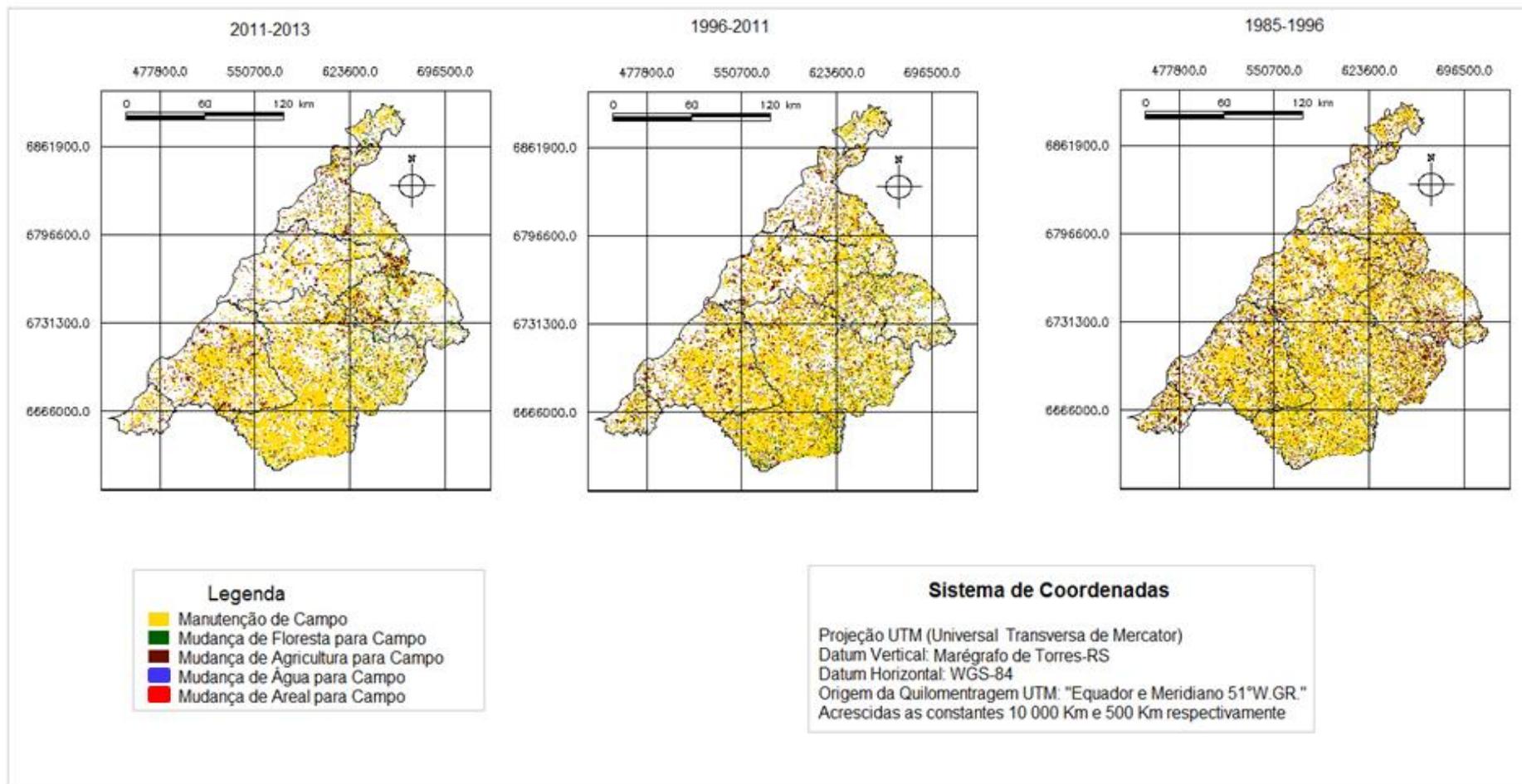


Figura 29 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Campo nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.

A Agricultura da região está bastante associada com a classe Campo como demonstrada na Tabela 16. As classes que mais influenciaram na transição para a Agricultura foram as de Campo com 350.971,83 ha, o que corresponde a 42,66% do total de mudanças e a Floresta com 54.088,29 ha e 6,57% do total. Nessa primeira época a classe totalizou 822.754,26 ha.

Ao analisar o segundo período (1996-2011), observou-se o aumento da continuidade de áreas de agricultura, ou seja, o que era área agrícola em 1996 continuou sendo em 2011, totalizando 451.650,96 ha com 45,73% do total da classe. Mais uma vez, destacando-se para a mudança em agricultura, a classe Campo correspondeu a 45,91% da mudança numa área de 453.397,77 ha e a Floresta com 6,20% o que corresponde com 61.242,75 ha.

Tabela 16 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Agricultura, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013.

Classes de Uso e Cobertura	Mudanças em ha 1985 - 1996		Mudanças em ha 1996 - 2011		Mudanças em ha 2011 - 2013	
		(%)		(%)		(%)
Agricultura (Manutenção)	404.801,46	49,2	451.650,96	45,7	660.614,76	53,8
Água	9.587,79	1,17	16.070,94	1,63	14.931,81	1,22
Campo	350.971,83	42,7	453.397,77	45,9	468.886,05	38,2
Floresta	54.088,29	6,57	61.242,75	6,2	81.546,03	6,64
Areal	3.304,89	0,4	5.300,46	0,54	2.475,99	0,2
Total	822754,26	100	987662,88	100	1228454,64	100

No último período analisado (2011-2013), a área de agricultura que se manteve de um ano para outro obteve 53,78% de todas as mudanças para a classe, ou seja, 660.614,76 ha. A classe que mais influenciou na mudança para agricultura foi mais uma vez a classe Campo com 468.886,05 ha numa porcentagem de 38,17%. Em seguida a classe Floresta com 81.546,03 ha e 6,64% do total.

Comparando a taxa de desmatamento com a de expansão florestal, fica evidente que apesar das taxas de desmatamento entre 6,57% no primeiro período, passando por 6,20% no segundo e ficando em 6,64% no terceiro, houve um aumento das áreas florestais em relação a sua retirada, pois as taxas de aumento sobre áreas agrícolas foram de 22,96%, 16,32% e 13,93% respectivamente. Lippert (2014), encontrou resultados semelhantes ao analisar as transições florestais do Bioma Pampa, constatando que a taxa de expansão foi maior que a taxa de desmatamento entre o período de 2000 a 2012.

Na Figura 31, observa-se a espacialização da manutenção e mudança das classes para Agricultura. Uma das características dessa região é a concentração da agricultura na parte noroeste da área de estudo, que vem sistematicamente, se expandindo para o leste e sudeste, onde irá encontrar a barreira da forte cultura da pecuária.

Nota-se que áreas antes de campo estão se transformando em agricultura. A maior concentração dessas áreas está vinculada a baixa altitude do terreno e onde há maior disponibilidade hídrica principalmente em razão da rizicultura, sendo esses municípios os maiores produtores do estado.

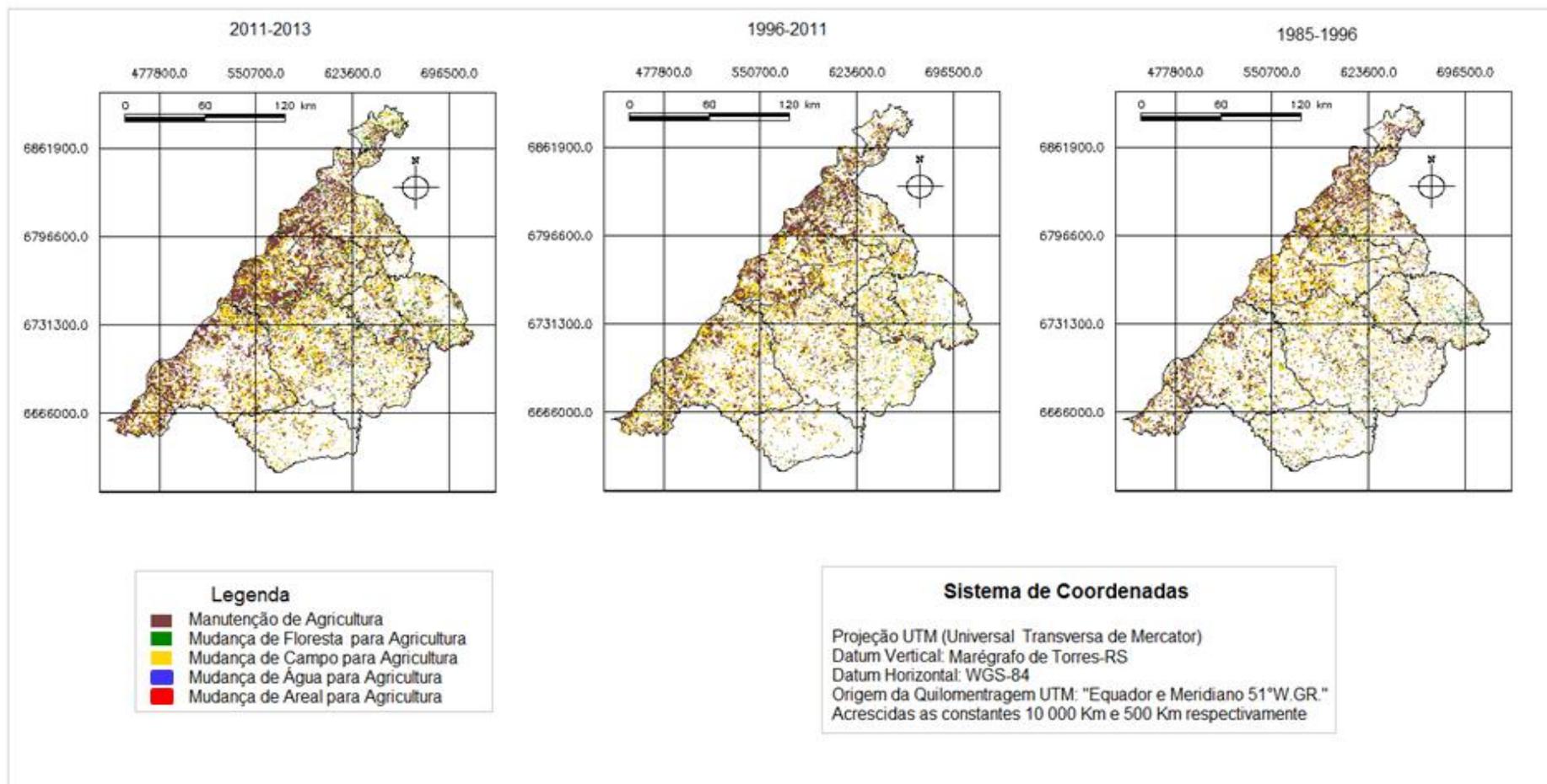


Figura 30 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Agricultura nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.

A última tipologia de cobertura da terra analisado (Tabela 17), a classe Areal, no primeiro período (1985-1996) teve sua expansão influenciada principalmente pelo Campo e Agricultura, correspondendo com 20,87% e 26,67% respectivamente. Os areais que se mantiveram de 1985 a 1996 foi de 7.471,26 ha, um percentual de 42,96% em relação ao total da classe que correspondeu a 17.390,61 ha.

Entre o ano de 1996 a 2011, a classe que mais influenciou na expansão dos areais foi a classe Campo com 24,53%, totalizando 2.805,93 ha, e a Agricultura com 18,49 % e área total de 2.114,82 ha. Nesse período os areais totalizaram 11.437,65 ha, o que demonstra a diminuição por causa da introdução de espécies florestais, campo ou agricultura.

Tabela 17 – Classes de uso que contribuíram para mudanças na classe de Areal, entre os períodos 1985 a 1996, 1996 a 2011 e 2011 a 2013.

Classes de Uso e Cobertura	Mudanças em ha 1985 - 1996		Mudanças em ha 1996 - 2011		Mudanças em ha 2011 - 2013	
		(%)		(%)		(%)
Areal (Manutenção)	7.471,26	43	5.661,45	49,5	6.547,59	57,3
Água	1.230,30	7,07	290,52	2,54	106,2	0,93
Floresta	422,55	2,43	564,93	4,94	661,5	5,79
Agricultura	4.637,61	26,7	2.114,82	18,5	2.716,65	23,8
Campo	3.628,89	20,9	2.805,93	24,5	1.389,78	12,2
Total	17.390,61	100	11.437,65	100	1228454,64	100

No último período analisado entre 2011 e 2013, seguiu-se com o Campo e Agricultura influenciando na expansão para áreas com areais, porém destacando-se que a agricultura foi a classe que mais se transformou, somando 23,78%, o que representa 2.716,65 ha. Esse fato pode ser explicado pela degradação dessas áreas, a saturação dos solos e o completo abandono. A classe Areal nesse período encontrou-se estável em comparação com o período de análise anterior com um

total de 11.421,75 ha e os que se mantiveram entre 2011 a 2013 foram de 6.547,59 ha num total de 57,33%.

Observando os dados da Tabela 17 e a Figura 32 pode-se afirmar que essas áreas são endêmicas da região, estando relacionadas à característica geológica e tipologia de solo. E que as atividades antrópicas não podem ser consideradas culpadas pelo surgimento dessas áreas, visto que a questão natural possui um maior peso para que essas áreas existam. No entanto, reconhece-se que o antropismo contribui tanto para o seu aumento quanto para diminuição dos areais, porém, não sendo o principal causador desse fenômeno. Constata-se que essas áreas se concentram na parte leste da região abrangendo 6 municípios: Alegrete, Maçambará, Manoel Viana, São Borja, São Francisco de Assis e Quaraí.

Constata-se nessas áreas presenças de voçorocas e ravinas, o que são o processo inicial da formação de novos areais e que se agravam principalmente com o pisoteio do gado. Quando essas áreas não são protegidas ou monitoradas, sofrem também consequências naturais como ação dos ventos e da precipitação, fazendo com que ocorra a lixiviação dos materiais areníticos, acarretando a expansão dessas áreas em detrimento dos outros tipos de uso e cobertura da terra.

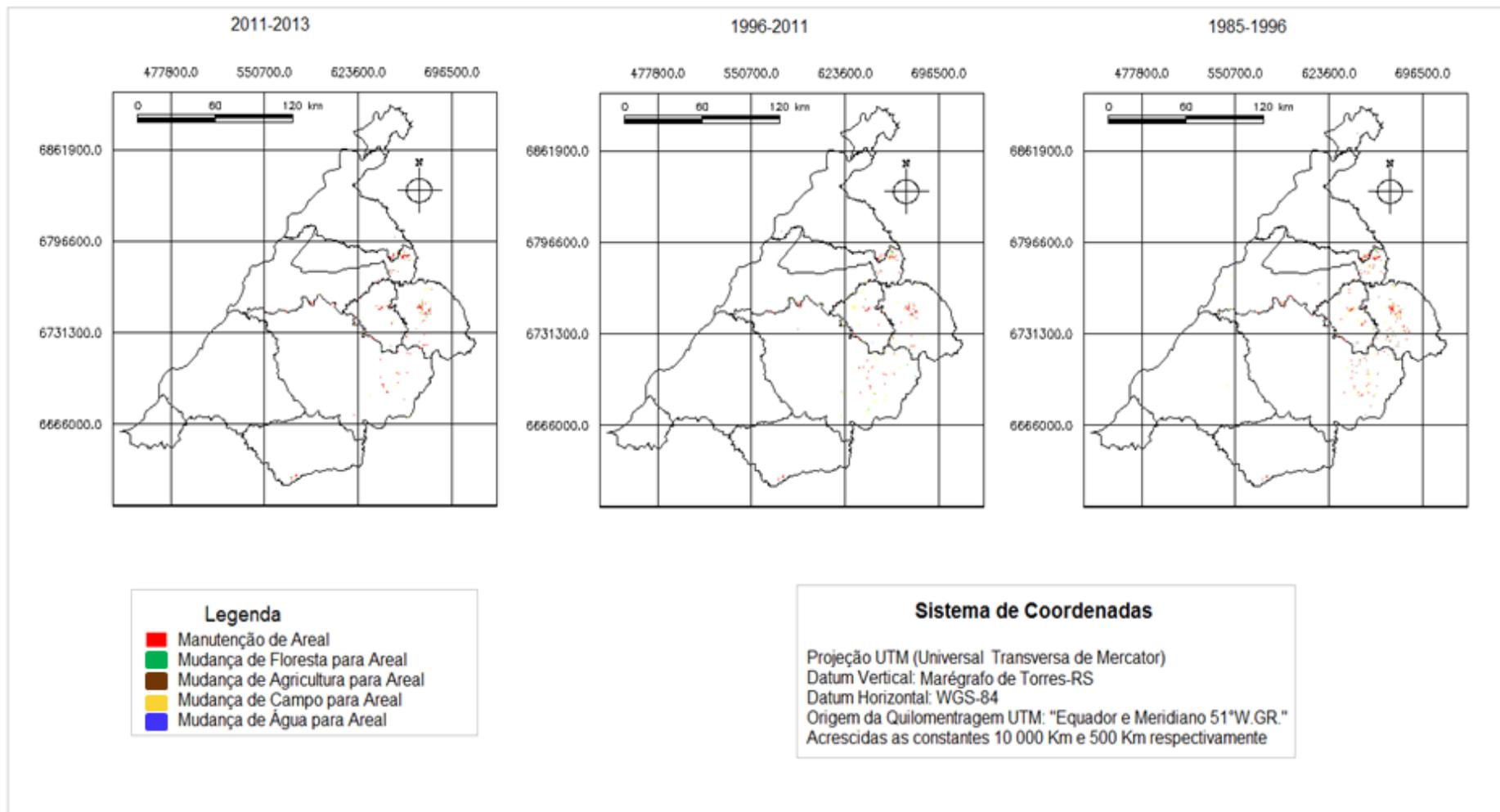


Figura 31 – Espacialização da expansão e manutenção da classe Areal nos períodos de 1985-1996, 1996-2011 e 2011-2013.

#### 4.5 Modelagem Dinâmica da arenização e cobertura florestal

Após as análises da evolução do uso e cobertura da terra e de suas transições, fez-se a projeção de cenários futuros até o ano de 2026 utilizando-se os mapas de uso e cobertura da terra de 1996 e de 2011, no aplicativo Dinamica EGO. Os resultados encontrados na modelagem serviram também para comparar visualmente com o mapa do uso e cobertura da terra para o ano de 2013.

##### 4.5.1 Cálculo das matrizes de transição

Na Tabela 18 observa-se que , a cobertura florestal converteu-se para as demais classes de uso a uma taxa de 3,54% ao ano, sendo a classe Campo a maior responsável pela área reduzida de floresta. Já a porcentagem de transformação para novas florestas ocorreu a uma taxa anual de 2,23%. Em relação a classe Areal, o surgimento dessas novas áreas ao ano foi em torno de 0,05% e a taxa de mudanças de Areal para as demais classes foi de 6,43%.

Tabela 18 – Matriz de transição do tipo múltipla, de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 1996 e 2011, em valores percentuais.

		2011			
Uso da terra		Floresta	Agricultura	Campo	Areal
1996	Floresta	-	1,14	2,39	0,01
	Agricultura	0,87	-	3,91	0,03
	Campo	0,56	3,00	-	0,01
	Areal	0,80	3,95	1,68	-

De acordo com a Tabela 19, pode-se verificar que a taxa de transição de floresta para outras classes ao longo dos 15 anos foi de 39,76%. Esses valores

podem estar relacionados ao ciclo de corte de algumas espécies, ao aumento de áreas de agricultura e pastagem. Por outro lado a expansão das florestas ocorreu a uma taxa de 24,11%, sendo a classe Agricultura a maior responsável pela área de expansão de floresta.

Tabela 19 – Matriz de transição do tipo única de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 1996 e 2011, em valores percentuais.

		2011			
Uso da terra		Floresta	Agricultura	Campo	Areal
1996	Floresta	-	14,57	25,06	0,13
	Agricultura	8,76	-	34,83	0,26
	Campo	6,89	26,15	-	0,16
	Areal	8,46	30,56	21,93	-

Os areais aumentaram a uma taxa de 0,55% ao longo dos 15 anos sendo a classe Agricultura a maior responsável pela área expandida de areal, o que pode ser resultado do solo já exaurido e abandonado se transformando em novas áreas de areia. Porém, a taxa de diminuição dos areais foi de 60,95%, ficando evidente a utilização de novas tecnologias para aproveitamento e recuperação dessas áreas degradadas. Esses resultados obtidos com expansão florestal também foram encontrados por Hendges (2007), utilizando 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; por Ferrari (2008), utilizando a modelagem dinâmica do uso e cobertura da terra da Quarta Colônia, RS; por Benedetti (2010), estudando as mudanças na cobertura florestal das Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul e por Lippert (2014), fazendo modelagem dinâmica do cenário florestal em unidades de paisagem do Bioma Pampa.

Já para os areais, existem diversos autores que construíram conhecimento científico ao longo dos anos, como por exemplo, Rovedder (2007), analisando o potencial do *Lupinus albescens* (tremoços) para recuperação de solos arenizados. Esse autor concluiu que a revegetação com esta espécie, como estratégia de

recuperação de solos arenosos, é viável por seu potencial para produção de massa seca e ciclagem de nutrientes. Além disso, constatou que 93% da areia movimentada pela erosão eólica foram reduzidos a partir do plantio consorciado de *Lupinus albescens* e aveia preta.

Suertegaray (2011), em seu trabalho publicado sobre a erosão nos campos sulinos: Arenização no Sudoeste do Rio Grande do Sul, afirma que, no Rio Grande do Sul, as propostas de recuperação dos areais datam da década de 70 e tiveram início por meio da Secretaria da Agricultura do Estado com o plano-piloto de Alegrete. Este projeto foi desenvolvido no chamado “Deserto de São João” (Alegrete/Rio Grande do Sul). Resumidamente, esse constou do uso de esteiras como quebra-ventos, plantio de uma variedade de espécies arbóreas, arbustivas (frutíferas ou lenhosas), leguminosas e gramíneas. Desse resultou a conclusão de que a espécie que melhor desenvolveu-se sobre os areais foi o eucalipto.

Tais trabalhos evidenciam a preocupação com a recuperação dessas áreas principalmente por meio da silvicultura e instalação de empresas no setor de celulose e papel na região.

#### 4.5.2 Cálculo dos Pesos de Evidência

Nessa etapa foi estabelecido o Peso de Evidência ( $W$ ) em relação as variáveis dinâmicas e estáticas do modelo, utilizando-se faixas de distâncias de acordo com a resolução espacial do pixel que foi alocada em 500 metros. Soares-Filho et al., (2009), define os pesos como positivos ( $W^+$ ), negativos ( $W^-$ ) ou nulos. Essa característica permite inferir sobre qual contribuição de uma classe em uma dada transição. Pesos positivos de evidência favorecem a ocorrência da transição, pesos negativos repelem e pesos nulos são considerados variáveis não explicativas para o modelo (Tabela 20).

Tabela 20 – Variáveis dinâmicas e estáticas que mais influenciaram nas transições de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre os anos de 1996 a 2011.

Transição	Variáveis locais (0 a 500m)	Peso de Evidência (W+)
Floresta→ Agricultura	População rural	0,56829
Floresta→ Campo	População rural	0,508694
Floresta→ Areal	Areal	3,03068
Agricultura→Floresta	Renda per capita	2,01649
Agricultura→Campo	Renda per capita	1,13198
Agricultura→Areal	Areal	3,88167
Campo→Floresta	Areal	0,940403
Campo→Agricultura	Hipsometria	0,836081
Campo→Areal	Areal	3,70176
Areal→Floresta	Hipsometria	2,44932
Areal→Agricultura	Hipsometria	1,32443
Areal→Campo	Renda per capita	0,931078

Analisando as variáveis das transições de uso e ocupação da terra que envolvem a cobertura florestal e os areais (Tabela 20), observou-se que a transição de floresta para a agricultura e campo é influenciada basicamente pela população rural dessas regiões. Acredita-se que devido ao aumento das linhas de crédito, necessidade de abrir fronteiras agrícolas e pecuárias, contribui para que as áreas de florestas fossem suprimidas para dar lugar a pastagens ou agricultura. Já a transição entre floresta e areal é influenciada pelo próprio areal, o que pode ser explicado pelo ciclo de corte de algumas espécies utilizadas nessas áreas degradadas e que proporcionam a redução florestal contribuindo com o aumento do fenômeno.

Sobre a expansão florestal da região, os resultados mostraram que a conversão de áreas de agricultura para floresta foi influenciada pela renda per capita da população. Ou seja, nessas áreas além do valor econômico dos produtos agrícolas, há uma maior preocupação em aumentar a cobertura florestal devido ao aumento do rigor nas leis ambientais, fazendo com que os produtores invistam em áreas de preservação permanente e reserva legal.

Na transição entre campo e floresta, destacou-se a presença dos areais. Áreas de campo próximos aos areais tem a tendência de se transformarem em floresta, para proteger o solo e combater a expansão dos areais. A conversão entre Areal e Floresta foi influenciada pela hipsometria da região, que relaciona-se a altitude do terreno. Portanto, essas áreas que apresentam suscetibilidades à erosão, por consequência da lixiviação e ação dos ventos, vem ao longo do tempo sendo protegidas e recuperadas com florestas.

A transição dos areais para floresta e agricultura foi influenciada pela hipsometria da região conforme já relatado. E na conversão de Areal para campo a variável que mais influenciou a mudança foi a concentração da renda per capita. Essas regiões com concentração da renda per capita são predominantemente caracterizadas por área de pecuária e que, por sua vez, concentram a riqueza da região por se tratar do domínio da classe Campo na Campanha Ocidental.

A expansão dos areais aconteceu vinculada a sua própria existência, por se tratar de áreas endêmicas da região, sendo que esse fenômeno está intrínseco na Campanha Ocidental, por questões geológicas e estabelecimento do arenito Botucatu. Tais áreas de formação quaternárias recentes ainda não tiveram tempo de se estabelecer e, por consequência, possuem na região um solo bastante arenoso e susceptível à erosão.

#### 4.5.3 Correlação dos mapas

Nesse procedimento, utilizando-se o Dinamica EGO, foi observada a eventual existência de dependência entre os mapas de variáveis testadas, partindo dos princípios de Bonham-Carter (1994), utilizando o Índice de Cramer (V) e Incerteza de Informação Conjunta (U). Esses índices operam com valores reais e percentuais, respectivamente, de áreas de sobreposição entre diferentes categorias de dois mapas de variáveis explicativas, visando avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre ambos.

Nessa relação, foram retiradas do modelo variáveis estáticas por possuírem Índice de Cramer (V) e de Incerteza de Informação Conjunta (U) superior a 0,5. As variáveis que apresentaram maiores valores desses índices quando relacionadas

foram população urbana correlacionada com população rural e bovinos correlacionado com ovinos para todas as transições de uso e cobertura da terra (Tabela 21).

Tabela 21 – Variáveis que foram retiradas do modelo por apresentarem índices acima de 0,50.

Variável	Cramer (V)	Incerteza de Informação Conjunta (U)
População Urbana x Rural	0,77	0,62
Bovinos x Ovinos	0,54	0,49

A população urbana e a concentração de ovinos foram as variáveis retiradas do modelo. Essas variáveis foram retiradas por apresentarem alta associação com outras variáveis e por apresentarem situações semelhantes no decorrer dos resultados da correlação. Segundo Lippert (2014), a escolha pela exclusão de uma variável deve ser feita de acordo com os índices calculados, mas também pela análise do modelador em relação a influência do fenômeno para ocorrência da transição.

Dessa forma, fica evidente que o modelador deve possuir a sensibilidade de analisar os dados e, de acordo com o fenômeno estudado, retirar do modelo aquela variável que seria um fator negativo ao modelo.

#### 4.5.4 Simulação do modelo para os mapas de uso e cobertura da terra

Na Tabela 22 estão relacionados os índices de similaridade na função de decaimento constante e decaimento exponencial obtidos a partir do método *fuzzy* na avaliação dos resultados do mapa final simulado.

Tabela 22 – Parâmetros ajustados nos algoritmos *expander* e *patcher* para simulação no período de 1996 a 2011 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul.

Algoritmo	Média (ha)	Variância (ha)	Grau de Isometria
<i>Expander</i>	6,25	6,25	1,8
<i>Patcher</i>	6,25	6,25	1,8

A determinação desses parâmetros foi estabelecido por meio de inúmeros testes para tamanhos de manchas diferentes, os valores foram adotados correspondentes à área do pixel (6,25 ha) para média e variância. O resultado do grau de isometria foi encontrado por meio da observação na formação das manchas das classes, quanto mais elevado o valor, mais compacta serão as manchas criadas e quanto mais próximo de zero mais fragmentadas serão as formações de manchas. Em decorrência dessa característica, encontrou-se o valor ideal de grau de isometria de 1,8 caracterizando um equilíbrio entre compacidade e fragmentação das manchas.

#### 4.5.5 Validação do modelo para simulação de cenários futuros

O método utilizado nessa etapa da modelagem foi adaptado por Hagen (2003), e consiste no índice de similaridade baseado em lógica *fuzzy* que gera dois algoritmos com a função de decaimento constante e decaimento exponencial. Esses resultados são obtidos por meio da diferença entre o mapa real subtraído do mapa inicial e o mapa simulado subtraído do mapa inicial.

Essas diferenças espacializam os erros que incluem as omissões, ou seja, áreas em que houve mudança de 1996 a 2011 e não apareceram na simulação e as comissões, áreas em que não houve mudança real, porém aparecem como mudança na simulação e acertos da simulação.

Ferrari (2008), afirma que 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. Sendo assim, quando é aumentado o tamanho da janela (acima de 11 ou 13 pixels) é comum ocorrer a saturação, e dessa forma, conferindo ineficiência ao mesmo para avaliar o ajuste entre o mapa real e o mapa simulado.

Na Tabela 23 estão relacionados os índices de similaridade na função de decaimento constante e decaimento exponencial obtidos a partir do método *fuzzy* na avaliação dos resultados do mapa final simulados.

Tabela 23 – Índices de similaridade fuzzy obtidos por meio de cálculos das funções de decaimento constante e exponencial para diferentes tamanhos de janelas entre o período de 1996 a 2011.

Índice de similaridade <i>fuzzy</i>		
Janelas (Pixels)	Função de Decaimento	
	Constante	Exponencial
3 x 3	0,620104	0,549186
5 x 5	0,775479	0,620909
7 x 7	0,861922	0,648084
9 x 9	0,904343	0,657237
11 x 11	0,925738	0,660392

Os resultados encontrados na Tabela 23 estão de acordo com os obtidos por outros autores que trabalharam com o Dinamica. Ximenes et al. (2008), validando modelos dinâmicos para simular o desmatamento na Amazônia, encontrou índices entre 0,87 e 0,9 para janelas de 3x3 a 13x13. Já Almeida (2008), obteve resultados entre 0,83 e 0,85 para avaliação por múltiplas resoluções em modelos dinâmicos aplicados à áreas urbanas.

Rossetti et al. (2013), encontrou valores entre 0,57 e 0,71 nas janelas 3x3 e 9x9 avaliando as mudanças no uso em áreas urbanas utilizando a modelagem dinâmica espacial por meio de autômatos celulares. Macedo et al. (2013), fazendo modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra

relacionadas à expansão canavieira encontrou valores de 0,52 para janela de tamanho 11 x 11.

Alguns trabalhos realizados no Rio Grande do Sul utilizando o Dinamica EGO em modelagem de uso da terra também foram comparados com os resultados obtidos nesse trabalho. Ferrari (2008), encontrou índices entre 0,44 e 0,84 ao simular a dinâmica de uso e cobertura da região na Quarta Colônia no Rio Grande do Sul. Benedetti (2010), utilizando a modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das Serras do Sudeste e Campanha Meridional, encontrou valores entre 0,64 e 0,99. Mais recentemente Lippert (2014), aplicando a modelagem dinâmica do cenário florestal em unidades de paisagem do Bioma Pampa, encontrou resultados entre 0,45 e 0,98.

O método implantado pelo Dinamica EGO desconsidera as células que não sofrem alteração de estado, pois com isso, se elimina a possibilidade de superestimar o índice pela grande quantidade de células que não sofrem mudanças de estado no fim do período, tornando um método rigoroso de avaliação. É preciso corroborar que o uso dos índices por múltiplas janelas de resoluções para avaliar a qualidade das simulações de modelos dinâmicos espaciais, pode ser justificado por não ser possível reproduzir informações com total exatidão espacial de situações passadas. Isso ocorre pois os processos de alterações do uso e cobertura da terra não são padronizadas e sim sofrem aleatoriedade em suas transições.

#### 4.5.6 Análise das simulações de cenários futuros

De acordo com Benedetti (2010), a simulação de mapas por meio 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.

Visualizando a simulação realizada no aplicativo (Figura 33), fez-se a comparação visual entre o mapa classificado de 2013 e o mapa simulado desse mesmo ano para observar a qualidade do modelo. O mapa simulado possui semelhança com o mapa real visualmente, porém estudos futuros poderão

corroborar a qualidade da precisão dos mapas simulados, em relação aos mapas reais obtidos por meio de técnicas de processamento digital de imagens.

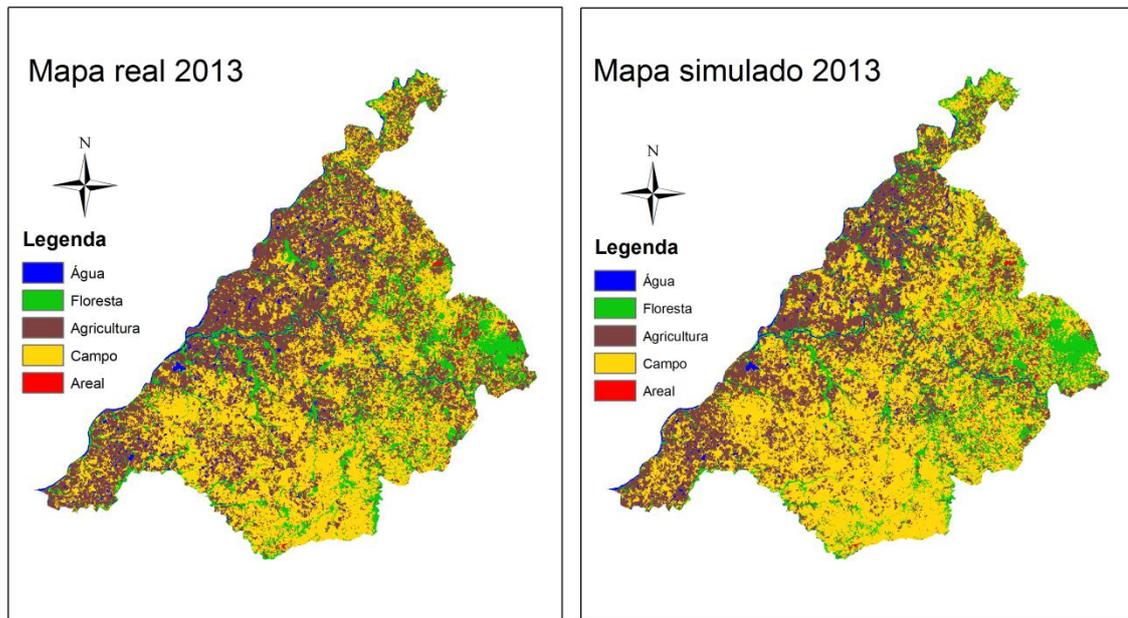


Figura 32 – Comparação de cenários entre um mapa simulado e um mapa classificado para o ano de 2013 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul.

Observando os dados da simulação referente ao ano de 2026 (Tabela 24), as áreas de florestas estarão crescendo, porém, em um ritmo menor. A expansão das áreas florestais é uma tendência de boa parte dos municípios do estado. Esse resultado é justificado pelo maior rigor na legislação ao corte de vegetação em áreas de preservação permanente e de reserva legal, permitindo o crescimento dessas áreas, podendo ser atribuído também a introdução de gêneros como o *Eucalyptus*.

As áreas de campo continuarão predominantes na região ocupando quase metade da área total, entretanto, foi observado queda na sua área devido principalmente a conversão de suas áreas pela agricultura. Já a agricultura continuará se expandindo, principalmente pela conversão de campo para novas áreas agrícolas, fato esse encontrando nos resultados mostrando que a conversão dessas duas classes são inversamente proporcionais, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui.

Os areais, ao longo desses 15 anos de simulação, reduzirão sua área total, o que foi encontrado nos resultados da classificação dos mapas. A retração dos areais pode ser explicada pela utilização de espécies florestais na proteção dessas áreas, aumentando a cobertura do solo, impedindo a lixiviação dos materiais areníticos para outras áreas, reduzindo assim, sua expansão.

Tabela 24 – Quantificação do uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental-RS, em hectares, e suas respectivas porcentagens previstas para o ano de 2026.

Classes de uso e cobertura da terra	Área (ha)	Porcentagem sobre a área total (%)
Floresta	462.725,00	15,04
Agricultura	1.027.387,00	33,39
Campo	1.496.231,25	48,63
Areal	10.043,75	0,33

Esses resultados foram encontrados por diversos autores com trabalhos no Rio Grande do Sul sobre a expansão florestal. Hendges et al. (2012), analisando a dinâmica de floresta nativa no Rio Grande do Sul para 2020 concluiu que essas áreas vem aumentando proporcionalmente conforme o passar dos anos. Benedetti (2010), encontrou resultados que sustentam a hipótese desse trabalho ao analisar as mudanças de cobertura florestal na Campanha Meridional do Rio Grande do Sul, quando afirma que as áreas de campo e florestas se expandirão em 2016. E, recentemente, Lippert (2014), analisando o cenário florestal em unidades de paisagem do Bioma Pampa, encontrou resultados semelhantes afirmando que áreas de campo são predominantes na região e áreas de florestas se expandirão até o ano de 2024, porém, num ritmo mais lento.

Em relação aos areais, Trindade et al. (2008), analisando a vegetação campestre de areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul sob pastejo e com exclusão de pastejo, concluíram que a exclusão do pastejo determina maior cobertura vegetal e diversidade, em comparação a comunidades pastejadas, e que a vegetação natural sob pastejo é mais suscetível ao processo de arenização.

Andrades Filho et al. (2008), identificando deformações neotectônicas por meio de imagens SRTM, e sua relação com a gênese dos areais no Sudoeste do

Rio Grande do Sul, identificou que existem possíveis pontos de anomalias neotectônicas próximos às áreas de focos de arenização. Isso indica uma relação entre as anomalias e os areais e que, portanto, há possibilidade de que soerguimentos e/ou rebaixamentos por falha, a exposição do arenito e a consequente busca do nível de base de erosão existente antes do soerguimento, desencadeiam o processo de arenização. As ravinas e voçorocas são os elementos genéticos da formação dos areais e a busca do nível de base ocorre justamente pela intensificação destes processos erosivos.

Segundo Suertegaray (2008), estudando a influência morfoestrutural na gênese dos processos de arenização no Rio Grande do Sul, analisou que diante da relação entre os lineamentos estruturais com a disposição da drenagem, orientação das vertentes e a ocorrência dos areais, exista a possibilidade de que essas variáveis estejam fortemente associadas a estrutura do solo nessa região.

As matrizes de transições referentes ao período de 2011 a 2026 são representadas nas Tabelas 25 e 26, onde é relacionada as transições de ano a ano (matriz de transição do tipo múltipla) e de todo o período (matriz de transição do tipo única), respectivamente, entre as classes de uso e cobertura da terra.

Tabela 25 – Matriz de transição do tipo múltipla de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 2011 e 2026, em valores percentuais.

		2026			
Uso da terra		Floresta	Agricultura	Campo	Areal
2011	Floresta	-	0,67	2,12	0,008
	Agricultura	0,89	-	2,10	0,014
	Campo	0,32	1,95	-	0,011
	Areal	0,71	2,39	1,02	-

Tabela 26 – Matriz de transição do tipo única de uso e cobertura da terra na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul entre 2011 e 2026, em valores percentuais.

		2026			
Uso da terra		Floresta	Agricultura	Campo	Areal
2011	Floresta	-	9,92	23,66	0,10
	Agricultura	9,59	-	23,47	0,15
	Campo	4,76	20,65	-	0,13
	Areal	8,38	23,79	14,69	-

De acordo com os resultados simulados (Tabelas 25 e 26), a tendência é que a classe Campo continue diminuindo a predominância na área de estudo se transformando em Agricultura. A simulação também revela que as áreas de florestas tenderão ao crescimento expandindo-se em áreas de campo. Quanto aos areais, o aparecimento de áreas novas é menor se comparado com as áreas que deixarão de ser areal, o que retrata que esse tipo de fenômeno está apresentando retração em sua área na região de estudo.

Na Figura 34 nota-se que há maior predominância da classe Campo onde são encontrados os maiores municípios produtores bovinos da região. Essa região é caracterizada por áreas de altitudes mais elevadas, o que pode dificultar a introdução de novas áreas agrícolas. Já a agricultura está basicamente concentrada na parte oeste e norte onde há uma maior disponibilidade de água, altitudes e declividades mais baixas favorecendo o cultivo agrícola.

As florestas encontram-se concentradas na parte leste, onde existem mais áreas preservadas, por se tratar de uma região com maior declividade e altitude dificultando a entrada de áreas agrícolas e nas bordas da rede de drenagem, onde há o rigor da lei de preservação caracterizando a proteção dessas áreas. Por fim, os areais encontram-se concentrados em pequenas porções ao redor da hidrografia do terreno, em áreas de relevo acidentado e de característica geológica do arenito Botucatu.

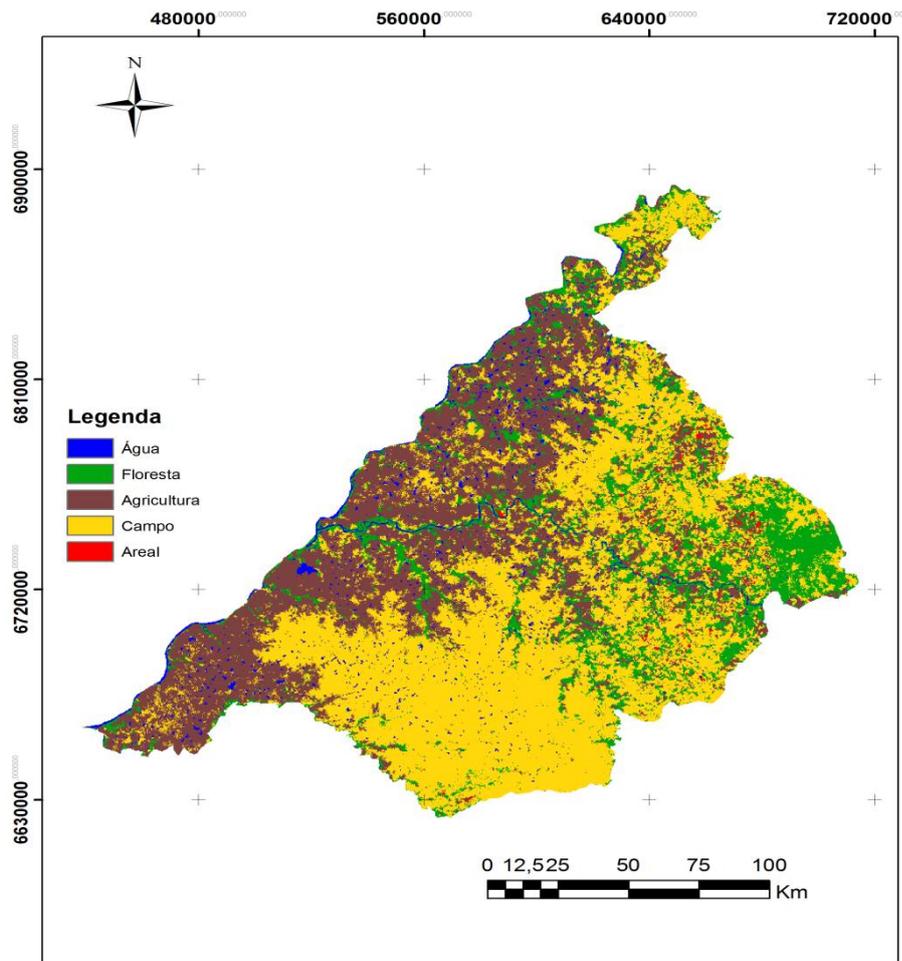


Figura 33 – Resultado da simulação para o ano de 2026 na Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul.



## **5 CONCLUSÕES**

### **5.1 Mapeamento, evolução e transições da cobertura florestal e areal**

Partindo dos resultados obtidos neste estudo, foi possível identificar e quantificar de forma adequada as tipologias de uso e cobertura da terra na microrregião da Campanha Ocidental do Rio Grande do Sul utilizando as imagens dos satélites LANDSAT 5 sensor TM e LANDSAT 8 sensor OLI.

A cobertura florestal e agricultura expandiram-se em 3,64% e 9% respectivamente e as áreas de campo, areais e lâminas d'água retraíram-se em 12,30%, 0,18% e 0,16% respectivamente, no intervalo entre 1985 a 2013 em relação a área total de estudo.

Na avaliação da relação existente entre as classes temáticas e as mudanças no processo de arenização e na cobertura florestal, entre a expansão da cobertura florestal da região da Campanha Ocidental, o campo foi a área que mais se transformou em floresta, favorecendo a expansão da mesma. A retração da floresta foi influenciada principalmente pela conversão dessas áreas em agricultura. Em relação aos Areais, sua expansão deveu-se principalmente a formação de areais em áreas agrícolas. A retração dos areais foi caracterizada pelo avanço da agricultura e pela expansão da floresta, destacando-se o incremento de reflorestamento na diminuição de áreas arenizadas.

### **5.2 Modelagem dinâmica**

Os modelos criados demonstraram ser uma ferramenta eficiente no monitoramento dos processos de transições dos areais e da cobertura florestal, incorporando variáveis ditas importantes na Campanha Ocidental. As variáveis que tiveram fatores determinantes para a expansão da cobertura florestal foram a distância ao areal, renda per capita e a hipsometria e para sua retração a densidade

da população rural e a distância ao areal. Em se tratando dos areais, os fatores determinantes a sua expansão foi a própria presença dos areais. Já as variáveis que mais reduzem esse tipo de fenômeno foram a hipsometria da área e a renda per capita.

Os resultados previstos para 2026 indicam que a cobertura florestal irá se expandir de 14,22% em 2011 para 15,03% no ano de 2026 da área total da Campanha Ocidental, demonstrando que o aumento da cobertura florestal encontra-se em processo de estabilização, concentrando-se suas áreas na parte leste, altitudes elevadas e nas bordas da rede de drenagem. Nos areais, a projeção de sua área sofrerá retração de 0,37% em 2011 para 0,33% da área total da região em 2026, e sua concentração estará presente na parte leste, em altitudes elevadas e em torno da drenagem do rio Ibicui. Esses resultados só poderão ser confirmados caso as condições das variáveis estudadas sejam mantidas durante o período.

A simulação de prognoses de cenários futuros vem a contribuir para auxiliar as políticas públicas para o enfoque da preservação da cobertura florestal e no entendimento do processo de arenização da região, demonstrando quais são os fatores determinantes que possibilitam a expansão ou retração dessas áreas na Campanha Ocidental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRRADO, 3., 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo. Ed. Edgard Blücher LTDA.1971. p. 1-14.

AB'SABER, A. N. A revanche dos ventos. Destruição dos solos areníticos e formação de areais na Campanha Gaúcha. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 11, p. 7-31, 1995.

AB'SABER, A. N. **Participação de Superfícies Aplainadas nas Paisagens do Rio Grande do Sul**: Geomorfologia. Instituto de Geografia (Universidade de São Paulo), 1969. cap.11, p. 1-17.

ALMEIDA, C. et al. Using neural networks and cellular automata for modeling intra-urban land use dynamics. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 9, p. 943-963, 2008.

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

ALONSO, J. A. F. Panorama da economia do Rio Grande do Sul em 1996. **Revista Indicadores Econômicos Fee**, Porto Alegre, v. 25, n. 1, p. 137-154, 1997.

ANDRADES FILHO, C. O.; GUASSELLI, L. A.; SUERTEGARAY, D. M. A. Identificação de deformações neotectônicas, através de imagem SRTM, e sua relação com a gênese dos areais – Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Geográfica Acadêmica**. Raraima, v. 2 n. 2 p. 96-110. 2008.

ARAÚJO, A. C. Cyperaceae nos Campos sul-brasileiros. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 54., 2003, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Botânica do Brasil, 2003. p. 127-130.

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

BARBOSA, C. C. F.; CORDEIRO, J. P. C. **Manual de referência – LEGAL**. São José dos Campos: INPE, 2001. 21 p.

BENCKE, G. A. Diversidade e conservação da fauna dos campos do sul do Brasil. In: PILLAR, V. P.; MÜLLER, S. C.; CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. (eds). **Campos Sulinos – conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. cap.7, p. 101 -121.

BENCKE, G. A. et al. **Livro vermelho da fauna ameaçada de extinção no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Edipucrs, 2003. p. 189-479.

BENEDETTI, A C. P. et al. Uso do produto MOD13Q1 do sensor Modis para análise temporal e mapeamento das florestas nas Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 459-467, 2013.

BENEDETTI, A. C. P. **Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das Serras do Sudeste e Campanha Meridional do Rio Grande do Sul**. 2010, 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2010.

BOLDRINI, I. I. Biodiversidade, conservação e uso sustentável da Flora do Brasil. In **Campos Sulinos: caracterização e biodiversidade**. (eds. Araújo EdL, Noura AdN, Sampaio EVdSB, Gestinari LMdS & Carneiro JdMT) Recife, 2002. p. 95-97.

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

BORGES, R. O.; SILVA, R. A. A.; CASTRO, S. S. Utilização da classificação por distância euclidiana no mapeamento dos focos de arenização no setor sul da alta bacia do Rio Araguaia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3777-3784.

BURROUGH, P. A. **Dynamic Modelling and Geocomputation**. In: LONGLEY, P.; BROOKS, S.; MCDONNELL, R.; MACMILLAN, B.(ed.): **Geocomputation: A Primer**. John Wiley, New York, 1998.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos, SP: INPE, 2006.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas: Aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: Embrapa. 1998. cap. 1, p. 3-11.

CÂMARA, G.; QUEIROZ, G. R. Arquitetura de sistema de informação geográfica. In: CÂMARA, G. MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2004.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos, SP: INPE, 2004.

CENTENO, J. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curitiba: Ed. UFPR, 2003. 210 p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188 p.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960.

CONCEIÇÃO O. A. C. et al. **Três décadas de economia gaúcha: o movimento da produção**. Porto Alegre: FEE, 2010. Disponível em: <<http://www.fee.rs.gov.br/3-decadas/movimento-da-producao.php>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

CONGALTON, R. G.; BIGING, G. S. A pilot study evaluating ground reference data collection efforts for use in forest inventory. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, n. 12, 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.

CONSERVA, P. **Projeto conservação da biodiversidade como fator de contribuição ao desenvolvimento do estado do Rio Grande do Sul**. Diagnóstico das áreas prioritárias. Secretaria do Estado do Rio Grande do Sul. 2005. 90 p.

CORDEIRO, C. A.; SOARES, L. C. A Erosão nos solos arenosos da região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 39, p. 32-50. 1975.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170 p.

DLUGOSZ, F. L. et al. Índice para avaliação de segmentação de imagens. **Revista Floresta**, v. 39, n. 1, p. 131-143. 2008.

DUARTE, S. M. A.; BARBOSA, M. P. Estudo dos Recursos Naturais e as Potencialidades no Semi Árido, Estado da Paraíba. **Engenharia Ambiental: Pesquisa tecnológica**, v. 6, n. 3, p. 168-189, 2009.

EASTMAN, J. R. **Decision support: decision strategy analysis**. Idrisi 32 release 2: Guide to GIS and image processing. Worcester: Clark Labs, Clark University, 2001. 22 p.

ELESBÃO, L. E. G. **Performance do *Pinus elliotti* Engelm. e *Pinus taeda* L. em áreas arenizadas e degradadas no oeste do Rio Grande do Sul**. 2011. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistemas Orbitais de **Monitoramento e Gestão Territorial: LANDSAT – Land Remote Sensing Satellite**. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/landsat.htm>> Acesso em: 12 dez. 2012.

FERRARI, R. **Modelagem de Uso e Cobertura da terra da Quarta Colônia, RS**. 2008, 127 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2008.

FURLAN, M. C. **Modelagem dinâmica de uso e cobertura da microbacia do Arroio Grande – RS**. 2012, 126 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2012.

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.

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, 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2007.

HENDGES, E. R.; PEREIRA, R. S.; ANDRES, J. Dinâmica das áreas de floresta nativa no Rio Grande do Sul no período de 1988 a 2020. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 5, p. 828-833, 2012.

HOLZ, M. **Do mar ao deserto**: a evolução do Rio Grande do Sul no tempo geológico. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 1999. 142 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Bioma do Brasil**. 2006. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home>>. Acesso em: 05 fev. 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades do Brasil**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 15 out. 2012.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Divisão de Geração de Imagens**: Imagens LANDSAT TM e ETM. Disponível em: <[http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/ATUS\\_LandSat.php](http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/ATUS_LandSat.php)>. Acesso em: 10 dez. 2012.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Manual do Usuário SPRING**: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. Disponível em: <[HTTP://www.dpi.inpe.br/spring/usuarios/indice](http://www.dpi.inpe.br/spring/usuarios/indice)>. Acesso em: 19 maio de 2012.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 672 p.

KÄMPF, N. et al. **Metodologia para classificação de solos quanto à resistência a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos**. Fepam em Revista, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 11-17, 2008.

KLECKA, W. R. **Discriminant Analysis**. Beverly Hills, California: SAGE Publications, 1980. 71 p.

KLEINPAUL, J. J. **Análise multitemporal da cobertura florestal da Microbacia do Arroio grande, Santa Maria, RS**. 2005, 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2005.

LAMBIN, E. F. **Modeling deforestation processes** – a reviewn; Luxembourg: European Comission. Treesseries B: Research Report. 1994.

LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. *Biometrics*, Washington, v. 33, n. 3, p. 159-179, 1977.

LIPPERT, D. B. **Modelagem dinâmica do cenário florestal em unidades de paisagem do Bioma Pampa**. 2014, 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2014.

LONGHI-WAGNER, H. M. Diversidade florística dos Campos sul- brasileiros: Poaceae. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 54., 2003, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Botânica do Brasil, 2003. p. 117-120.

MACEDO, R. C. et al. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionadas à expansão canavieira. **Boletim de Ciências Geodésicas** [online], v. 19, n. 2 , p. 313-337, 2013.

MARCHIORI, J. N. C. Vegetação e areais no sudoeste Rio-Grandense. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 11, p. 81-92, 1995.

MATZENBACHER, N. I. Diversidade florística dos Campos sul-brasileiros: Asteraceae. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 54., 2003, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Botânica do Brasil Belém, 2003. p. 124-127.

MEDEIROS, E.; ROBAINA, L. E.; CABRAL, I. L. L. C. Degradação ambiental na região sudoeste do Rio Grande do Sul. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 11, p. 53-64, 1995.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. Brasília, 2005. 425 p.

MOITA NETO, J. Estatística Multivariada: uma visão didática-metodológica. **Crítica Revista de filosofia e ensino**. Disponível em: <[www.criticanarede.com/cien\\_estatistica.html](http://www.criticanarede.com/cien_estatistica.html)>. Acesso em: 03 out. 2010.

MÖLLER, D. O. et al. **Diagnóstico sobre a presença de areais na região sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SUDESUL, 1975.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de aplicação**. 4. ed. São José dos Campos, São Paulo. 2011. 422 p.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46 p.

MÜLLER FILHO, I. L. **Notas para o estudo da geomorfologia do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1970. p. 1-37.

*NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)*. 2012. Disponível em: <<http://www.nasa.gov>>. Acesso em: 16 jul. de 2012.

NIMER, E. Clima. In: **Geografia do Brasil**. Região Sul (Ed. IBGE). Rio de Janeiro: IBGE, 1977. p. 35-79.

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 388 p.

OLIVEIRA, K. A. **Classificação de imagens LANDSAT 5 para mapeamento do Cacaueiro Nativo (*Theobroma caçãõ L.*), do Rio Purus – Amazonas. 2010**. 2010, 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Biológicas e da Natureza, Universidade Federal do Acre, AC, 2010.

PAULA, P. M.; ROBAINA, L. E. S. Mapeamento de unidades geológicas-geomorfológicas da bacia do arroio Lajeado Grande – RS. **Geociências**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 175-184, 2003.

PEDROSA, B. M. **Ambiente Computacional para Modelagem Dinâmica Espacial**. 2004, 111 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP. 2004.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Aspectos conceituais da modelagem dinâmica espacial. Workshop dos Cursos de Computação Aplicada do INPE - Worcap, 1., 2001, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 106-108.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. In: FUKS, S. D.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. São José dos Campos: INPE, 2002. p. 39.

PEREIRA, R. S. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. Santa Maria, RS, 1997. 72 p.

PERROTA, M. M. **Potencial aurífero de uma região no Vale do Ribeira, São Paulo, estimado por modelagem de dados geológicos, geoquímicos, geofísicos e de sensores remotos num sistema de informações geográficas.** 1998, 149 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, SP. 1998.

PINTON, L. G.; CUNHA, C. M. L. Avaliação da dinâmica dos processos erosivos lineares e sua relação com a evolução do uso da terra. **Geociências**, São Paulo, UNESP, v. 27, n. 3, p. 329-343, 2008.

RIBASKI, J. et al. Sistemas silvipastoris: Estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. Embrapa (**Comunicado Técnico, 150**), Colombo, Pr, 2005.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar.** Juiz de Fora. MG: ed. do autor, 2000. 220 p.

RODRIGUES, T. R. I.; FILHO, A. P.; ARAÚJO, G. K. D. Monitoramento da dinâmica do uso e ocupação das terras no baixo curso do rio São José dos Dourados, SP – Área de influência dos reservatórios hidrelétricos de Ilha Solteira e Três Irmãos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 6932-6938.

ROSSETTI, L. A. F. G.; PINTO, S. A. F.; ALMEIDA, C. M. Cellular Automata-Based Spatial Dynamic Modeling for Analyzing Urban Land Use Change. **Urban Remote Sensing Event (JURSE)**, Joint, v. 1, n. 4, p. 21-23, 2013.

ROVEDDER, A. P. M. **Potencial do *Lupinus albescens* Hook. & Arn. para recuperação de solos arenizados do Bioma Pampa.** 2007, 145 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ROVEDDER, A. P. M. **Revegetação com culturas de cobertura e espécies florestais para a contenção do processo de arenização em solos areníticos no sudoeste do Rio Grande do Sul.** 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

SANTOS, M. A. **Construção de cenários em ambiente SIG para avaliar mudanças de uso das terras induzidas por usinas hidrelétricas na região agrícola de Andradina. Campinas, SP.** 2003, 140 f. (Dissertação em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. UNICAMP. 2003.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento Remoto e Suas Aplicações para Recursos Naturais Coordenadoria de Ensino**. São José dos Campos/SP: Documentação e Programa Especiais INPE, 2000. p. 31-45.

SEMA. Secretaria do Meio Ambiente. Cobertura florestal. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/cobflinve2.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO (CPRM). Geobank. 2012 Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

SILVA, A. N. R. da. et al. **SIG: uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental urbana, avaliação multicritério, redes neurais artificiais**. Ed. Dos Autores, São Carlos, SP, 2004. 228 p.

SILVA, D. A. **Sistemas sensores orbitais**. São José dos Campos: INPE-CTA, 1995. 69 p.

SILVA, E. A. **Mapeamento do uso e cobertura vegetal do Município de Floresta-PE**. 2011, 56 f. (Dissertação em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2011.

SISTEMA DE PROCESSAMENTO DE INFORMAÇÃO GEOREFERENCIADAS (SPRING). Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J. Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

SOARES FILHO, B. S. et al. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais** (no prelo). ALBERNAZ, A. L.; SILVA, J. M. C.; VALERIANO, D. (Ed.). Belém. Editora Museu Paraense Emílio Goeldi. 2004.

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

SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinâmica EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brazil. 2009.

SOBRINHO, V. J. **Metodologia para identificação de processos de desertificação**: Manual de indicadores. Recife, SUDENE - DDL, PE, 1978.

SOUTO, J. J. P. **Deserto, uma ameaça? Estudo dos núcleos de desertificação na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: DRNR, Diretoria Geral, Secretaria de Agricultura. 172 p. 1984.

SUERTEGARAY, D. M. A. [Entrevista disponibilizada em 25 de junho de 2012, ao Globo Repórter]. 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/globo-reporter/noticia/2012/06/globo-reporter-volta-no-tempo-e-encontra-um-deserto-no-sul-do-brasil.html>>. Acesso em: 29 de dezembro de 2012.

SUERTEGARAY, D. M. A. **A trajetória da natureza**: Um estudo geomorfológico sobre os areais de Quaraí/RS. 1987, 243 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, Departamento de Geografia, São Paulo. 1987.

SUERTEGARAY, D. M. A. O Rio Grande do Sul descobre seus desertos. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 11, p. 33-52, 1995.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; ANDRADES FILHO, C. O. Influencia morfoestructural en la génesis de los procesos de arenización en Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista de Geografía Norte Grande**, v. 39, p. 59-72. 2008.

SUERTEGARAY, D. M. A.; GUASSELLI, L. A.; VERDUM, R. (Org.) **Atlas da Arenização Sudoeste do Rio Grande do Sul**. 1.ed. Porto Alegre:Secretaria da Coordenação e Planejamento e Secretaria da Ciência e Tecnologia Governo do Estado do RS, 2001. 84 p.

SUERTEGARAY, D. M. **Deserto Grande do Sul**: controvérsia. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/UFRGS, 1998. 130 p.

TORRES, D. R. **Análise multitemporal do uso da terra e cobertura florestal com dados dos satélites LANDSAT e ALOS**. 2011, 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2011.

TRINDADE, J. P. P. **Processos de degradação e regeneração da vegetação campestre de areais do sudoeste do Rio Grande do Sul.** 2003, 125 f. Tese (Doutorado em agronomia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

TRINDADE, J. P. P.; QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. P. Vegetação campestre de areais do Sudoeste do Rio Grande do Sul sob pastejo e com exclusão do pastejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 6, p. 771-779, 2008

VIEIRA, C. A. O. **Accuracy of remotaly sensing classification of agricultural crops:** a comparative study. 2000, 327 f. Tese (Doutorado em filosofia) - University of Nottingham, 2000.

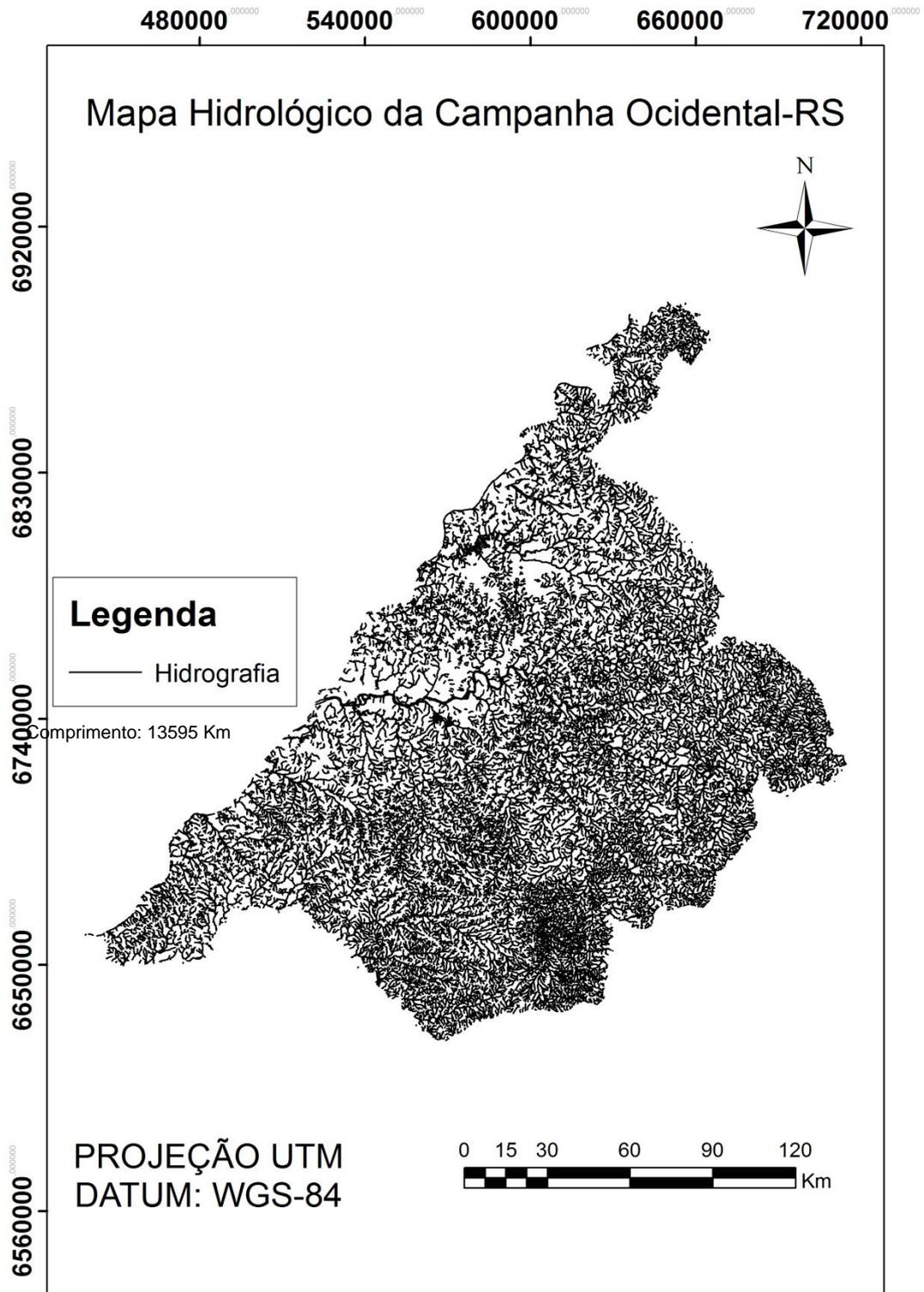
XIMENES, A. C. et al. Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 3, p. 370-391, 2008.



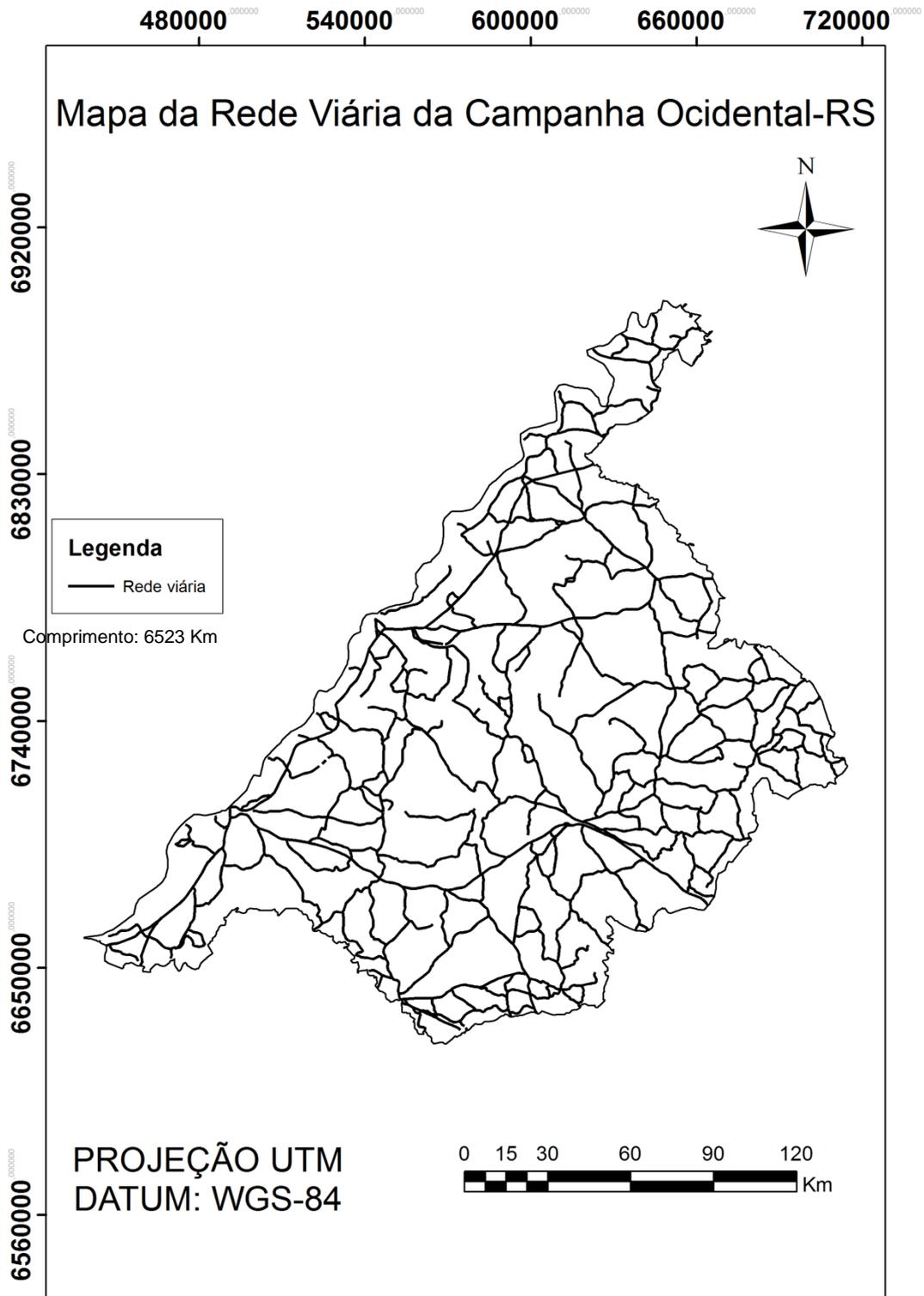
## **APÊNDICES**



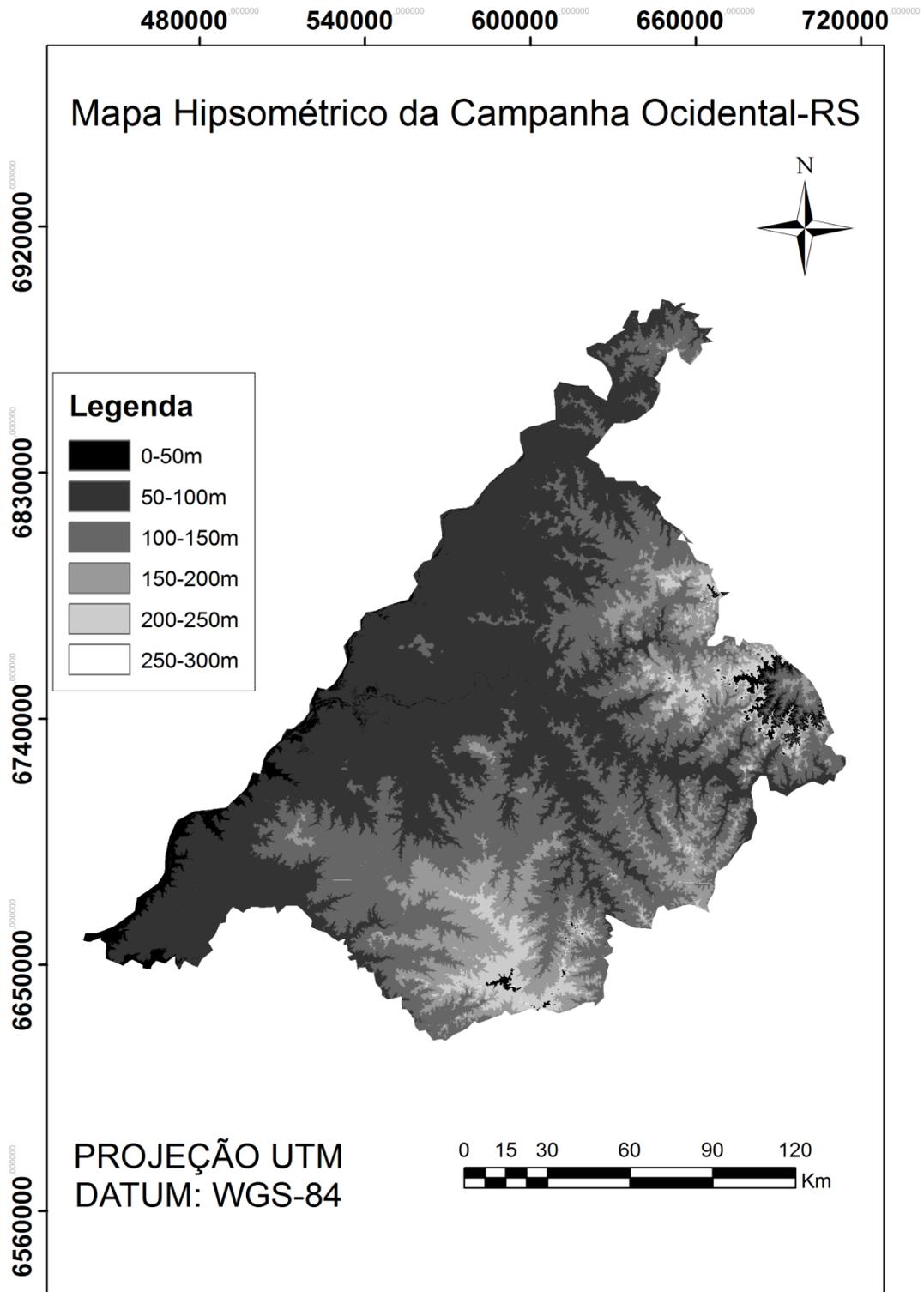
APÊNDICE A – Mapa Hidrológico da microrregião Campanha Ocidental – RS.



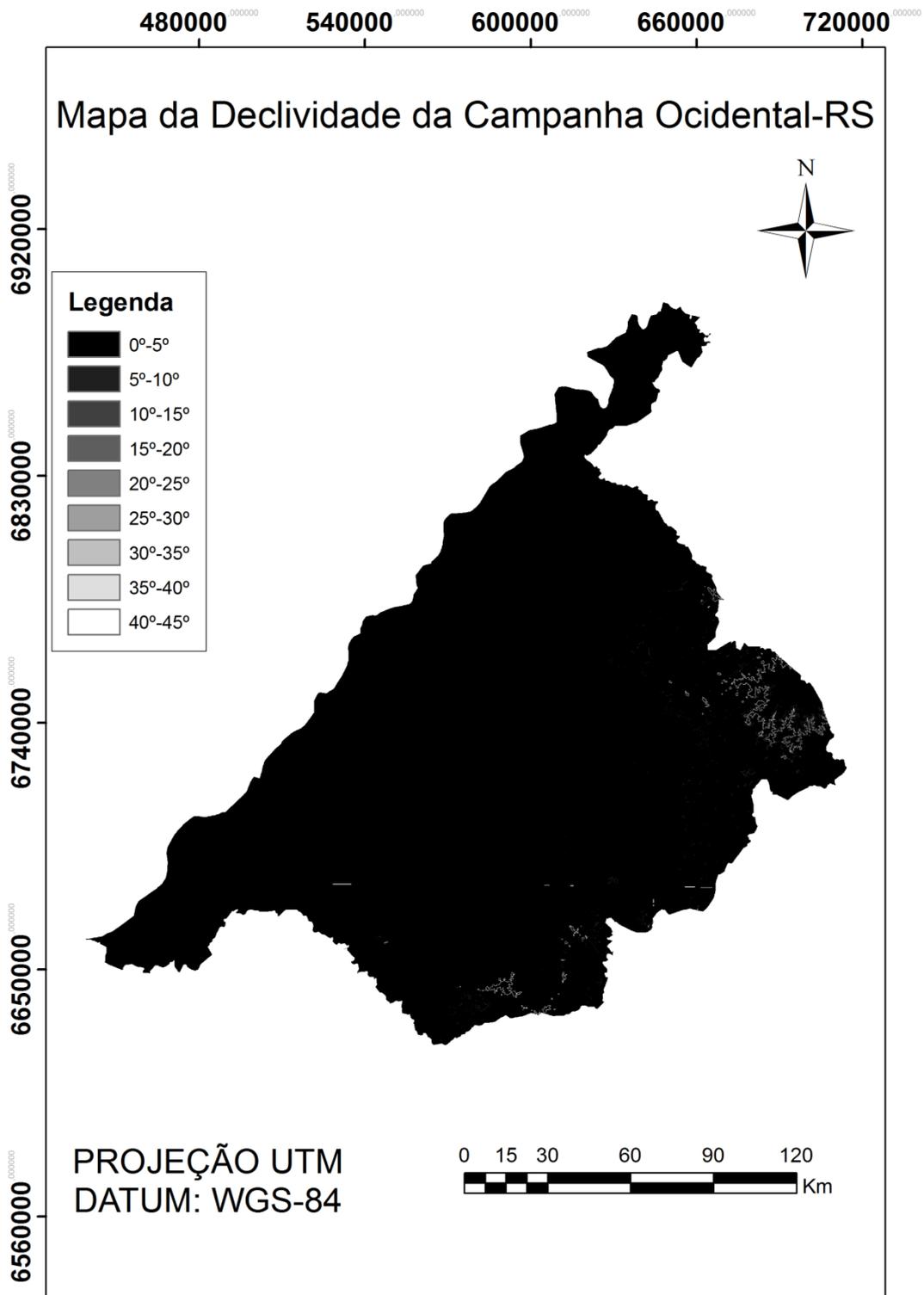
APÊNDICE B – Mapa da Rede Viária da microrregião Campanha Ocidental – RS.



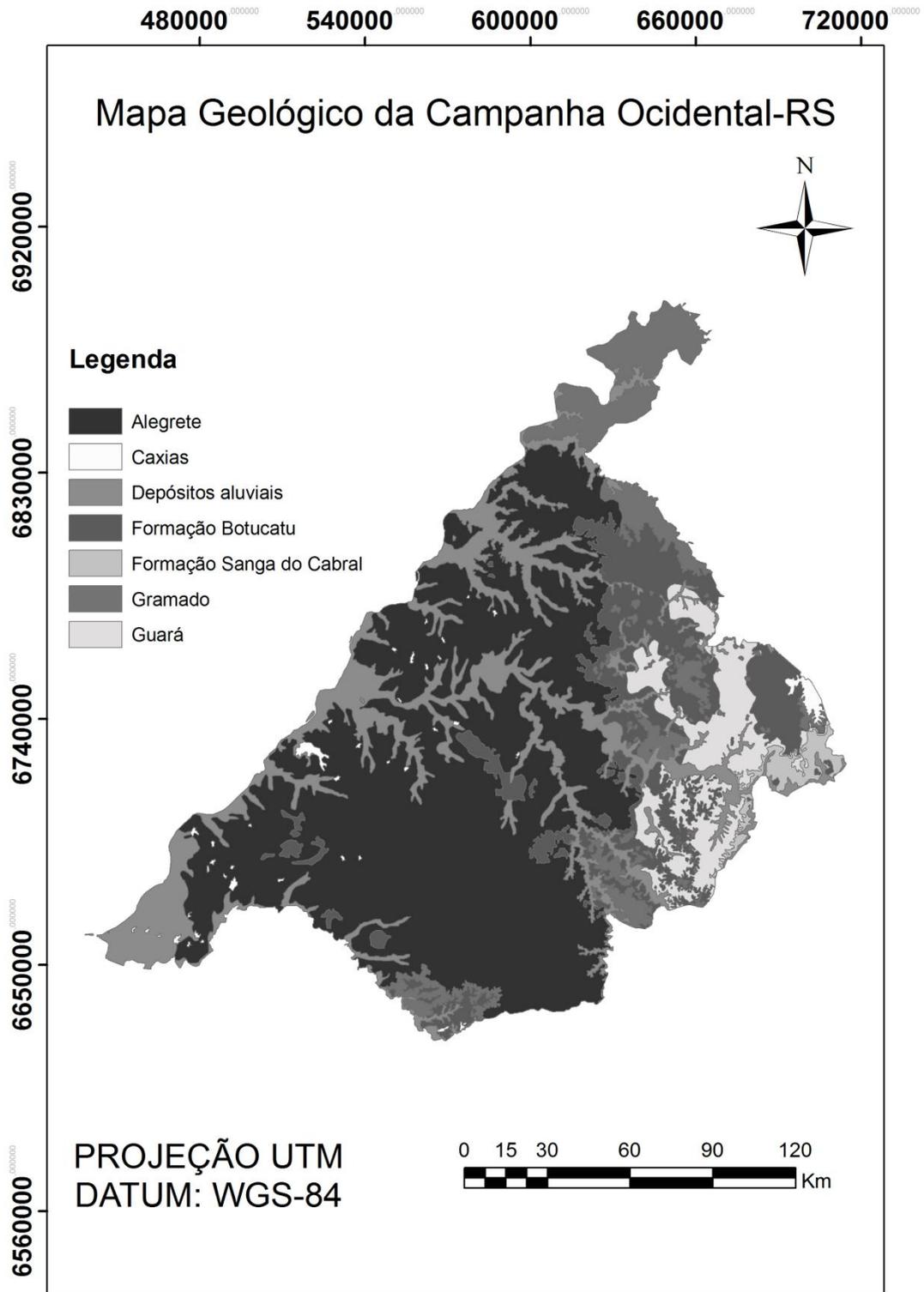
APÊNDICE C – Mapa Hipsométrico da microrregião Campanha Ocidental – RS.



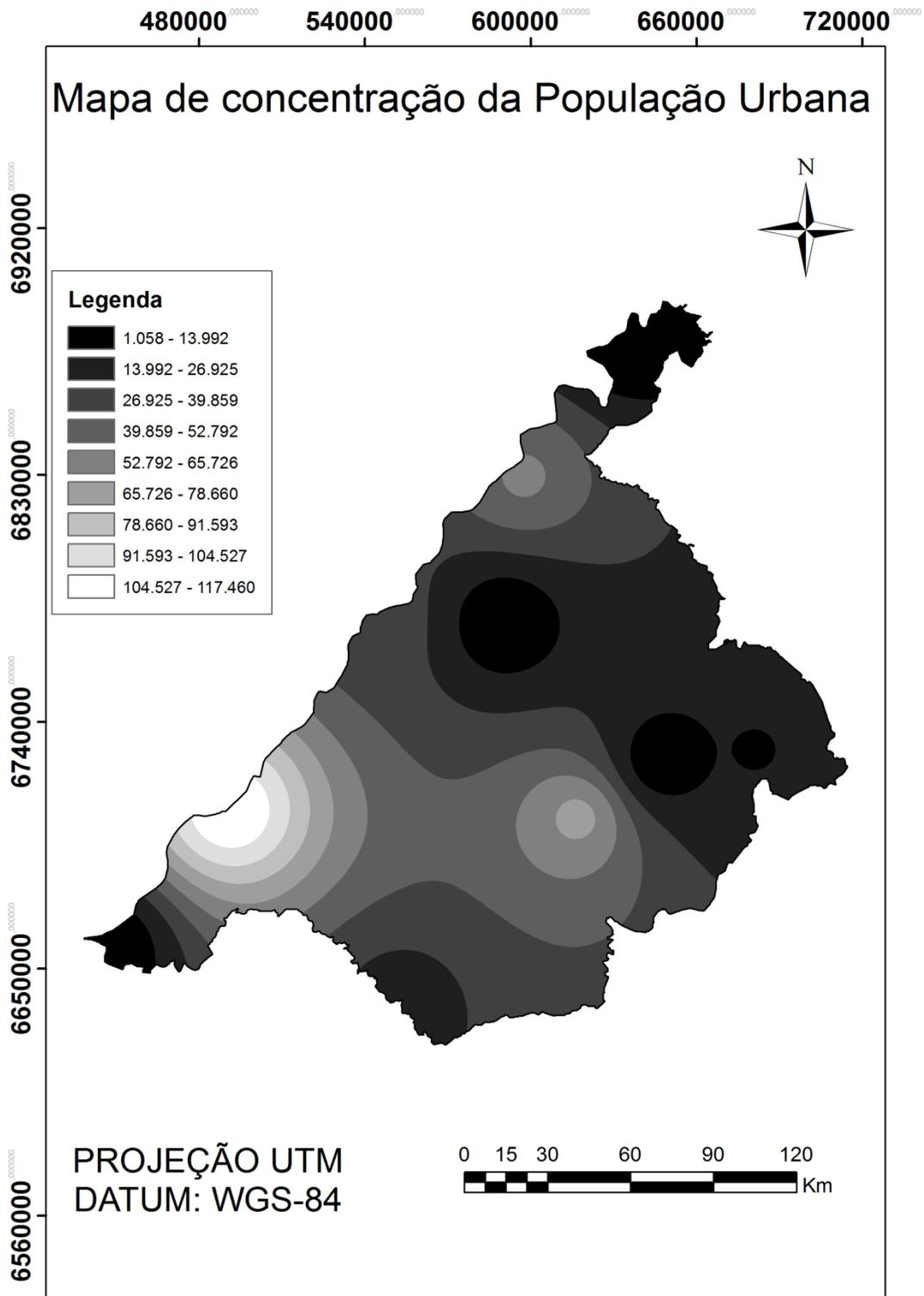
APÊNDICE D – Mapa de Declividade da microrregião Campanha Ocidental – RS.



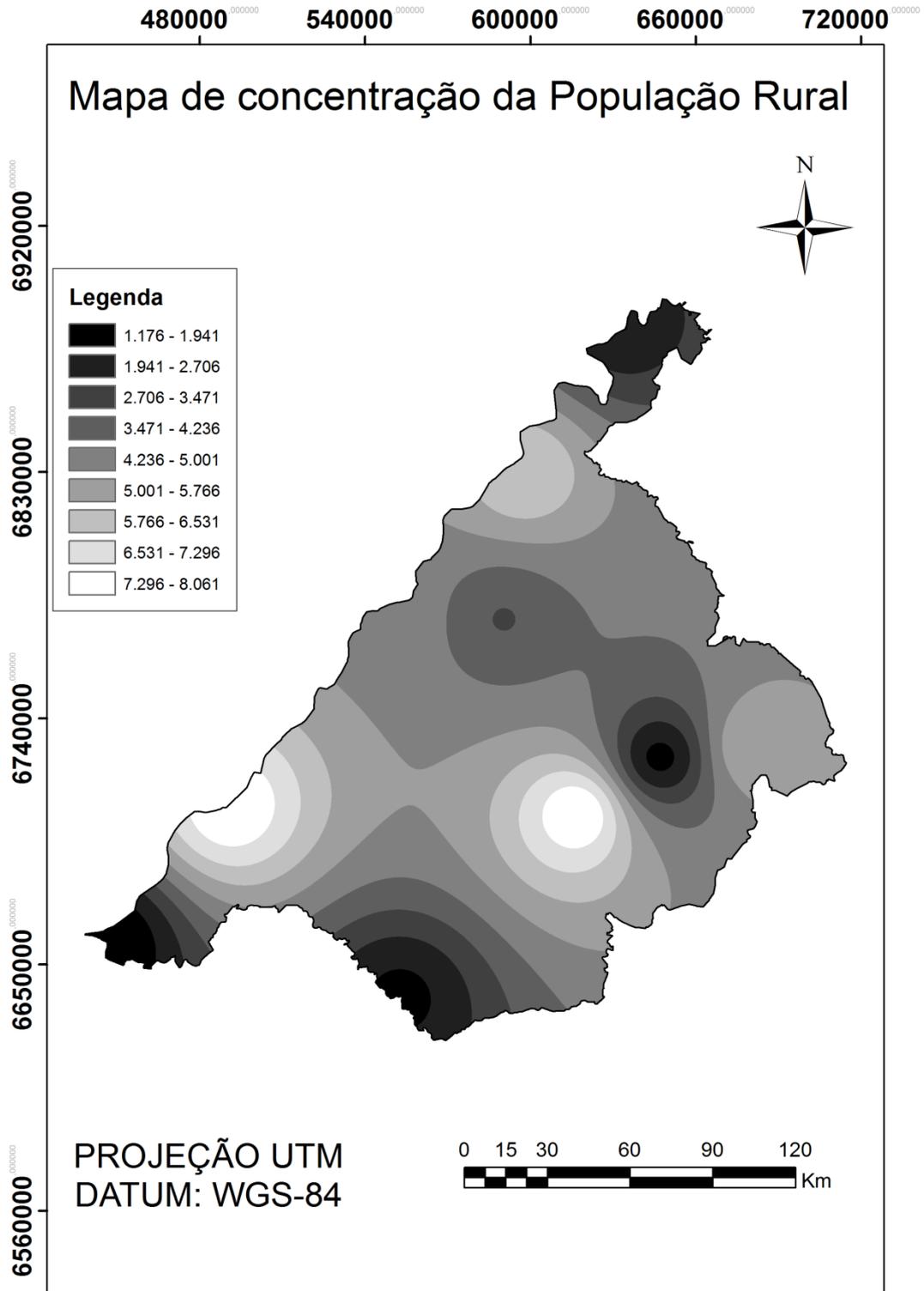
APÊNDICE E – Mapa Geológico da microrregião Campanha Ocidental – RS.



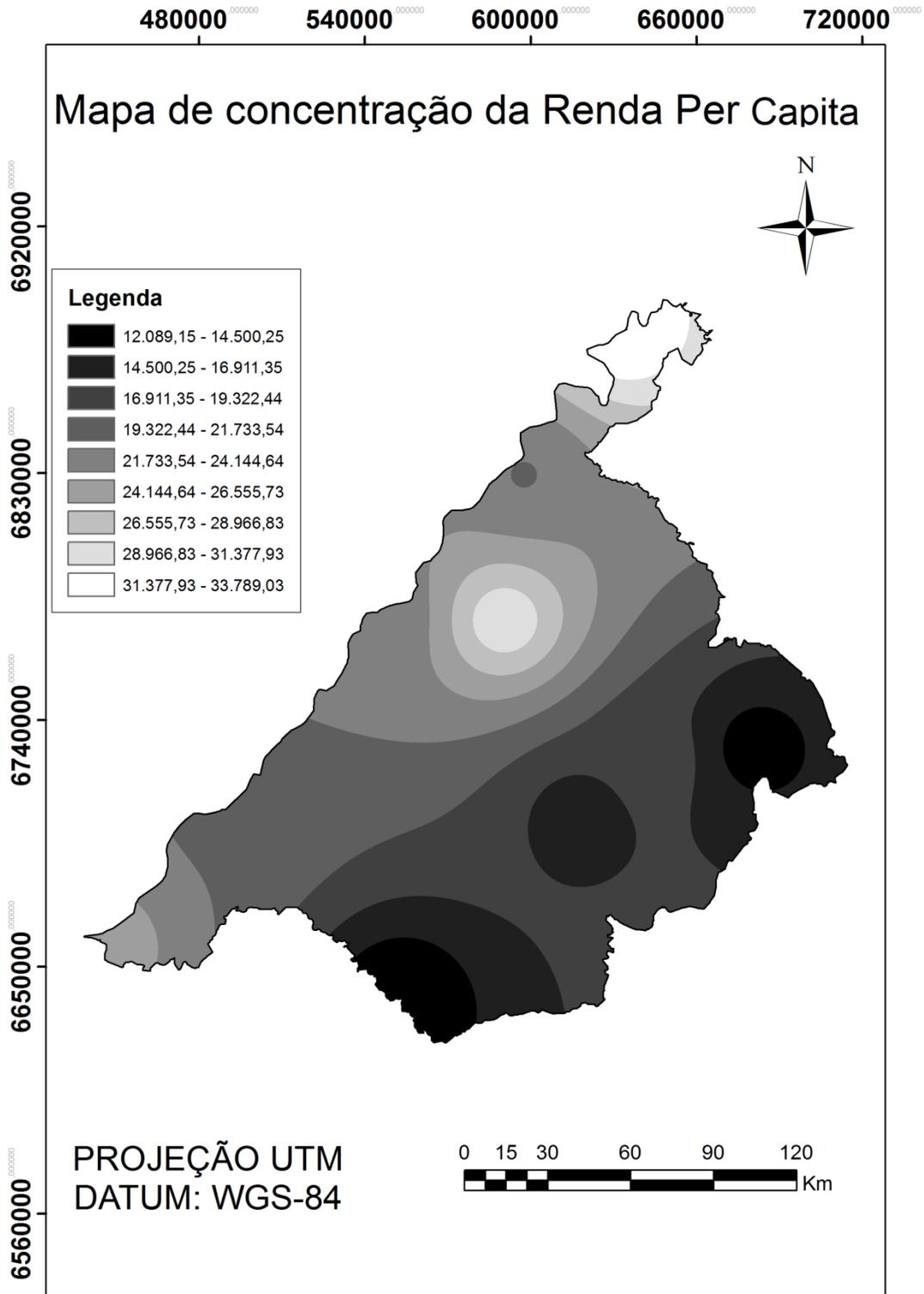
APÊNDICE F – Mapa de concentração da População Urbana da microrregião Campanha Ocidental – RS.



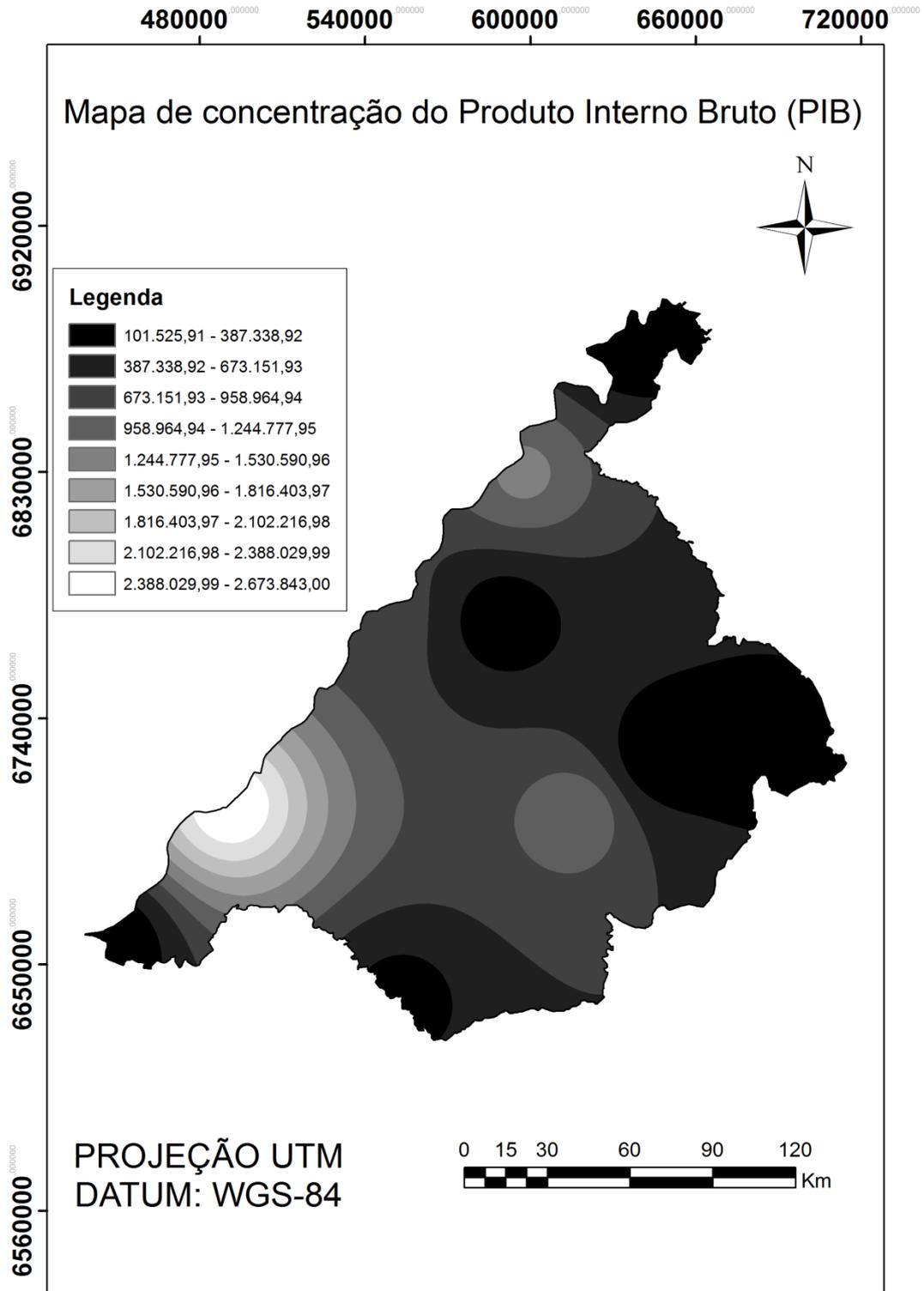
APÊNDICE G – Mapa de concentração da População Rural da microrregião Campanha Ocidental – RS.



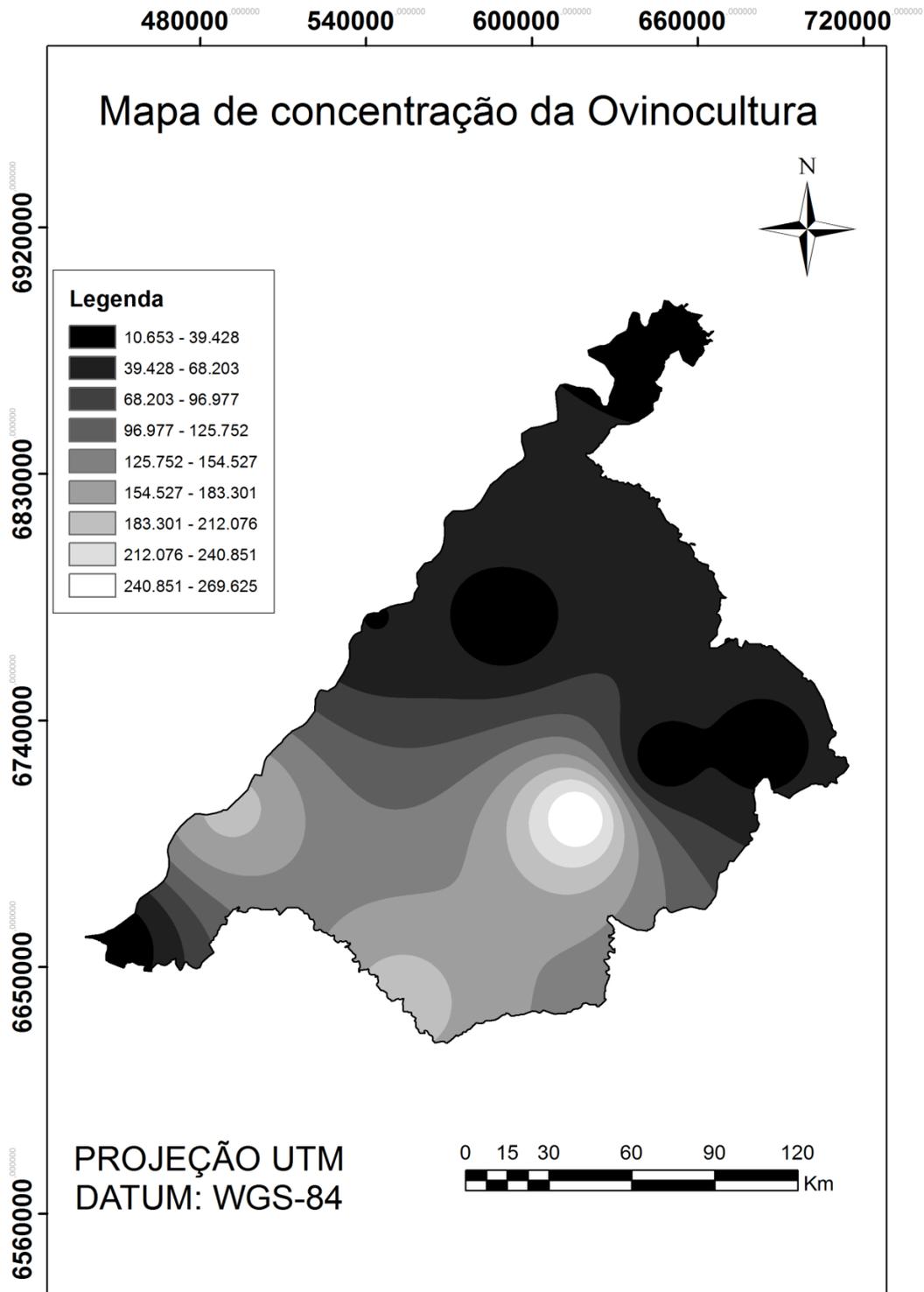
APÊNDICE H – Mapa de concentração da Renda Per Capita da microrregião Campanha Ocidental – RS.



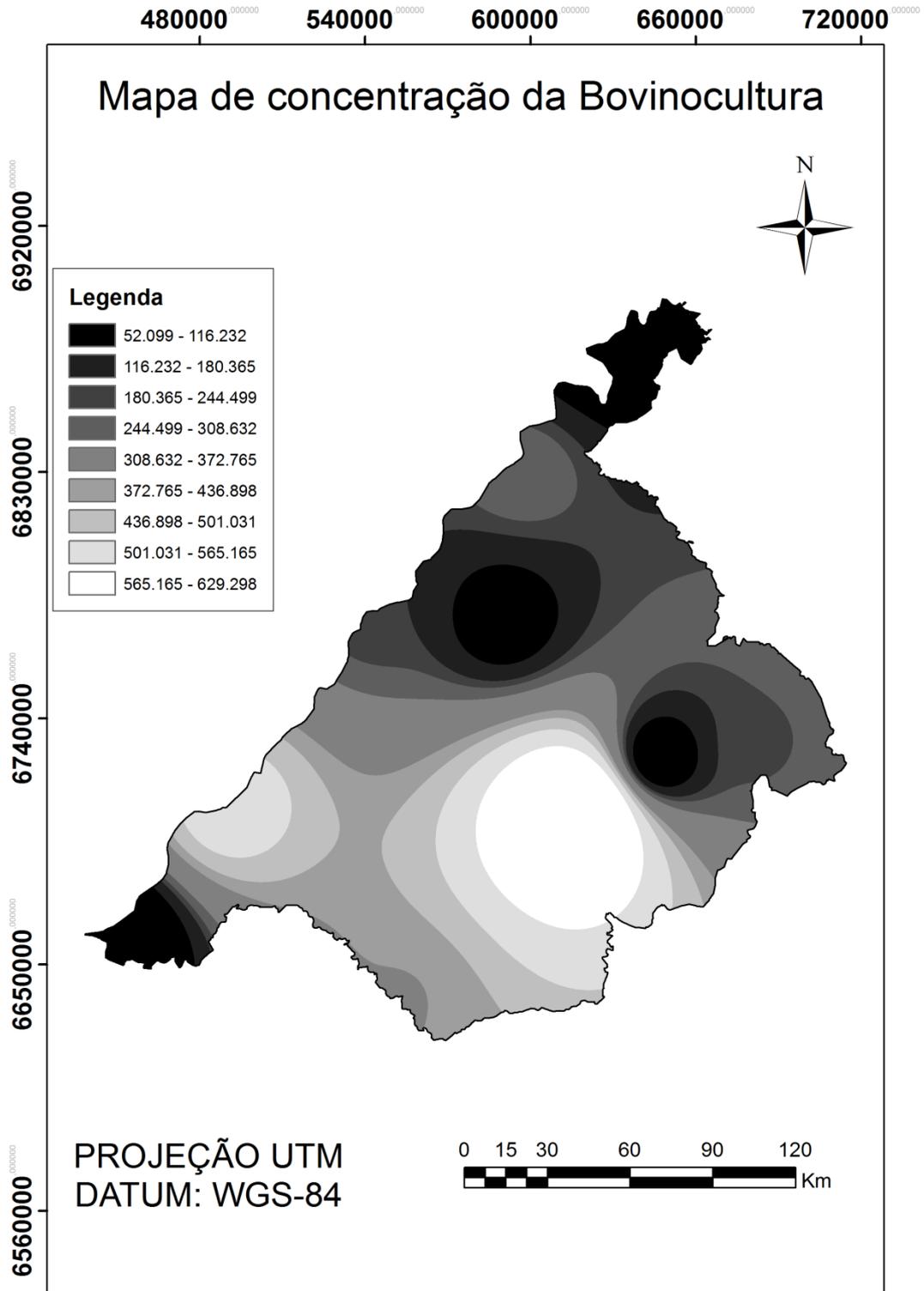
APÊNDICE I – Mapa de concentração do Produto Interno Bruto (PIB) da microrregião Campanha Ocidental – RS.



APÊNDICE J – Mapa de concentração da Ovinocultura da microrregião Campanha Ocidental – RS.



APÊNDICE K – Mapa de concentração da Bovinocultura da microrregião Campanha Ocidental – RS.



APÊNDICE L – Programação em LEGAL para mapas de transição de uso e cobertura da terra na microrregião da Campanha Ocidental – RS.

Programação em LEGAL – Transição 1985-1996

```
{
//Avaliacao das Mudanças de Uso e Cobertura da Terra
//Declaracoes
Tematico usosolo1985 ("Uso_Solo3");
Tematico usosolo1996 ("Uso_Solo3");
Tematico LEGAL5 ("LEGAL5");

//RecuperarPI's
usosolo1985 = Recupere (Nome= "usosolo1985");
usosolo1996 = Recupere (Nome= "usosolo1996");

//Cria cruzamento entre PI's
LEGAL5= Novo (Nome = "Cruzamento_85-96", ResX=30, ResY=30, Escala =
60000);

//Cria Tabela de Conflitos Ambientais pelo Uso da Terra
LEGAL5= Atribua
{

"MANUTENCAOAREAL": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe
== "Areal"),
"AREAL_AGUA": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe ==
"Agua"),
"AREAL_CAMPO": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe ==
"Campo"),
"AREAL_AGRICULTURA": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe
== "Agricultura"),
"AREAL_FLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe ==
"Floresta"),

"MANUTENCAOFLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Floresta" &&
usosolo1996.Classe == "Floresta"),
"FLORESTA_AGUA": (usosolo1985.Classe == "Floresta" && usosolo1996.Classe ==
"Agua"),
"FLORESTA_CAMPO": (usosolo1985.Classe == "Floresta" && usosolo1996.Classe
== "Campo"),
"FLORESTA_AGRICULTURA": (usosolo1985.Classe == "Floresta" &&
usosolo1996.Classe == "Agricultura"),
"FLORESTA_AREAL": (usosolo1985.Classe == "Floresta" && usosolo1996.Classe
== "Areal"),

"AGUA_AREAL": (usosolo1985.Classe == "Agua" && usosolo1996.Classe ==
"Areal"),
"CAMPO_AREAL": (usosolo1985.Classe == "Campo" && usosolo1996.Classe ==
"Areal"),
```

```

"AGRICULTURA_AREAL": (usosolo1985.Classe == "Agricultura" &&
usosolo1996.Classe == "Areal"),
"FLORESTA_AREAL": (usosolo1985.Classe == "Floresta" && usosolo1996.Classe
== "Areal"),

"AGUA_FLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Agua" && usosolo1996.Classe ==
"Floresta"),
"CAMPO_FLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Campo" && usosolo1996.Classe
== "Floresta"),
"AGRICULTURA_FLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Agricultura" &&
usosolo1996.Classe == "Floresta"),
"AREAL_FLORESTA": (usosolo1985.Classe == "Areal" && usosolo1996.Classe ==
"Floresta"));
}

```

#### Programação em LEGAL – Transição 1996-2011

```

{
//Avaliacao das Mudanças de Uso e Cobertura da Terra
//Declaracoes
Tematico usosolo1996 ("Uso_Solo3");
Tematico usosolo2011 ("Uso_Solo3");
Tematico LEGAL5 ("LEGAL5");

//RecuperarPI's
usosolo1996 = Recuperar (Nome= "usosolo1996");
usosolo2011 = Recuperar (Nome= "usosolo2011");

//Cria cruzamento entre PI's
LEGAL5= Novo (Nome = "Cruzamento_96-11", ResX=30, ResY=30, Escala =
60000);

//Cria Tabela de Conflitos Ambientais pelo Uso da Terra
LEGAL5= Atribua
{

"MANUTENCAOAREAL": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe
== "Areal"),
"AREAL_AGUA": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe ==
"Agua"),
"AREAL_CAMPO": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe ==
"Campo"),
"AREAL_AGRICULTURA": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe
== "Agricultura"),
"AREAL_FLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe ==
"Floresta"),

```

```

"MANUTENCAOFLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Floresta" &&
usosolo2011.Classe == "Floresta"),
"FLORESTA_AGUA": (usosolo1996.Classe == "Floresta" && usosolo2011.Classe ==
"Agua"),
"FLORESTA_CAMPO": (usosolo1996.Classe == "Floresta" && usosolo2011.Classe
== "Campo"),
"FLORESTA_AGRICULTURA": (usosolo1996.Classe == "Floresta" &&
usosolo2011.Classe == "Agricultura"),
"FLORESTA_AREAL": (usosolo1996.Classe == "Floresta" && usosolo2011.Classe
== "Areal"),

"AGUA_AREAL": (usosolo1996.Classe == "Agua" && usosolo2011.Classe ==
"Areal"),
"CAMPO_AREAL": (usosolo1996.Classe == "Campo" && usosolo2011.Classe ==
"Areal"),
"AGRICULTURA_AREAL": (usosolo1996.Classe == "Agricultura" &&
usosolo2011.Classe == "Areal"),
"FLORESTA_AREAL": (usosolo1996.Classe == "Floresta" && usosolo2011.Classe
== "Areal"),

"AGUA_FLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Agua" && usosolo2011.Classe ==
"Floresta"),
"CAMPO_FLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Campo" && usosolo2011.Classe
== "Floresta"),
"AGRICULTURA_FLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Agricultura" &&
usosolo2011.Classe == "Floresta"),
"AREAL_FLORESTA": (usosolo1996.Classe == "Areal" && usosolo2011.Classe ==
"Floresta"));
}

```

### Programação em LEGAL – Transição 2011-2013

```

{
//Avaliacao das Mudanças de Uso e Cobertura da Terra
//Declaracoes
Tematico usosolo2011 ("Uso_Solo3");
Tematico usosolo2013 ("Uso_Solo3");
Tematico LEGAL5 ("LEGAL5");

//RecuperarPI's
usosolo2011 = Recupere (Nome= "usosolo2011");
usosolo2013 = Recupere (Nome= "usosolo2013");

//Cria cruzamento entre PI's
LEGAL5= Novo (Nome = "Cruzamento_11-13", ResX=30, ResY=30, Escala =
60000);

//Cria Tabela de Conflitos Ambientais pelo Uso da Terra

```

LEGAL5= Atribua

{

"MANUTENCAOAREAL": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"AREAL\_AGUA": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Agua"),

"AREAL\_CAMPO": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Campo"),

"AREAL\_AGRICULTURA": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Agricultura"),

"AREAL\_FLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Floresta"),

"MANUTENCAOFLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Floresta"),

"FLORESTA\_AGUA": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Agua"),

"FLORESTA\_CAMPO": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Campo"),

"FLORESTA\_AGRICULTURA": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Agricultura"),

"FLORESTA\_AREAL": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"AGUA\_AREAL": (usosolo2011.Classe == "Agua" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"CAMPO\_AREAL": (usosolo2011.Classe == "Campo" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"AGRICULTURA\_AREAL": (usosolo2011.Classe == "Agricultura" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"FLORESTA\_AREAL": (usosolo2011.Classe == "Floresta" && usosolo2013.Classe == "Areal"),

"AGUA\_FLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Agua" && usosolo2013.Classe == "Floresta"),

"CAMPO\_FLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Campo" && usosolo2013.Classe == "Floresta"),

"AGRICULTURA\_FLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Agricultura" && usosolo2013.Classe == "Floresta"),

"AREAL\_FLORESTA": (usosolo2011.Classe == "Areal" && usosolo2013.Classe == "Floresta");

}