

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na
transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do
Aço

Carlos Henrique Pires Luiz

UFMG
Belo Horizonte
Maio de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na
transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do
Aço

Carlos Henrique Pires Luiz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Donizete Faria
Co-orientadora: Dra. Maria Isabel Sobral Escada

UFMG
Belo Horizonte
Maio de 2014

L952m
2014

Luiz, Carlos Henrique Pires.

Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço [manuscrito] / Carlos Henrique Pires Luiz. – 2014.

141 f., enc. : il. color.

Orientador: Sergio Donizete Faria.

Coorientadora: Maria Isabel Sobral Escada.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2014.

Bibliografia: f. 129-136.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Reflorestamento – Impacto ambiental – Minas Gerais – Teses. 3. Rio Piracicaba (MG) – Teses. I. Faria, Sergio Donizete. II. Escada, Maria Isabel Sobral. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6



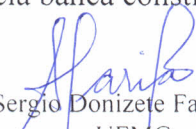
FOLHA DE APROVAÇÃO


Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço


CARLOS HENRIQUE PIRES LUIZ

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 27 de maio de 2014, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Sergio Donizete Faria - Orientador
UFMG


Prof(a). Maria Isabel Sobral Escada
INPE


Prof(a). Milton Cezar Ribeiro
UNESP - Rio Claro


Prof(a). Rodrigo Affonso de Albuquerque Nobrega
UFMG

Belo Horizonte, 27 de maio de 2014.

“Seja você quem for, seja qual for a posição que você tenha na vida, do nível altíssimo ao mais baixo social, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna da Silva

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela vida e por renovar minhas energias todos os dias, possibilitando cumprir mais essa etapa.

Agradeço ao meu orientador Prof. Sergio Faria pelos ensinamentos, dedicação, atenção, ajuda nos trabalhos de campo, mas acima de tudo pela convivência onde pude constatar sua simplicidade e serenidade na forma de conduzir a vida.

Agradeço a minha co-orientadora Dra. Maria Isabel Sobral Escada pela sua dedicação e interesse em contribuir para o crescimento dessa pesquisa. Sem dúvida seu papel foi fundamental para o amadurecimento desse trabalho.

A minha amada esposa Daniela Alvim, pelo apoio incondicional, companheirismo e paciência para compreender minhas ausências nos momentos de concentração.

Aos meus pais Nilzia e Pascoal, pelos ensinamentos de valores fundamentais para minha formação para a vida. E aos meus irmãos Tássio e Goubert, pelo convívio e carinho.

Aos amigos da Delphi Projetos e Gestão, em especial ao João Bello, José Ricardo e Sérgio Lins pela compreensão das ausências e pelo incentivo.

Ao meu amigo Daniel Martins Sampaio pelo convívio e troca de conhecimentos essenciais para vencermos mais essa etapa.

A todos os professores e colegas de mestrado que de alguma forma colaboraram para meu crescimento e sucesso dessa pesquisa.

Ao Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pelo auxílio financeiro nos trabalhos de campo e participação em eventos.

RESUMO

As mudanças na cobertura da terra têm provocado alterações ambientais em escala global e por esse motivo tem se tornado foco de atenção para diversas pesquisas. Esses estudos buscam um melhor entendimento da dinâmica das mudanças e suas consequências para temas variados como: conservação da biodiversidade, mudanças no clima e alteração da paisagem. Nesse contexto, os modelos LUCC – *Land Cover and Use Change* possuem ampla aplicação, pois possibilitam que modeladores construam simulações de cenários futuros, utilizando-os não apenas como uma ferramenta de análise, mas, sobretudo, para auxiliar no planejamento. Os municípios da Bacia do Rio Piracicaba e da Região Metropolitana do Vale do Aço – RMVA que compõe a área de estudo deste trabalho, abrigam importantes indústrias do setor siderúrgico, de papel e celulose no Vale do Aço em Minas Gerais. Essa região é um importante polo de desenvolvimento econômico no estado, baseado principalmente nas indústrias siderúrgicas e de papel e celulose, que trouxe consigo grandes transformações na cobertura da terra. Dentre essas, a substituição da cobertura vegetal natural por áreas de reflorestamento com eucalipto que tem modificado a paisagem e possivelmente afetado a biodiversidade, reduzindo as áreas de habitat original das espécies. Para modelar e simular as alterações na cobertura da terra, a presente pesquisa utilizou o modelo *Land Change Modeler* (LCM). A modelagem foi feita baseada em dados da cobertura da terra obtidos a partir de classificações de imagens de satélite (TM/landsat) para os anos de 1985, 2010 e 2013. Para fazer a projeção e simulação das mudanças da cobertura da terra, partiu-se da suposição de que o cenário econômico será mantido até 2035, com a atual demanda por eucalipto. Os mapas e o resultado produzido na simulação foram analisados utilizando métricas da paisagem que permitiram quantificar e caracterizar as mudanças na estrutura da paisagem. Os resultados do mapeamento mostraram que entre 1985 e 2010 houve aumento de cerca de 12% nas áreas de reflorestamento com Eucalipto, ao passo que as áreas de floresta diminuíram aproximadamente 9% e as de pastagem 3%. Variáveis explanatórias para calibração do sub-modelo de transição potencial foram testadas e as que apresentaram maior relação com as mudanças, segundo o teste de Cramer-V, foram: 1) áreas de mudança entre 1985 e 2010; 2) distâncias dos núcleos urbanos; 3) distância das áreas com reflorestamento de eucalipto e; 4) distância das pastagens. Utilizando um conjunto de variáveis explanatórias ambientais e socioeconômicas foi possível calibrar o sub-modelo de transição potencial com base em uma abordagem em redes neurais com acurácia média de 94,28%. A validação do modelo foi feita a partir da comparação da cobertura da terra mapeada em campo e simulada para 2013. Uma vez calibrado o modelo, foi feita a simulação da cobertura da terra para 2035 que manteve a tendência do contínuo aumento das áreas de reflorestamento com eucalipto. Os resultados da análise da paisagem mostraram alteração em sua estrutura ao longo do período analisado. Enquanto em 1985 as maiores manchas vegetais eram de floresta, a partir de 2010 as maiores manchas passaram a ser de reflorestamento com eucalipto, refletindo em mudanças nos padrões de conectividade e isolamento dos fragmentos florestais. A simulação apontou para uma tendência de que as áreas de floresta fiquem cada vez mais isoladas e menores, ao passo que as áreas de reflorestamento ficarão cada vez mais conectadas entre si. Embora esse tipo de cobertura possa ser utilizado como habitat por algumas espécies florestais, nem

todas se adaptariam as novas condições. A partir dos resultados da simulação observamos a importância de conciliar crescimento econômico e conservação do ambiente. É preciso pesar os benefícios socioeconômicos do reflorestamento com eucalipto frente aos seus impactos ambientais. Caso a demanda por eucalipto continue crescendo no ritmo observado entre 1985 e 2010 é necessário estabelecer limites para não comprometer a qualidade dos remanescentes florestais e seu arranjo espacial na paisagem.

Palavras-chave: *Land Change Modeler*, análise de mudança, simulação.

ABSTRACT

Land cover change has been causing environmental impacts on global scale. Those changes become the focus of some researches, towards understanding the dynamics of these changes and their consequences for biodiversity conservation, climatic changes and landscape changes. In this context, the LUCC models – Land Use and Cover Change have wide application, once through their representations is possible that modelers build future scenarios simulations. The cities in the Piracicaba river basin and metropolitan area from Vale do Aço - RMVA, are home to some industries from steel sector and cellulose and paper in Minas Gerais state. This region is one of the major hub of economic development in the state. However, this economic development based mainly in the steel industries, paper and cellulose, has brought changes in land cover. Among these, the replacement of natural vegetation cover areas for reforestation with eucalyptus has been impacting the landscape and contributing to biodiversity losses. In order to measure the changes in land cover and landscape structure, this research employed the land change modeler model (LCM) to analyze, to model and to simulate changes in land cover from land cover data from 1985, 2010 and 2013. These results, plus the LCM simulation to 2035 were used in the landscape structure analysis for the years 1985, 2010 and 2035. The landscape structure analyze, was performed through metrics that were used to measure changes in the landscape elements, and based on this analysis assess the degree of landscape fragmentation. The results of land cover change analysis showed an increased by 11,64% on reforestation with Eucalyptus areas, whereas forest and pasture areas decreased by 9,15% and 3,55% respectively, between 1985 and 2010. Explanatory variables for potential transition sub-model calibration were tested. The higher explanatory variables related to observed changes, according to Cramer's-V test were: 1) changed areas between 1985 and 2010, 2) distances from urban centers; 3) distance from areas with eucalypt reforestation; 4) distance to pasture area. Using a set of environmental and socioeconomic explanatory variables was possible to calibrate the potential transition sub-model based on a neural network approach with an accuracy of 94.28 %. With the calibrated land cover the simulation to 2035, the trend found showed that reforestation with eucalyptus will may keep increasing. The landscape analysis showed the matrix of the landscape is changing. While in 1985 the largest patches were forested areas, in 2010 the largest patches became eucalyptus reforestation. This change reflects on the connectivity and isolation of fragments. The simulation showed a tendency that forested areas become increasingly isolated, while the reforestation areas become connected. In conclusion it is clear the necessity of balancing economic growth and environmental conservation. We need to think the socioeconomic benefits of reforestation against their environmental impacts. If eucalyptus demand keep on grow, such as observed between 1985 and 2010, it will be necessary to establish limits or ways to improve productivity without compromising environmental quality as an alternative to keep the most stable dynamic equilibrium of the environment.

Key-words: Land change modeler, change analyze, simulation.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos	22
1.2 Estrutura da dissertação	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1 Dados para análise e modelagem de mudanças na cobertura da terra	24
2.2 Processamento Digital de Imagens	27
2.2.1 Normalização de imagens de satélite	27
2.2.2 Correção geométrica	28
2.2.3 Segmentação e classificação de imagens	29
2.3 Modelagem de sistemas ambientais	32
2.3.1 <i>Land Change Modeler</i>	38
2.3.1.1 Teste de Cramer-V para mensuração da associação espacial das variáveis explanatórias e áreas de mudança	42
2.3.1.2 Rede neural perceptron multicamada	43
2.3.1.3 Cadeias de Markov	44
2.4 Análise da alteração da estrutura da paisagem apoiada por métricas de paisagem	45
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.1 Localização Geográfica	49
3.2 Histórico de ocupação	49
3.3 Demografia	51
3.4 A economia no contexto da expansão da indústria de papel e celulose	52
3.5 Cobertura da Terra	57
3.6 Solos	59
3.7 Unidades de Conservação	60
4 METODOLOGIA	64
4.1 Pré-modelagem	66
4.1.1 Levantamento e aquisição dos dados	66

4.1.2	Pré-processamento de imagens	67
4.1.3	Mapeamento da cobertura da terra	67
4.1.4	Avaliação e validação em campo do mapeamento da cobertura da terra	69
4.1.5	Análise da mudança da cobertura da terra	69
4.2	Construção e calibração do sub-modelo de transição potencial	70
4.2.1	Definição das transições de interesse	70
4.2.2	Teste e seleção das variáveis explanatórias	71
4.2.3	Modelagem das transições potenciais	72
4.3	Modelagem das mudanças da cobertura da terra	73
4.3.1	Validação da simulação de mudanças na cobertura da terra	73
4.3.2	Inclusão de áreas com restrições à mudança	74
4.3.3	Simulação da cobertura da terra	75
4.4	Análise da fragmentação da paisagem	76
5	RESULTADOS	78
5.1	Mapeamento da cobertura da terra: 1985, 2010 e 2013	78
5.1.1	Resultados do pré-processamento dos dados	78
5.1.2	Levantamentos de campo	79
5.1.3	Mapeamento da cobertura da terra	81
5.2	Modelagem das mudanças na cobertura da terra	90
5.2.1	Construção, calibração e validação do sub-modelo de transição potencial	90
5.2.2	Modelagem e validação do modelo de mudança	94
5.2.2.1	Floresta estacional semidecidual Montana – FESM	97
5.2.2.2	Pastagem	100
5.2.2.3	Reflorestamento com Eucalipto	103
5.2.3	Simulação da cobertura da terra para 2035	106
5.3	Análise da alteração da estrutura da paisagem	111
5.3.1	Número de manchas	114
5.3.2	Área	115
5.3.3	Área Núcleo	116
5.3.4	Grau de isolamento das manchas	118
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

APÊNDICE A –	ENTREVISTAS COM MORADORES DA ÁREA DE ESTUDO	137
APÊNDICE B –	MATRIZES DE ERRO DE CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA	140

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Esquema geral de funcionamento do LCM para análise da mudança de uso e cobertura da terra	39
Figura 2 – Módulos do <i>Land Change Modeler</i>	40
Figura 3 – Estrutura do módulo de transição potencial	41
Figura 4 – Modelo mancha, corredor e matriz	46
Figura 5 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, dos municípios dessa bacia e dos municípios da RMVA	50
Figura 6 – Número de pessoas empregadas na indústria de extração e transformação nos anos de 2000 e 2010	53
Figura 7 – Produção anual de madeira para papel e celulose nos municípios em estudo	54
Figura 8 – Produção anual de carvão vegetal	57
Figura 9 – Biomas na área de estudo	58
Figura 10 – Coberturas da terra mais representativas na área de estudo	59
Figura 11 – Mapa pedológico da área de estudo	60
Figura 12 – Unidades de conservação na área de estudo	61
Figura 13 – Áreas de reflorestamento com eucalipto em relação a distribuição das unidades de conservação na área de estudo	62
Figura 14 – Fluxograma da metodologia	65
Figura 15 – Transições de interesse	71
Figura 16 – Fluxograma para validação da cobertura da terra	74
Figura 17 – Distribuição dos pontos de controle para georreferenciamento das imagens LANDSAT	79
Figura 18 – Pontos de avaliação do mapeamento da cobertura da terra: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	80
Figura 19 – Mapa da cobertura da terra para 1985: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	82
Figura 20 – Mapa da cobertura da terra para 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	83
Figura 21 – Mapa da cobertura da terra para 2013: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	84

Figura 22 – Áreas de mudança de cobertura da terra para Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	87
Figura 23 – Áreas de mudança de cobertura da terra para Pastagem com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	88
Figura 24 – Áreas de mudança de cobertura da terra para FESM com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	89
Figura 25 – Potencial de transição de FESM em Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	93
Figura 26 – Potencial de transição de Pastagem em Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	94
Figura 27 – Mapas da cobertura da terra em 2013 – municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA: gerado a partir de imagem LANDSAT e simulado pelo modelo LCM	96
Figura 28 – Diferenças entre a cobertura FESM mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise	97
Figura 29 – Mapa de áreas de falsos-positivos e falsos-negativos da cobertura FESM: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	98
Figura 30 – Percentual de acerto da cobertura FESM: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	99
Figura 31 – Diferenças entre a cobertura Pastagem mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise	100
Figura 32 – Mapa de áreas de falsos-positivo e falsos-negativos para a cobertura Pastagem: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	101
Figura 33 – Percentual de acerto entre a cobertura Pastagem mapeada e simulada: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	102
Figura 34 – Diferenças entre a cobertura Reflorestamento com eucalipto mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise	103
Figura 35 – Mapa de áreas de falsos-positivos e falsos-negativos para a cobertura Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	104

Figura 36 – Percentual de acerto entre a cobertura Reflorestamento com Eucalipto mapeada e simulada: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	105
Figura 37 – Mapas da cobertura da terra para 2010 (mapeada a partir de imagem LANDSAT) e 2035 (simulada pelo modelo-LCM): municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	108
Figura 38 – Representatividade das classes de cobertura da terra em 2010 e 2035	109
Figura 39 – Mapa de vulnerabilidade à mudança até 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	110
Figura 40 – Classes de cobertura da terra para análise da estrutura da paisagem na área de estudo: 1985; 2010 e 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	112
Figura 41 – Classes de cobertura da terra para análise da estrutura da paisagem em 1985, 2010 e 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	113
Figura 42 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Floresta em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035	119
Figura 43 – Mapas de distâncias Euclidiana para o vizinho mais próximo para as áreas de Floresta: 1985, 2010 e 2035	120
Figura 44 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Refúgio Ecológico Montano em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035	121
Figura 45 – Mapas de distâncias Euclidiana para o vizinho mais próximo para as áreas de Refúgio Herbáceo Montano: 1985, 2010 e 2035	122
Figura 46 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Refúgio Ecológico Montano em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035	123
Figura 47 – Mapas de distâncias Euclidiana para o vizinho mais próximo para as áreas de Reflorestamento: 1985; 2010 e 2035	124

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Características do TM LANDSAT-5	26
Tabela 2 – Características do OLI/TIRS LANDSAT 8	26
Tabela 3 – Classificadores disponíveis no SPRING conforme elemento e tipo de treinamento	31
Tabela 4 – Exemplos de modelos e plataformas LUCC	35
Tabela 5 – População total por município para os anos de 1980, 1991, 2000 e 2010	51
Tabela 6 – Percentual do PIB baseado nos setores industrial e agropecuário	52
Tabela 7 – Área total de ocupação, área plantada e % dos municípios ocupado por plantações de eucalipto da CENIBRA na área de estudo	56
Tabela 8 – Unidades de conservação na área de estudo por ano de criação e tipo de proteção ambiental	63
Tabela 9 – Dados das imagens utilizadas no mapeamento da cobertura da terra	66
Tabela 10 – Variáveis explanatórias utilizadas nos testes para construção e calibração do sub-modelo de transição potencial	72
Tabela 11 – Classes de vulnerabilidade à mudança	76
Tabela 12 – Áreas das classes de cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013: municípios da bacia do Rio Piracicaba e da RMVA	85
Tabela 13 – Variação da cobertura da terra entre 1985 e 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA	85
Tabela 14 – Resultado do teste e seleção das variáveis explanatórias para inclusão no sub-modelo de transição potencial	91
Tabela 15 – Matriz de transição da cobertura da terra entre 2010 e 2013 com os percentuais de mudança e persistência	95
Tabela 16 – Quantidade de células por faixa de acerto entre o mapeado e o simulado para a classe FESM	100
Tabela 17 – Quantidade de células por faixa de acerto entre o mapeado e o simulado para a classe Pastagem	103
Tabela 18 – Quantidade de células por faixa de acerto entre o mapeado e o simulado para a classe Reflorestamento com Eucalipto	106

Tabela 19 – Matriz de transição potencial para as classes de cobertura da terra entre os anos de 2010 e 2035	107
Tabela 20 – Reclassificação das classes de cobertura para análise da Paisagem	111
Tabela 21 – Número de manchas para cada classe de cobertura em 1985, 2010 e 2035	114
Tabela 22 – Número de manchas para cada classe de cobertura da terra por faixa de área (ha)	115
Tabela 23 – Quantidade de áreas núcleo por classe de cobertura e faixa de área	117
Tabela 24 – Número de áreas núcleo e área total da classe Floresta: 1985, 2010 e 2035	118

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACESITA	–	Companhia de Aços Especiais de Itabira
AFLO	–	Afloramento
APA	–	Área de Proteção Ambiental
APP	–	Área de Preservação Permanente
CAMP	–	Vegetação Campestre Natural
CENIBRA	–	Celulose Nipo-Brasileira
CLUE	–	<i>Conversion of Land Use and Its Effects</i>
CSR	–	Centro de Sensoriamento Remoto
EEE	–	Estação Ecológica Estadual
FEAM	–	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FEARLUS	–	<i>Framework for Evaluation and Assessment of Regional Land Use Scenarios</i>
FESM	–	Floresta Estacional Semi-decidual Montana
FISSET	–	Fundo de Investimentos Setoriais
GEM	–	<i>General Ecosystem Model</i>
GPS	–	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEF	–	Instituto Estadual de Florestas
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LCM	–	<i>Land Change Modeler</i>
LMS	–	<i>Least Mean Square</i>
LUCC	–	<i>Land Use and Cover Change</i>
MIN	–	Mineração
MMA	–	Ministério do Meio Ambiente
MLPNN	–	<i>Multi-Layer Perceptron Neural Network</i>
NASA	–	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	–	Número Digital
OLI	–	<i>Operation Land Imager</i>
PAQE	–	Parque Estadual
PAS	–	Pastagem

PDI	–	Processamento Digital de Imagem
PEI	–	Parque Estadual do Itacolomi
PERD	–	Parque Estadual do Rio Doce
PIB	–	Produto Interno Bruto
PLM	–	<i>Patuxent Landscape Model</i>
PND	–	Programa Nacional de Desestatização
RBF	–	<i>Radius Basis Function</i>
RBM	–	Reserva da Biosfera Municipal
REM	–	Radiação Eletromagnética
RMBH	–	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMVA	–	Região Metropolitana do Vale do Aço
RNA	–	Rede Neural Artificial
S. Exp	–	Solo Exposto
SIG	–	Sistema de Informação Geográfica
SOM	–	<i>Self-Organizing Map</i>
SPRING	–	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	–	Sensoriamento Remoto
SUDENE	–	Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
TIRS	–	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	–	<i>Thematic Mapper</i>
UC	–	Unidade de Conservação
UFLA	–	Universidade Federal de Lavras
UFMG	–	Universidade Federal de Minas Gerais
UMCES	–	<i>University of Maryland Center for Environmental Science</i>
URB	–	Urbano
USGS	–	<i>United States Geological Survey</i>
USIMINAS	–	Usina Siderúrgica de Minas Gerais S/A
UTM	–	Universal Transversa de Mercator

1 INTRODUÇÃO

As alterações provocadas pela interação do homem com seu meio ambiente tem sido objeto de pesquisa em diversas áreas do conhecimento. Nestas pesquisas busca-se uma melhor compreensão de como as alterações ocorrem e quais suas implicações ambientais e sociais. Os resultados dessas pesquisas são importantes para a proposição de ações econômicas e ambientais que procuram caminhos em direção a um desenvolvimento que preserve os recursos naturais para as gerações futuras e que seja socialmente justo. É nesse contexto que esse trabalho se insere, e tem como foco principal avaliar e simular dinâmicas futuras da cobertura da terra na Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço, onde a indústria de papel e celulose tem apresentado um forte crescimento nas últimas décadas, promovendo grandes transformações na paisagem, devido a expansão do plantio do eucalipto. Entende-se por *cobertura da terra*¹ o estado biofísico da superfície da terra que pode ser observado diretamente ou com dados de sensoriamento, como: água, solo exposto, área construída, vegetação natural ou plantada, etc. (TURNER e MEYER, 1994).

Como principais marcos que contribuíram para as transformações na paisagem da Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço, podemos destacar: a implantação em 1903 da Ferrovia Vitória-Minas e, a chegada a partir de 1937, da Usina Belgo Mineira, uma das grandes empresas ligadas aos segmentos da siderurgia e mineração. Em 1942 foi a vez da então Companhia Vale do Rio Doce, da Acesita em 1944, da Usiminas em 1956 e da Cenibra em 1977. Durante esse período, foi construída a infraestrutura que atraiu uma grande massa de força de trabalho, reforçando ainda

¹ Esse termo é frequentemente confundido com *uso da terra* que diz respeito à maneira nas quais os elementos biofísicos da superfície da terra são utilizados e/ou o propósito para a qual esses elementos são utilizados (DI GREGÓRIO, 2005; TURNER e MEYER, 1994). Exemplos de uso da terra são as atividades agrícolas, a pecuária, uso urbano, extrativista, turismo, etc. Nem sempre o uso da terra pode ser inferido a partir de uma imagem, sendo necessária a utilização de dados complementares como os dados de campo e/ou de séries temporais de imagens. Nesse trabalho, como foram utilizados dados de sensoriamento remoto de apenas uma data por ano, foi realizado o mapeamento da *cobertura*, e não do *uso da terra*.

mais as transformações da paisagem na região. Embora existam pontos controversos em relação ao plantio de eucalipto, o fato é que existe uma crescente demanda dessa matéria prima que não pode ser suprida com madeira nativa. Nesse cenário a perspectiva é de uma crescente expansão das florestas plantadas.

Nos estudos ambientais, o avanço tecnológico tem proporcionado cada vez mais ferramentas e possibilidades de obtenção de dados da cobertura da terra, por meio do emprego de técnicas de geoprocessamento agregadas ao uso de imagens de satélite, técnicas de processamento de imagens e do uso de sistemas de informações geográficas (SIG) (FUJACO et al., 2010). Neste trabalho os produtos de SR possibilitaram detectar e mapear alterações da cobertura da terra. As imagens do satélite LANDSAT, que fornecem dados para estudos da superfície terrestre desde 1972, constitui o maior acervo temporal de imagens orbitais existentes até o momento, e por esse motivo, foram escolhidas como base para o mapeamento da cobertura da terra nesta pesquisa.

Para a análise das mudanças da cobertura da terra foi utilizado um SIG que permite o gerenciamento de informações geográficas contribuindo para representação e auxílio no entendimento das mudanças da cobertura da terra. As mudanças de cobertura da terra podem envolver transformações sutis, como a degradação florestal, e/ou conversões completas de uma cobertura em outra, como por exemplo, a conversão de uma cobertura florestal em uma cobertura de gramínea (TURNER e MEYER, 1994).

Um modelo computacional foi utilizado para auxiliar na compreensão das dinâmicas de alteração da cobertura da terra possibilitando explorar variáveis relacionadas com os processos de mudanças e simular projeções baseadas em um cenário de crescimento econômico em que a demanda pelo eucalipto se mantém alta, como nas últimas décadas. Embora modelos como esses sejam úteis, é preciso considerar que são ferramentas que simplificam a realidade e que, de uma forma genérica, buscam reproduzir as características ou relações mais importantes do fenômeno em estudo.

Os modelos LUCC – *Land Cover and Use Change*, como o utilizado neste trabalho, procuram explicar as causas das mudanças além de prever onde, quando e como as mudanças ocorrerão. Esses modelos permitem a proposição de cenários a partir do entendimento de como alguns eventos podem influenciar as mudanças na cobertura da

terra. Para isso é importante que se incorporem aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos. O *Land Change Modeler* – LCM, desenvolvido pelo Clarcks Labs (2009) foi selecionado neste trabalho para modelar e simular a alteração da paisagem provocada pela expansão das áreas de reflorestamento na Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço. Existem inúmeros modelos e plataformas computacionais para a modelagem da cobertura da terra. A escolha do LCM está relacionada ao fato desse *software* utilizar uma interface simples, implementada em ambiente SIG. Com isso há um ganho de tempo uma vez que abordagens como as dos *softwares* CLUE (VELDKAMP E FRESCO, 1999), DINAMICA (SOARES-FILHO, 1998) e TerraME (CARNEIRO, 2006), demandam um tempo maior de aprendizado da sua linguagem e formas de operação. O LCM permite trabalhar com levantamentos de cobertura da terra oriundos de imagens de média a alta resolução espacial, possibilitando, incorporar inúmeras variáveis condicionantes aos padrões de cobertura da terra.

Embora modelos LUCC possuam aplicações úteis ligadas ao planejamento e à projeção de cenários futuros, é preciso considerar suas limitações. A paisagem guarda interações complexas que não são lineares ou deterministas, portanto, dizer qual será a cobertura da terra futura não é uma tarefa simples e os resultados devem ser encarados como tendências baseadas em observações do passado. Contudo, nada garante que as mesmas condições ambientais e socioeconômicas de um período permaneçam inalteradas. Os meios de produção e demanda econômica podem mudar, com isso, as relações entre as variáveis condicionantes podem se modificar também. Assim, a simulação e projeção de cenários futuros se baseiam em uma série de premissas que podem não se manter ao longo do tempo, mas são essenciais para o exercício da modelagem.

Para avaliar os resultados da simulação do modelo, métricas de paisagem foram utilizadas auxiliando na interpretação dos padrões gerados e na análise da organização dos elementos que compõem a paisagem. A combinação de modelos LUCC com métricas da paisagem possibilitam avaliar de forma quantitativa a trajetória das transformações temporais na região estudada.

O uso combinado de diferentes ferramentas como o processamento de imagens, geoprocessamento, modelagem e métricas de paisagem é importante para um melhor entendimento das mudanças da cobertura da terra. Neste trabalho, as mudanças que se quer observar são aquelas relacionadas à expansão do reflorestamento com eucalipto. Assim, essa pesquisa se propõe a analisar as mudanças de cobertura da terra nos municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço – RMVA nos anos de 1985 e 2010, de forma a gerar um modelo e, com base na projeção e na simulação das mudanças, avaliar a estrutura da paisagem para 2035. Essa simulação baseia-se em um cenário que parte dos seguintes pressupostos :

- a demanda por eucaliptos de reflorestamento continuará crescendo conforme período de análise (1985 e 2010);
- as mudanças na cobertura da terra têm maior probabilidade de ocorrerem nas áreas adjacentes àquelas que mudaram entre 1985 e 2010;
- as áreas de Unidades de Conservação de Proteção Integral tem possibilidade de mudança quase nula.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a influência do reflorestamento com eucalipto na transformação da paisagem e suas consequências para conservação, nos municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço, utilizando o *software Land Change Modeler* e métricas de paisagem, a partir de dados TM/Landsat.

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar as mudanças de cobertura da terra nos anos de 1985 e 2010;
- entender a dinâmica de transições entre as classes de cobertura da terra para 1985 e 2010 a partir da avaliação das mudanças;
- construir um modelo de mudança da cobertura da terra a partir de variáveis ambientais e socioeconômicas para a análise da expansão do reflorestamento;

- simular um cenário considerando que o crescimento da demanda por eucaliptos se mantém como observado entre 1985 e 2010, permitindo inferir a cobertura da terra futura da área de estudo para o ano de 2035 em face à essa expansão;
- avaliar a influência da dinâmica do reflorestamento com eucalipto na alteração da estrutura da paisagem nos anos de 1985, 2010 e 2035.

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em mais cinco capítulos conforme descrito a seguir. **CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA:** Nesse capítulo é apresentada uma revisão dos principais conceitos que embasam essa pesquisa, com destaque para modelagem da cobertura da terra e o *software* de modelagem escolhido – *Land Change Modeler*. **CAPÍTULO 3 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO:** Nesse capítulo é apresentada a área de estudo, destacando os aspectos históricos que levaram às transformações na cobertura da terra ligadas à expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto. **CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA:** Nesse capítulo são apresentados os procedimentos e ferramentas utilizadas para modelagem da cobertura da terra e análise da estrutura da paisagem. **CAPÍTULO 5 – RESULTADOS:** Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente trabalho. **CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS:** Nesse capítulo é apresentada uma síntese do trabalho, destacando as principais contribuições dessa pesquisa na análise da expansão das áreas de reflorestamento com o uso de modelos e suas implicações para a estrutura da paisagem.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é composto de cinco seções. A primeira seção lista e descreve trata os dados necessários para análise e modelagem de mudanças da cobertura da terra, onde é dada ênfase aos dados de sensoriamento remoto por constituírem uma importante fonte de dados para esses estudos. Na segunda seção, são apresentadas as etapas de pré-processamento e processamento digital de imagens para tratamento e extração dos dados provenientes de imagens de satélite. A terceira seção, trata da modelagem de sistemas ambientais enfocando os modelos de mudança da cobertura da terra, especialmente o *Land Change Modeler*. A quarta e última seção é dedicada a revisão de alguns conceitos da Ecologia da Paisagem relacionados à análise da estrutura da paisagem.

2.1 Dados para análise e modelagem de mudanças da cobertura da terra

Para análise e modelagem de mudanças da cobertura da terra é necessário utilizar uma série de dados. O emprego desses dados varia de acordo com o objetivo do modelador, com às características da área de estudo e com a disponibilidade dos mesmos. Esses dados podem ser oriundos de levantamentos primários ou de fontes secundárias.

Os dados de entrada para a análise e modelagem podem ser divididos em: dados relacionados às variáveis explanatórias de mudanças da cobertura da terra, que são os dados que explicam indiretamente as mudanças da cobertura; e os dados relacionados diretamente à mudança, que são, por exemplo, aqueles dados gerados a partir da comparação de duas ou mais imagens de satélite que mostram a alteração da cobertura da terra. Os dados relacionados às variáveis explanatórias estão ligados aos aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos. Em relação aos aspectos físicos e bióticos podem-se citar alguns fatores utilizados nesses modelos como: solo, altitude, declividade, precipitação, vegetação e hidrografia, dentre outros. Fatores relacionados com a infraestrutura também podem afetar mudanças da cobertura da terra, como estradas, sedes de municípios, presença de núcleos populacionais, unidades de conservação e de Terras Indígenas. Em relação aos aspectos socioeconômicos podem ser utilizados dados relacionados à economia e demografia, tais como: população, renda, pessoas ocupadas

em determinado setor da economia, Produto Interno Bruto – PIB, produção anual de determinada cultura, entre outros.

Além desses fatores relacionados às variáveis explanatórias, as imagens são de fundamental importância para esses estudos, uma vez que possibilitam mapear a cobertura da terra em diferentes datas e quantificar a alteração da paisagem (PRENZEL, 2004). Os dados de SR, em conjunto com um SIG, viabilizam estudos que analisam a evolução paisagem de uma região com base em uma abordagem multitemporal (GRIGIO, 2003).

Para a modelagem da cobertura da terra, em geral, são utilizados dados ambientais, socioeconômicos e de infraestrutura provenientes de fontes secundárias como as Instituições Governamentais Federais, Estaduais e muitas vezes Municipais. Porém, os dados para mapeamento da cobertura da terra são obtidos por meio de SR, principalmente por meio das imagens de satélite e no caso deste trabalho, provenientes da série LANDSAT desenvolvidos pela *National Aeronautics and Space Administration* – NASA que contribui com o monitoramento da Terra desde o lançamento do LANDSAT 1, em 1972. No Brasil, essas imagens são fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Fora do Brasil, atualmente é possível fazer o *download* de imagens LANDSAT recentes, no site do *United States Geological Survey* – USGS.

Dentre os sensores do LANDSAT, o TM (*Thematic Mapper*) LANDSAT 5 lançado em 1984, coletou imagens até o final do ano de 2011, quando entrou em colapso. A série de imagens TM LANDSAT5 conta com um acervo de 27 anos, o qual é utilizado em estudos de mudança da cobertura da terra. O TM LANDSAT-5 possui resolução temporal de 16 dias, cobertura espacial de 34.225 km², órbita heliosíncrona, resolução radiométrica de 8 bits, e as faixas espectrais e resolução espacial apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do TM LANDSAT-5.

Banda	Região do Espectro	Faixa do Espectro (μm)	Resolução Espacial (m)
1	Azul	0,45 – 0,52	30
2	Verde	0,52 – 0,60	30
3	Vermelho	0,63 – 0,69	30
4	Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90	30
5	Infravermelho Médio	1,55 – 1,75	30
6	Infravermelho Termal	10,4 – 12,5	120
7	Infravermelho Médio	2,08 – 2,35	30

Fonte: INPE (2010).

Após o LANDSAT 7, a continuidade do Projeto LANDSAT contou com o lançamento do satélite LANDSAT 8, em fevereiro de 2013, também pela NASA. Esse satélite, equipado com os sensores OLI – *Operation Land Imager* e TIRS – *Thermal Infrared Sensor*, possui resolução temporal de 16 dias e cobertura espacial de 31.450 km², órbita heliosíncrona, resolução radiométrica de 16 bits, e as resoluções espectral e espacial apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do OLI/TIRS LANDSAT 8.

Banda	Região do Espectro	Faixa do Espectro (μm)	Resolução Espacial (m)
1	Ultravioleta	0,43 – 0,45	30
2	Azul	0,45 – 0,51	30
3	Verde	0,53 – 0,59	30
4	Vermelho	0,64 – 0,67	30
5	Infravermelho Próximo	0,85 – 0,88	30
6	Infravermelho Próximo (stress hídrico I)	1,57 – 1,65	30
7	Infravermelho Próximo (stress hídrico II)	2,11 – 2,29	30
8	Visível (Pancromática)	0,50 – 0,68	15
9	Infravermelho Próximo (Cirrus)	1,36 – 1,38	30
10	Infravermelho Termal I	10,60 – 11,19	100
11	Infravermelho Termal II	11,50 – 12,51	100

Fonte: USGS (2013).

2.2 Processamento digital de imagens

O processamento digital de imagens (PDI) oferece ferramentas para correção e análise de dados de sensoriamento remoto e, tem como objetivo a extração de dados e de informações contidas nas imagens de SR. Dessa forma, por meio da aplicação de técnicas de PDI é possível extrair das imagens os dados necessários para estudos da cobertura da terra, possibilitando gerar, por exemplo, mapas com classes de cobertura da terra em diferentes datas para a análise da mudança. Nesse tipo de estudo, é necessário dedicar atenção especial a alguns processamentos aplicados às imagens, que poderão influenciar no resultado do trabalho, como a correção geométrica, por exemplo. Esse é um procedimento fundamental, uma vez que por se tratar da comparação entre duas imagens, é necessário que as mesmas estejam georreferenciadas num mesmo sistema de referência (datum e sistemas de coordenadas) e projeção, de forma que o ajuste entre elas seja o mais fino possível, para que na análise de alteração da cobertura não sejam contabilizados deslocamentos entre as imagens.

Além disso, por se tratar de um estudo comparativo, os métodos utilizados de segmentação e classificação das imagens, para mapeamento da cobertura da terra, devem ser os mesmos. Isso se faz necessário porque existem diversas metodologias para segmentação e classificação de imagens, que envolvem diferentes algoritmos para agrupamento, e interpretação dos diferentes padrões espectrais. Caso não sejam utilizados procedimentos padronizados nas diferentes imagens, é possível que as diferenças observadas entre os mapeamentos nas diferentes datas seja provenientes do processamento utilizado e não das mudanças em si. A seguir são apresentadas as descrições desses processamentos.

2.2.1 Normalização de imagens de satélite

Nas pesquisas que visam analisar sequências históricas de imagens, o fenômeno da interferência atmosférica é crítico, tendo em vista que as mesmas são coletadas sobre diferentes condições atmosféricas. Para que essas imagens possam ser analisadas comparativamente é necessário aplicar técnicas de correção radiométrica para minimização das interferências (SONG et al., 2001). Dentre os métodos de correção

radiométrica tem-se aquele proposto em Chávez (1988), o qual é baseado na subtração do objeto escuro, sendo que a correção do espalhamento atmosférico é feita a partir da interferência atmosférica estimada pelos números digitais – ND da imagem. Chávez (1988) assume a existência de objetos escuros na cena. Esses objetos podem ser lagoas profundas ou áreas sombreadas, onde a energia eletromagnética (REM) é quase completamente absorvida ou interceptada. Para essas áreas o valor do ND, deveria ser zero ou próximo disso, entretanto, na prática, devido às interferências atmosféricas isso não ocorre.

2.2.2 Correção geométrica

A correção geométrica visa minimizar as distorções existentes na imagem causadas por diversos motivos, tais como: movimento de rotação da Terra durante a aquisição da imagem, curvatura da Terra, variações na altitude, e velocidade do sensor, dentre outros. Basicamente, existem dois tipos de distorções: sistemáticas e aleatórias (LILLESAND e KIEFER, 1994).

Distorções sistemáticas são corrigidas a partir da identificação da sistematização do erro, usando um modelo que descreve a natureza e magnitude das fontes de distorção para estabelecer uma fórmula de correção. A eficiência dessa abordagem só é aplicável quando a natureza da distorção é conhecida, como por exemplo, os efeitos de rotação da Terra. Já a abordagem para correção dos erros aleatórios visa corrigir a geometria das imagens independentemente do usuário saber a origem do erro. Esse método a correção geométrica depende do estabelecimento de relações matemáticas entre a localização dos *pixels* da imagem e suas coordenadas correspondentes num sistema de referência definido para a superfície terrestre (RICHARDS e JIA, 2006). O estabelecimento dessa relação é possível por meio da obtenção de pontos de controle. Esses por sua vez podem ser obtidos em campo, com uso de um sistema de posicionamento (do tipo GPS – *Global Positioning System*), ou em mapas e imagens de referência, oriundos de fontes confiáveis, que contenham feições homólogas à imagem a ser corrigida. Após a obtenção dos pontos de controle, é feita a transformação espacial que modela as distorções entre as imagens através de um método de interpolação que pode envolver

polinômios de primeiro, segundo ou terceiro grau, dependendo da quantidade de pontos de controle e do objetivo do usuário. Para imagens que serão utilizadas para o mapeamento da cobertura da terra recomenda-se a utilização do interpolador vizinho mais próximo, uma vez que nesse método os valores dos *pixels* de entrada não são alterados (MATHER, 2004).

2.2.3 Segmentação e classificação de imagens

Na segmentação, a imagem é particionada em regiões ou objetos que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação (GONZALES e WOODS, 2002). Essas regiões são formadas por um conjunto de *pixels* contíguos que apresentam uniformidade em relação a um dado atributo extraído da imagem, tais como: área, forma, parâmetros estatísticos espectrais e textura. Geralmente, os métodos de segmentação são baseados em dois aspectos principais: descontinuidade e similaridade. Métodos baseados em descontinuidade trabalham com a identificação na imagem das mudanças abruptas de intensidade, como os limiares das imagens. Os métodos baseados em similaridade trabalham com o particionamento da imagem em regiões similares de acordo com alguns critérios pré-definidos, como similaridade e área. Existem diversos algoritmos de segmentação de imagens, como: detecção de descontinuidades, técnicas de limiar e técnicas baseadas em regiões. Neste trabalho é descrito apenas o método de crescimento de regiões, que é a abordagem para segmentação das imagens nele adotada.

Na segmentação por crescimento de regiões a imagem é dividida em um número de regiões homogêneas, onde cada uma é identificada por um rótulo. No início desse processo, a região pode ser composta por um *pixel* ou por um conjunto de *pixels*. O próximo passo é o cálculo de atributos espectrais como, por exemplo, média, variância e textura para cada região. Seguindo um critério de similaridade e um limiar as regiões agregadas. O resultado final é uma imagem rotulada onde as regiões espacialmente adjacentes são agrupadas segundo critérios de similaridade e área (RICHARDS, 1993).

A segmentação de imagem é um procedimento preliminar para a classificação de imagem baseada em região. Nessa abordagem, o elemento de classificação da imagem não é o *pixel*, mas sim um agrupamento de *pixels* resultante da segmentação. Na

classificação de imagens de satélite, o objetivo é criar um vínculo entre as propriedades extraídas dos objetos da imagem com um conjunto de classes rotuladas (RICHARDS e JIA, 2006). É possível separar os métodos de classificação de imagens, segundo três aspectos principais: elemento de classificação (*pixel* ou região), tipo de treinamento (supervisionado e não-supervisionado), e classificador. Em relação ao elemento de classificação há uma vantagem na utilização de classificadores baseados em região em relação ao classificador por *pixel*, uma vez que os métodos de classificação por região são mais precisos (NASCIMENTO, 1997; VASCONCELOS e NOVO, 2004). Isso ocorre, pois os classificadores por regiões utilizam além da informação espectral de cada *pixel*, a relação espacial com um grupo de *pixels* vizinhos reconhecendo áreas homogêneas nas imagens. Assim, nesse método o processamento de imagens procura simular o comportamento de um fotointerprete.

Para os tipos de treinamento para classificação há vantagens e desvantagens na utilização de ambos. No método de classificação não-supervisionado o agrupamento dos *pixels* é feito por meio de *clusters*, que agrupam padrões semelhantes de características espectrais. Nessa abordagem, o usuário interfere na classificação apenas ao apontar o número de classes e iterações desejadas. A vantagem da classificação a partir desse método é que o usuário não precisa ter um conhecimento prévio da área de estudo. A desvantagem é que o usuário tem pouco controle sobre a separação das classes.

Na classificação supervisionada é necessária a especificação de áreas de treinamento, que informam os valores do agrupamento de *pixels* ou regiões que representam uma determinada classe. Assim, a partir de um algoritmo classificador é possível distinguir diferentes classes ou categorias de cobertura presentes na imagem (LO e YEUNG, 2002). Nesse método de classificação o usuário influencia o resultado final, uma vez que é ele quem define as amostras para o algoritmo classificador. A desvantagem desse método em relação à classificação não-supervisionada é a demanda de um tempo de processamento maior, e a vantagem é o maior controle que o usuário tem sobre a definição das classes de cobertura mapeadas. Esse é o método escolhido para classificação de imagens nesta pesquisa, uma vez que como um dos objetivos é comparar

cobertura da terra para diferentes datas, nesse caso, é necessário um maior controle sobre as classes de cobertura.

O algoritmo de classificação escolhido para processamento das imagens foi o da Distância de *Battacharya*, por envolver análise a partir de regiões e pelo fato do treinamento ser supervisionado. O algoritmo de classificação *Battacharya* é utilizado para mensurar a separabilidade estatística de um par de classes espectrais (DPI-INPE, 2011). Essa mensuração é calculada através da distância média entre as distribuições de probabilidade das classes espectrais. Nessa abordagem o algoritmo trabalha com um par de classes de interesse por vez. Assim, baseado no treinamento supervisionado, as regiões são classificadas de acordo com a menor distância de *Battacharya* encontrada em relação à determinada classe e associado à classe mais próxima (menor distância).

Como exemplo de classificadores, O *software* SPRING (CÂMARA et al, 1996), desenvolvido no INPE, é utilizado para segmentação e classificação de imagens e dispõe de diferentes classificadores, opções de treinamento e elemento de classificação, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Classificadores disponíveis no SPRING conforme elemento de classificação e tipo de treinamento

Classificador	Elemento	Tipo de Treinamento
Distância de <i>Battacharya</i>	Região	Supervisionado
Isoseg	Região	Não-supervisionado
ClaTex	Região	Supervisionado
Histograma	Região	Não-supervisionado
Classificação por SNNS (Rede Neural)	Região	Não-supervisionado
Máxima Verossimilhança (MAXVER)	Pixel a pixel	Supervisionado
Contextual (MAXVER-ICM)	Pixel a pixel	Supervisionado
Distância Euclidiana	Pixel a pixel	Supervisionado
KMédias	Pixel a pixel	Não-supervisionado

Após a classificação das imagens, os resultados do mapeamento das classes de cobertura devem ser aferidos. Esse procedimento é necessário, pois os erros estão presentes em qualquer tipo de classificação (CAMPBELL, 1987). Embora diversos, os erros podem estar associados a causas complexas, como o uso de algoritmos de pré-processamento; ou a causas mais comuns, como a indicação indevida de uma classe a uma categoria espectral. Dentre os métodos mais comuns de aferição da classificação

estão a avaliação da matriz de confusão e o índice *Kappa* (ROSENFELD e FITZPATRICK-LINS, 1986).

Segundo Congalton e Green (1999), a matriz de confusão serve para apurar as diferenças entre o resultado da classificação e a realidade em campo, onde na diagonal principal são apontados os *pixels* classificados corretamente. Na soma dos valores marginais de linhas e colunas, são apresentados os erros para cada classe temática. Adicionalmente à matriz de confusão, o índice *kappa*, que mede a probabilidade de um *pixel* ser classificado corretamente em relação à probabilidade de não ser classificado corretamente, também é recomendado para aferição de erros na classificação, uma vez que esse coeficiente mensura o erro total da matriz de erros.

O índice *kappa* (\tilde{K}) pode ser obtido por meio da Equação 1 (CONGALTON, 1991):

$$\tilde{K} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} * x_{+i})} \quad (1)$$

na qual, k é o número de linhas da matriz; x_{ii} é o número de observações na linha i e coluna i ; x_{i+} e x_{+i} são, respectivamente, o total marginal de linhas e colunas; e N é o número total de observações.

2.3 Modelagem de sistemas ambientais

A modelagem tem sido utilizada na busca de entendimento dos mais diversos fenômenos, principalmente nas análises ambientais, pelo caráter analítico dos modelos. Esses modelos são úteis para ajudar a explicar teorias e para melhorar o entendimento dos fenômenos em estudo.

Os modelos são entendidos como uma representação simplificada da realidade, de uma forma idealizada, e possuem limitações características dessa natureza. Por esse motivo, incorporam simplificações para representação da realidade, mais especificamente dos fenômenos modelados, focando em seus aspectos essenciais (CHRISTOFOLETTI, 1999; JAKEMAN et al., 2008; BRITO, 2010).

Os modelos ambientais podem representar os fenômenos estudados de diferentes formas, podendo ser classificados segundo diferentes aspectos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Modelos podem ser classificados de acordo com o caráter estrutural, o aspecto temporal, critérios ligados ao caráter espacial, ou ainda, de acordo com às características probabilísticas.

Em relação ao aspecto estrutural os modelos podem ser classificados em modelos conceituais e empíricos. Os modelos conceituais têm como base a descrição dos processos físicos dos fenômenos modelados através de representações matemáticas simples que estabelecem as relações entre as variáveis. Os modelos empíricos representam os fenômenos modelados sem considerar os processos físicos, esses modelos são baseados em representações matemáticas dos conhecimentos ou experiências adquiridas a partir de observações dos fenômenos ambientais (TUCCI, 2005).

O aspecto temporal dos modelos está relacionado a como o modelo representa o estado de um conjunto de variáveis ao longo do tempo. Se essa representação é feita por um único passo de tempo e somente nesse momento, o modelo é chamado de estático. Quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos de tempo, então o sistema é dito discreto. Quando as representações das mudanças de estado modelam o comportamento dos fenômenos ao longo do tempo de forma ininterrupta, o modelo é dito contínuo ou dinâmico. Nesse caso, o passo de tempo varia conforme as características do fenômeno estudado e a precisão que se busca com a modelagem, tendo em vista que quanto menor o intervalo de tempo, maior a precisão e maior é o custo computacional e a complexidade do modelo.

Em relação a forma de representação dos fenômenos estudados, os modelos ambientais podem representar os valores das variáveis para a área de estudo como uma média de valores para toda área ou com valores distribuídos no espaço. Quando o modelo utiliza uma média para toda área de estudo, a forma de representação espacial é dita concentrada. Já nos modelos distribuídos, a variação espacial das variáveis se dá de forma distribuída ao longo da área de estudo (TUCCI, 2005).

Quanto ao aspecto probabilístico, Dooge (1973) definiu que a diferença entre os tipos de sistema está relacionada com as entradas e saídas. Considerando um mesmo valor de entrada e mesma condição inicial do sistema: um sistema que produz sempre a mesma saída para a mesma entrada é chamado de um sistema determinístico. Quando o sistema considera a chance de ocorrência das variáveis através de relações estatísticas entre os valores de entrada e saída, o modelo é estocástico. Nesse caso, para uma mesma entrada pode haver diferentes saídas.

Considerando as diferentes características dos modelos, esses têm sido utilizados em diferentes aplicações para análise e monitoramento dos sistemas ambientais. Diversas áreas do conhecimento, como climatologia, hidrologia e geografia têm utilizado os modelos para representação dos sistemas ambientais. Por meio dessas representações é possível simular cenários futuros, classificando os modelos não apenas como uma ferramenta de análise, mas, sobretudo como uma ferramenta de planejamento.

Para o monitoramento de mudanças de uso e cobertura da terra, são utilizados os modelos computacionais ou plataformas de detecção de mudança do tipo LUCC (*Land Cover and Use Change*). Esses *softwares* dispõem de ferramentas que permitem ao modelador construir um arcabouço de modelagem capaz de auxiliar na exploração de hipóteses sobre as causas das mudanças, no estabelecimento das relações causais e os fatores associados a ela, nas projeções e na exploração de diferentes cenários (VELDKAMP, 2004). Os modelos podem ser construídos em uma interface específica, voltada para a análise de um fenômeno, ou implementados em plataformas de modelagem, onde é possível desenvolver diferentes tipos de modelo, inclusive para análise de mudança da cobertura da terra. Na Tabela 4 são apresentados alguns dos principais modelos e plataformas utilizados na modelagem LUCC.

Tabela 4 – Exemplos de modelos e plataformas LUCC.

<i>Software</i>	Autor(es)	Local de Desenvolvimento	Algumas Aplicações	Descrição
DINAMICA EGO	Soares-Filho (1998)	CSR-UFMG	Almeida et al. (2003); Soares-Filho et al. (2004); Rodrigues et al. (2007); Bastos (2007).	Plataforma de modelagem voltada para implementação de modelos ambientais espacialmente explícitos de diversas áreas.
TerraME	Carneiro (2006)	INPE	Carneiro (2006); Aguiar (2006); Moreira et al. (2009)	Ambiente de programação para a modelagem espacial dinâmica. Suporta autômatos celulares, modelos baseados em agentes e modelos de rede que funcionam em espaços celulares 2D.
Patuxent Landscape Model	Voinov et al. (1999).	UMCES	Voinov et al. (1999); Binder et al. (2003); Voinov et al. (2007)	Utilizado para simular os processos ecológicos fundamentais na escala da bacia hidrográfica, em interação com um componente socioeconômico que prevê os padrões de uso da terra.
CLUE-S	Veldkamp e Fresco (1996)	IVM – Institute for Environment Studies	Verbug et al. (2002); Castela et al. (2007); Hurkmans et al. (2009); Trisurat et al. (2010)	Modelo desenvolvido para simular uso e cobertura da terra em escala regional utilizando relações empiricamente quantificadas entre as mudanças e seus fatores determinantes.
Land Transformation Model (LTM)	Pijanowski et al. (2002)	Perdue University	Pijanowski et al. (2002); Tang et al. (2005); Pijanowski et al. (2005)	<i>Software</i> baseado na arquitetura do ArcGIS, que permite criar cenários de mudanças no uso e cobertura da terra a partir de dados multitemporais relacionados a mudança.
Land-Use Change Analysis System (LUCAS)	Berry et al. (1994)	Department of Computer Sciences - University of Tennessee	Berry et al. (1994); MacIntyre et al. (1994); Berry et al. (1996)	Ferramenta multidisciplinar de modelagem da cobertura da terra utilizada para examinar a relação das atividades humanas com as mudanças e suas conseqüências para sustentabilidade.
Land Chage Modeler (LCM)	Eastman, et al (2007)	Clark Labs – Clark University	Johnson (2009); Umbelino e Barbiere (2010); Piroli et al. (2011); Islam e Ahmed (2011)	Conjunto de ferramentas implementadas no ArcGIS que permitem a análise, modelagem e simulação das mudanças da cobertura da terra e suas conseqüências para biodiversidade.

Diante de inúmeros modelos computacionais, a escolha do mais adequado varia em função das particularidades de cada fenômeno e passa pela avaliação de alguns passos básicos, como: a relevância do modelo; os recursos; suporte do modelo; expertise necessária; dados de entrada; acurácia; resolução espacial; resolução temporal; versatilidade; interface com outros *softwares*; acessibilidade; aplicabilidade; referências de aplicações (EPA, 2000). Esses elementos são descritos a seguir.

A relevância do modelo está relacionada à sua capacidade de fornecer um conjunto de ferramentas aos modeladores, que possibilite a obtenção de informações sobre as mudanças da cobertura da terra pertinentes às necessidades analíticas daquela comunidade. Alguns modelos possuem limitações quanto a modelagem de mudanças relacionadas à causas complexas, pelo fato de, por exemplo, terem uma abordagem mais simples sobre a interação das mudanças com as variáveis explanatórias. Nesse caso, o resultado dessa modelagem possivelmente não retornaria para a comunidade informações relevantes relacionadas à dinâmica de mudança da cobertura da terra.

Quanto aos recursos, o uso de um determinado modelo envolve a avaliação dos custos financeiros e computacionais requeridos para instalação e funcionamento do mesmo.

Para o suporte do modelo é preciso avaliar se o modelo computacional dispõe de suporte ao usuário por meio de seus desenvolvedores ou carrega consigo uma documentação suficiente para entendimento e implementação do modelo.

No que tange o conhecimento necessário, quanto mais sofisticado for o modelo computacional, maior será a expertise exigida para sua operação. Dessa forma, é preciso avaliar esse aspecto na escolha do modelo computacional, uma vez que o tempo para aprendizagem de uma determinada linguagem pode não ser compatível com o tempo de execução dos projetos.

Quanto aos dados de entrada, é necessária clareza de quais são os dados mínimos para modelagem, certificar-se da disponibilidade e adequação dos mesmos em relação ao formato de entrada.

A acurácia do modelo refere-se ao quão bem o modelo responde às questões propostas e o quanto se aproxima da realidade. Geralmente modelos mais complexos, que envolvem

maior número de variáveis explanatórias retornam resultados mais específicos e podem simular melhor as mudanças de cobertura do que modelos simples que com maior dependência de inferências estatísticas.

A resolução espacial refere-se a menor unidade de terreno que o modelo reconhece. Alguns modelos conseguem trabalhar com uma resolução espacial mais fina e são mais recomendados para modelagem da mudança da cobertura de áreas menores. Outros modelos são voltados para grandes áreas e, portanto, trabalham com uma resolução espacial menor, sendo mais recomendados para estudos regionais.

A resolução temporal refere-se ao período de tempo que um modelo é capaz de examinar e ao comprimento de cada um desses períodos. Por exemplo, um modelo pode projetar mudanças de cobertura da terra para os próximos 50 anos, em intervalos de 10 anos. Porém, em alguns modelos os intervalos são fixos, o que inviabiliza a obtenção dos resultados da modelagem em intervalos de tempo mais flexíveis.

A versatilidade está relacionada com a habilidade do modelo em avaliar e integrar múltiplas variáveis. Geralmente, quanto mais versátil for o modelo, mais complexo ele será. Isso faz com que consequentemente a exigência de expertise e os dados de entrada aumentem.

Quanto a interface com outros *softwares* e ferramentas, incluindo principalmente os SIG, tem-se que modelos computacionais que possibilitam a conexão de suas entradas e saídas com outros *softwares* podem facilitar as interpretações dos resultados e tornar as informações utilizáveis de diferentes formas.

A acessibilidade refere-se ao fato do modelo retornar resultados compreensivos ao público. A aplicabilidade está ligada a capacidade de aplicação do modelo em diferentes áreas. Alguns modelos são construídos para modelagem de regiões e áreas específicas, o que pode limitar seu uso.

As referências de aplicações possibilitam a utilização de modelos com diversas aplicações, o que é mais recomendável, uma vez que pode representar a obtenção de melhores resultados na modelagem – principalmente para projetos similares. Adicionalmente, um modelo mais extensivamente utilizado, possivelmente terá mais

referências ligada a eficiência do mesmo. Contudo, isso não quer dizer que modelos em desenvolvimento ou pouco utilizados não sejam adequados.

A escolha do *software* de modelagem no presente estudo levou em conta os aspectos citados anteriormente, e, em face ao exposto, o modelo escolhido foi o LCM. Esse *software* apresenta diversas vantagens, como interface computacional amigável, menor tempo para aprendizagem da linguagem específica de modelagem, interface em ambiente SIG, facilitando a entrada de dados, e referências na literatura de aplicações bem sucedidas. Uma revisão das principais características do LCM é apresentada na Seção 2.3.1.

2.3.1 *Land Change Modeler*

O *Land Change Modeler* (LCM) foi desenvolvido pelo Clarck Labs, e é voltado para análises que envolvem alterações do uso e cobertura da terra e suas implicações (CLARCK, 2009). Na sua versão atual é acoplado a plataforma ArcGIS e resultado da adaptação do *The Land Change Modeler for Ecological Sustainability*, criado para integrar a plataforma IDRISI. Esse sistema dispõe de ferramentas capazes de auxiliar os modeladores na mensuração das áreas de mudança, persistência e de realizar a predição da mudança a partir da análise de informações de uso e/ou cobertura da terra multitemporais (JOHNSON, 2009). A previsão de mudanças é feita a partir do cálculo da matriz de transição oriunda da comparação de mapas da cobertura da terra de duas datas distintas e da interação dessas com as variáveis explanatórias das mudanças (SIRIKULCHAYANON et al., 2008). O esquema geral do funcionamento do LCM é apresentado na Figura 1.

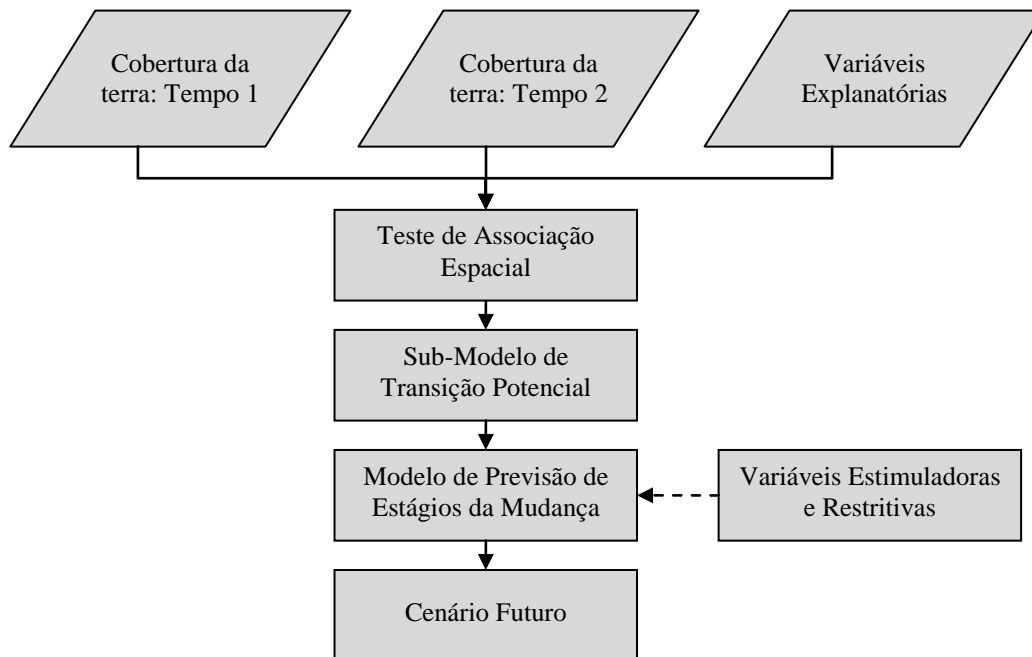


Figura 1 – Esquema geral de funcionamento do LCM para análise da mudança de uso e cobertura da terra.

Fonte: Adaptada de Clarcks Lab (2009).

A partir da entrada dos mapas de cobertura da terra dos tempos 1 e 2, o usuário constrói um sub-modelo de transição potencial baseado nas transições de classes de cobertura de interesse e numa série de variáveis explanatórias (distância de rodovias, distância de cursos d'água, tipos de solo, pluviosidade, número de habitantes, distância de núcleos urbanos, dentre outras) que condicionam essas trocas. Os dados de entrada em modelos foram discutidos de forma genérica na Seção 2.1. Uma vez definido o sub-modelo de transição, é possível então gerar as transições potenciais que tratam da alocação da mudança no espaço e no tempo. De forma adicional, o modelo permite a incorporação de variáveis restritivas e estimuladoras, como por exemplo, as áreas de unidades de conservação de proteção integral, podem ser consideradas variáveis restritivas às mudanças de cobertura da terra. Nesse caso, mesmo que a tendência modelada seja de mudança, é possível restringir essa tendência configurando essas áreas como variáveis restritivas. Por outro lado, as variáveis estimuladoras, como projetos de implantação de rodovias, por exemplo, conferem um maior potencial de mudança.

O LCM é dividido em módulos que no conjunto permitem ao modelador: avaliar, validar e prever alterações na cobertura da terra. Os cinco módulos que compõem o LCM são: módulo de análise de mudança, módulo de mensuração das transições potenciais, módulo de previsão de mudança, módulo de avaliação dos impactos da mudança e módulo de planejamento. Na Figura 2 é apresentada a estrutura geral do LCM quanto a esses módulos.

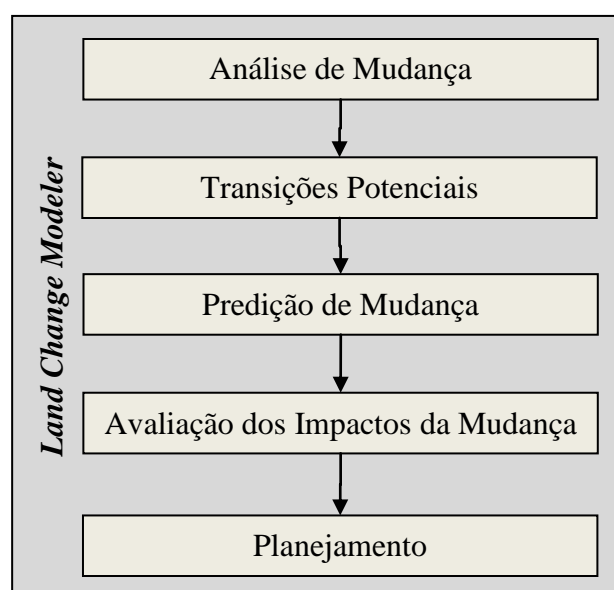


Figura 2 – Módulos do *Land Change Modeler*.
Fonte: Adaptada de Clarcks Lab (2009).

No módulo de análise de mudança são quantificadas e mapeadas algumas informações que permitem melhor entendimento sobre as mudanças da cobertura da terra analisada. Essas informações estão relacionadas com o mapeamento das áreas de mudanças, das áreas de persistência, das perdas e ganhos para cada classe de cobertura e das transições entre as classes de cobertura. A partir da interpretação dos dados desse módulo, o usuário dispõe de informações exploratórias que permitem entender como se dá a mudança de cobertura, que serão utilizadas como subsídios para levantamento de possíveis variáveis explanatórias. A interação da mudança da cobertura da terra com as variáveis explanatórias se dá no módulo seguinte onde são definidas as transições potenciais.

No módulo de transições potenciais, apresentado esquematicamente na Figura 3, é definido o sub-modelo de transição potencial baseado na interação entre as trocas de interesse do usuário e uma série de variáveis explanatórias, como as citadas anteriormente. A incorporação das variáveis explanatórias no modelo tem como objetivo embasar as trocas entre as classes de cobertura da terra. Essas variáveis passam antes por um teste estatístico, o teste Cramer-V (Seção 2.3.1.1), que tem como objetivo mensurar a dependência ou associação espacial entre duas variáveis. As variáveis explanatórias escolhidas são agregadas ao sub-modelo de transição potencial. Na etapa seguinte, é feita a modelagem da alocação de mudança utilizando uma rede neural multicamadas (*Multi Layer Perceptron Neural Network* – MLPNN, descrita na Seção 2.3.1.2).

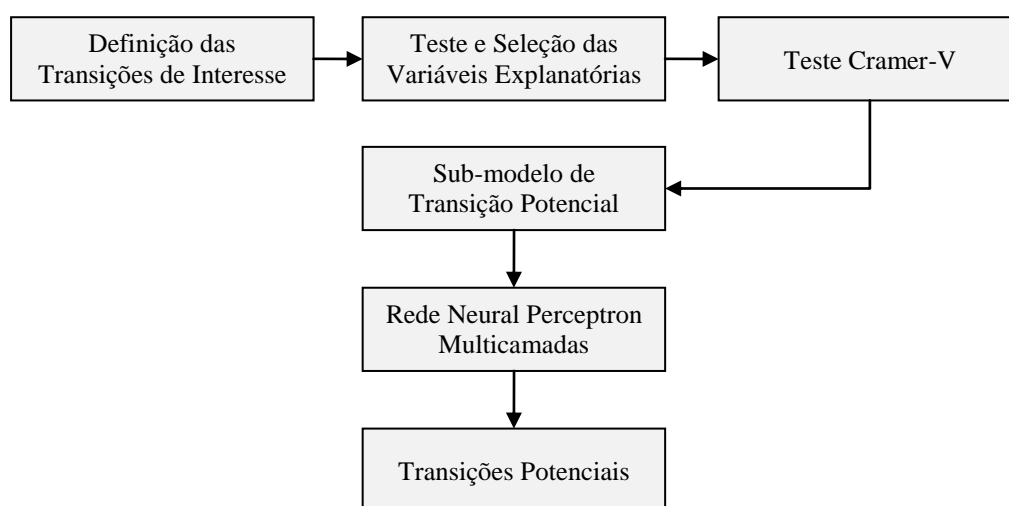


Figura 3 – Estrutura do módulo de transição potencial.

A saída do sub-modelo de transição potencial, da Figura 3, é a alocação das áreas de transição potencial para cada uma das trocas de interesse estabelecidas na construção do sub-modelo.

A partir das transições definidas no módulo de transições potenciais, a quantidade e a alocação da mudança da cobertura da terra são definidas e o módulo de predição de mudança utiliza essas informações para realizar a modelagem. A quantidade de mudança é modelada a partir de uma cadeia de Markov (Seção 2.3.1.3), baseada na matriz de transição. Ou seja, por meio da cadeia de Markov são calculados quantos

pixels irão mudar de estado. Já a alocação da mudança pode ser realizada por meio do método *soft prediction* ou do método *hard prediction*. No primeiro, é feita a caracterização do *pixel* quanto a maior probabilidade de mudança. Nesse cenário suavizado o resultado representa a vulnerabilidade à mudança, criando uma classificação das áreas menos propensas às mais propensas à mudança. No método *hard prediction* é utilizado um algoritmo de multicritério para gerar um cenário de mudança rígido, resultando num mapa para o tempo futuro com as mesmas classes dos mapas de entrada (EASTMAN, 2009).

No módulo de avaliação dos impactos da mudança é possível analisar o impacto das mudanças de cobertura da terra para a biodiversidade e os habitats naturais. Nesse caso é possível realizar uma análise do impacto que as alterações na cobertura da terra têm sobre espécies específicas de interesse do usuário. Isso pode ser feito através de um modelo de distribuição de espécies acoplado ao LCM.

No módulo de planejamento é permitido ao usuário incluir na modelagem intervenções do presente ou planejadas, que podem alterar a trajetória da mudança da cobertura da terra. Nesse módulo são feitas as entradas das variáveis restritivas ou estimuladoras à mudança.

2.3.1.1 Teste de Cramer-V para mensuração da associação espacial das variáveis explanatórias e áreas de mudança

O teste de Cramer-V é um teste estatístico não paramétrico, ou seja, é aplicável independente da distribuição das variáveis. É utilizado para medir a força de associação entre duas variáveis (LIEBERTRAU, 1983). Por meio desse teste, caso seja rejeitada a hipótese de independência entre os atributos, é possível medir a intensidade dessa associação, uma vez que essa abordagem mede o afastamento em relação à hipótese de independência. O V de Cramer é obtido pela Equação (2) (LIEBERTRAU, 1983):

$$v = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (2)$$

na qual χ^2 é o coeficiente Chi-quadrado $((O - E)^2 / 2)$, O é a frequência observada para uma categoria e E é a frequência esperada na categoria correspondente, n é o tamanho da amostra; q é o menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura da terra.

O teste Cramer-V funciona como o Chi-quadrado reescalado, para retornar valores entre zero e um, onde um significa associação completa e zero independência.

No LCM esse teste pode ser executado ou não. Segundo Eastman (2009), um valor de Cramer alto indica que o potencial explanatório da variável é bom, embora isso não garanta um desempenho ótimo do modelo; contudo, é um bom indicativo de que a variável pode ser utilizada para explicar as transições. Geralmente um valor de Cramer maior ou igual a 0,10 é recomendável para que a variável seja adicionada como explanatória no sub-modelo de transição potencial.

2.3.1.2 Rede neural perceptron multicamadas

Os modelos baseados em rede neural *perceptron* multicamada (MLPNN, sigla do inglês *Multi-Layer Perceptron Neural Network*) têm origem nas redes neurais artificiais – RNA, que de maneira genérica são modelos matemáticos que tentam imitar o funcionamento das estruturas de redes neurais biológicas, incorporando a capacidade de adquirir conhecimento por meio de um processo de aprendizagem. Nesse processo, as conexões entre os neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido (HAYKIN, 2001). Para Affonso et al (2010), as RNA tem capacidade acumulada por meio de aprendizado e generalização. Enquanto o aprendizado é adquirido através dos exemplos apresentados à rede, a generalização é a capacidade de apresentar respostas coerentes mesmo para dados não apresentados na etapa de aprendizado. Por esse motivo, as RNA são utilizadas para reconhecimento de padrões. Além da MLPNN, existem outros modelos para implementação da estrutura RNA, como: *Least Mean Square* – LMS, *Self-Organizing Map* – SOM e *Radius Basis Function* – RBF (HAYKIN, 2001).

A MLPNN é baseada em redes neurais artificiais, que estabelece múltiplas ligações entre as variáveis e as demais camadas de entrada do modelo através de uma rede de neurônios artificiais. As redes neurais do tipo MLPNN, de múltiplas camadas, se

diferem das redes neurais simples pelo número de camadas intermediárias entre as camadas de entrada e saída. Na camada de entrada, não há nenhum tipo de processamento, há apenas a propagação das informações de entrada para a camada seguinte. Nas camadas intermediárias, que são camadas ocultas, são onde atuam os neurônios ocultos capazes de intervir na rede neural, adicionando uma ou mais camadas ocultas, aumentando assim o poder de solução da rede. Nessa etapa acontecem os processamentos, que são transmitidos por meio de conexões entre as camadas de entrada e saída. Cada conexão tem um peso específico. Na camada de saída, as informações das camadas ocultas são recebidas, e são geradas as saídas (HAYKIN, 2001). No caso do LCM, a MLPNN é treinada por um algoritmo do tipo *backpropagation* (retro-propagação). Esse algoritmo treina a rede através da aprendizagem por correção dos erros. A partir de uma saída, o erro é calculado, os valores desse erro são então retro-propagados na rede. Durante essa retro-propagação os pesos nas camadas ocultas são reajustados e novos valores são apresentados a rede. Isso acontece até que o número de iterações definidas pelo usuário seja alcançado, ou que a acurácia da resposta do modelo atinja 100%.

Na paisagem, as relações entre as alterações da cobertura da terra e as variáveis que explicam as mudanças de cobertura da terra normalmente possuem comportamento não linear. Dessa forma, a análise dessas relações requer o emprego de uma modelagem capaz de lidar com relações mais complexas, relações não lineares. Nesse sentido, modelos baseados em MLPNN têm melhor desempenho ao modelar as relações nem sempre diretas que condicionam as mudanças (LEK et al, 1996).

2.3.1.3 Cadeias de Markov

O LCM utiliza cadeias de Markov para predição da matriz de transição em relação à quantidade de mudança (EASTMAN, 2009). Esse processo realizado através de cadeias de Markov é feito a partir do cálculo da probabilidade da distribuição dos valores em um dado estágio de um sistema, sendo que os estágios futuros não dependem dos estágios anteriores, apenas do estágio atual (GUAN et al. 2008). Nessa abordagem as classes de cobertura da terra do tempo futuro (t') são baseadas num processo

estocástico, ou seja, baseadas apenas no estágio anterior imediato ($t-1$). Dessa forma, as transições entre um mapa de cobertura da terra do tempo 1 (t_1) e tempo 2 (t_2) são utilizadas como exemplo para prever a cobertura da terra do tempo futuro (t') (BAKER, 1989).

2.4 Análise da alteração da estrutura da paisagem apoiada por métricas de paisagem

Existem diferentes conceitos para definição da paisagem, Alexander V. Humboldt no século XIX, dentro de uma abordagem geográfica, a definiu como a “totalidade das características de uma região do planeta”. Bertrand (1968) definiu paisagem como determinada porção do espaço resultante da interação perpétua dos elementos biológicos, físicos e humanos. Call Troll, em 1971, apresentou um conceito de paisagem integrada, como uma entidade espacial e visual total do espaço (NAVEH e LIEBERMAN, 1994), introduziram a noção de heterogeneidade do espaço. Numa abordagem voltada para estudos ecológicos, de conservação e quantitativos, Turner e Gardner (1991) definem paisagem como uma área espacialmente heterogênea onde três características fundamentais devem ser consideradas: estrutura, função e alterações. A estrutura diz respeito as relações espaciais entre os diferentes elementos da paisagem (tamanho, quantidade, formas e configurações); a função se refere à interação entre os elementos espaciais (por exemplo, fluxo de energia, fluxo gênico, etc); e as transformações de áreas compostas por elementos interativos da paisagem. Nessa abordagem ecológica a paisagem passa a ser representada por três elementos: *manchas*, *corredores* e *matriz*, representados esquematicamente na Figura 4. Esses elementos são facilmente observados em paisagens fragmentadas, onde restaram pequenas manchas de remanescentes florestais em uma paisagem onde hoje predomina a pastagem, como é o caso de grande parte da região sudeste do Brasil. Esses elementos são definidos a seguir, de acordo com Forman e Godron (1986).

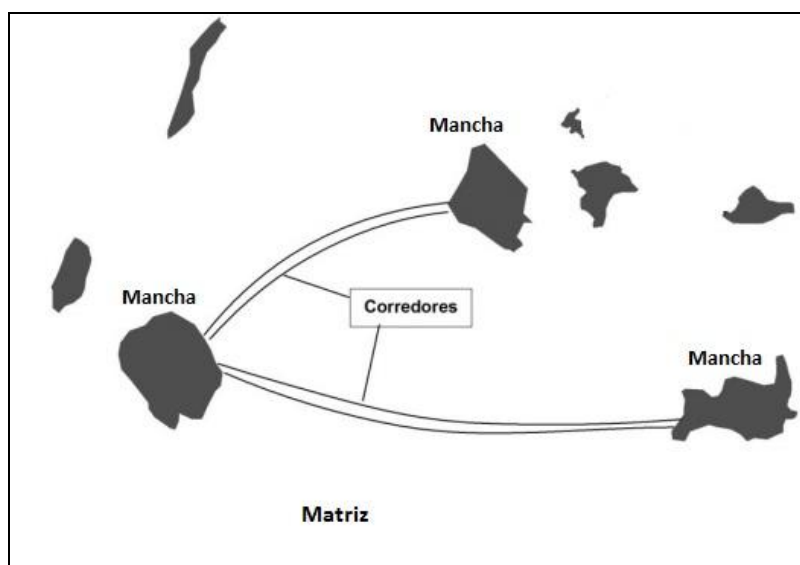


Figura 4 – Modelo mancha, corredor e matriz.
 Fonte: Adaptada de Lang e Blaschke (2009).

Manchas são coberturas não-lineares e homogêneas que se distinguem em aparência da vizinhança. As manchas podem variar conforme tamanho, forma, tipo, heterogeneidade e topologia. As manchas estão inseridas na matriz e sua origem pode estar relacionada a aspectos como: perturbações provocadas por aspectos naturais ou interferências humanas; manchas que são remanescentes de perturbações; manchas oriundas de regeneração; manchas estáveis que estão relacionadas ao recurso ambiental; manchas efêmeras relacionadas a concentrações sazonais como migrações.

Os fatores que influenciam e controlam as manchas são o tamanho e forma. O tamanho da mancha está relacionado a dimensão em área, e influencia os níveis de energia, nutrientes disponíveis e o número, tipo e fluxo de espécies. A forma guarda relação direta com o efeito de borda uma vez que a relação entre a área interna e a borda influencia diversas características ecológicas. Assim, o interior da mancha pode ter características diferentes em relação aos limites das manchas.

As mudanças de cobertura da terra interferem nas manchas de vegetação alterando sua dimensão e forma. Conseqüentemente, a distância entre as manchas de uma matriz aumentam, culminando num processo de fragmentação. Nesse contexto, a conectividade é mantida pelos *Corredores*. Esses correspondem às estruturas lineares homogêneas que

diferem da vizinhança e conectam pelo menos dois fragmentos anteriormente unidos. Os corredores têm o papel de facilitar os fluxos (hídricos e biológicos), reduzir os riscos de extinção local, favorecer as recolonizações, fomentar o suplemento de habitat, de refúgio nas ocorrências de perturbações e facilitar a propagação de algumas perturbações (como o fogo).

A *matriz* é o elemento mais extenso e conectado da paisagem, e, portanto, desempenha um papel dominante em seu funcionamento. Geralmente a matriz possui contornos que enclausuram os demais elementos da paisagem. Os critérios para definição da matriz em relação aos outros elementos da paisagem são: a área relativa, a conectividade e o controle da dinâmica da paisagem. Em relação à área relativa, quando um tipo de elemento numa paisagem é consideravelmente mais extenso que os outros, é lógico considerá-lo como a matriz. A conectividade auxilia na identificação da matriz uma vez que essa apresenta maior grau de conectividade do que qualquer outro elemento da paisagem. O controle da dinâmica da paisagem está relacionado à matriz uma vez que essa unidade é a que dá origem a paisagem futura.

Na análise da paisagem a interpretação dos padrões espaciais de seus elementos, pode ser feita a partir de métricas (de forma, tamanho, composição, conectividade, etc.) uma vez que suas características estruturais são observáveis, descritíveis e quantificáveis (LANG e BLASCHKE, 2009). Essas análises buscam avaliar o grau de fragmentação e suas implicações para a conservação. A seguir serão descritas as métricas utilizadas nesse trabalho.

A métrica da área é uma das métricas de análise da paisagem mais simples e mais utilizadas nos estudos de ecologia da paisagem. Essa medida é a base do conhecimento da paisagem, pois em geral é relevante saber o quanto de uma determinada cobertura da terra existe na paisagem analisada (LANG e BLASCHKE, 2009).

A métrica do número de manchas é uma medida direta do grau de subdivisão de um determinado tipo de mancha na paisagem. Embora não represente uma medida explicitamente espacial como a área, representa a configuração da paisagem ao identificar o número de manchas de uma determinada classe de mancha na paisagem.

A métrica de área núcleo, ou área central, expressa com o grau de estabilidade dos fragmentos, uma vez que parte do pressuposto que as áreas mais próximas à borda são influenciadas por efeitos externos, e que por esse motivo, no setor interno, predominam condições ecológicas que conservam as condições originais e que favorece a conservação do fragmento florestal. Isso quer dizer que o núcleo das manchas apresenta condições ecológicas diferentes das bordas, e por esse motivo, nos núcleos é possível encontrar relações ecológicas mais complexas do que nas bordas das manchas. A área núcleo é definida como a área dentro de um fragmento separada da sua borda por uma distância pré-definida (VOLOTÃO, 1998).

Para avaliar o grau de isolamento das manchas na paisagem são utilizadas métricas como, por exemplo, a distância euclidiana entre as manchas de mesma classe, que é uma medida indicativa do grau de proximidade ou isolamento das manchas.

Os estudos apoiados por métricas de paisagem buscam de modo geral, avaliar o nível de fragmentação da estrutura da paisagem, analisando as implicações ecológicas desse processo. A fragmentação é a transformação da estrutura da paisagem através do fracionamento de áreas homogêneas decorrentes de causas naturais e antrópicas. As informações decorrentes da análise da estrutura da paisagem podem ser utilizadas como suporte para tomada de decisões, como por exemplo, a formação de corredores ecológicos e identificação de manchas para conservação. Desse modo, num cenário onde as intervenções nas paisagens naturais são cada vez mais impactantes, o estudo da alteração da paisagem apoiado por métricas de paisagem contribui com as análises ambientais. Portanto, as métricas de paisagem não são apenas medidas estruturais, mas a interpretação apropriada das suas informações possibilita, sobretudo, seu uso como um instrumento de apoio a gestão da paisagem.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização geográfica

Para melhor entendimento da dinâmica de alteração da paisagem dessa região, a definição da área de estudo dessa pesquisa incorporou as áreas completas dos municípios que compõem a bacia do Rio Piracicaba e a RMVA – Região Metropolitana do Vale do Aço, totalizando 21 municípios. Essa proposta de área de estudo foi pensada para contemplar a dinâmica da expansão do eucalipto, que na região do Vale do Aço ocorre principalmente na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e na RMVA que abriga indústrias siderúrgicas e de papel e celulose. No mapa da Figura 5 é mostrada essa área e a sua localização geográfica.

A bacia do Rio Piracicaba faz parte do alto curso do Rio Doce, abrigando importante área de recarga hídrica. Além disso, essa bacia abrange parte do Quadrilátero Ferrífero e do Vale do Aço, regiões onde estão localizados municípios ligados a práticas econômicas como mineração, indústria siderúrgica e indústria de papel e celulose. A RMVA, instituída pela Lei Complementar 51/1998 (MINAS GERAIS, 1998) é composta pelos seguintes municípios: Ipatinga, Coronel Fabriciano, Timóteo e Santana do Paraíso.

3.2 Histórico de ocupação

O histórico de ocupação da área de estudo remonta ao ciclo do ouro no Brasil Colônia, onde a exploração dos recursos naturais da região teve início, e desde então, é marcado por práticas extrativistas exploratórias. Embora, a intensificação da instalação de indústrias tenha ocorrido a partir da década de 1940, os principais marcos que desencadearam os processos de transformação da paisagem datam do início do século XX. O primeiro, em 1903, foi a implantação da Ferrovia Vitória-Minas. A seguir, em 1937, inicia-se a chegada da siderurgia com a implantação da Usina Belgo Mineira. Em 1942 foi a vez da chegada da então Companhia Vale do Rio Doce, e logo após, a Companhia de Aços Especiais de Itabira (ACESITA), em 1944, a Usina Siderúrgica de

Minas Gerais S/A (USIMINAS), em 1956, e a Celulose Nipo-Brasileira (CENIBRA), em 1973.

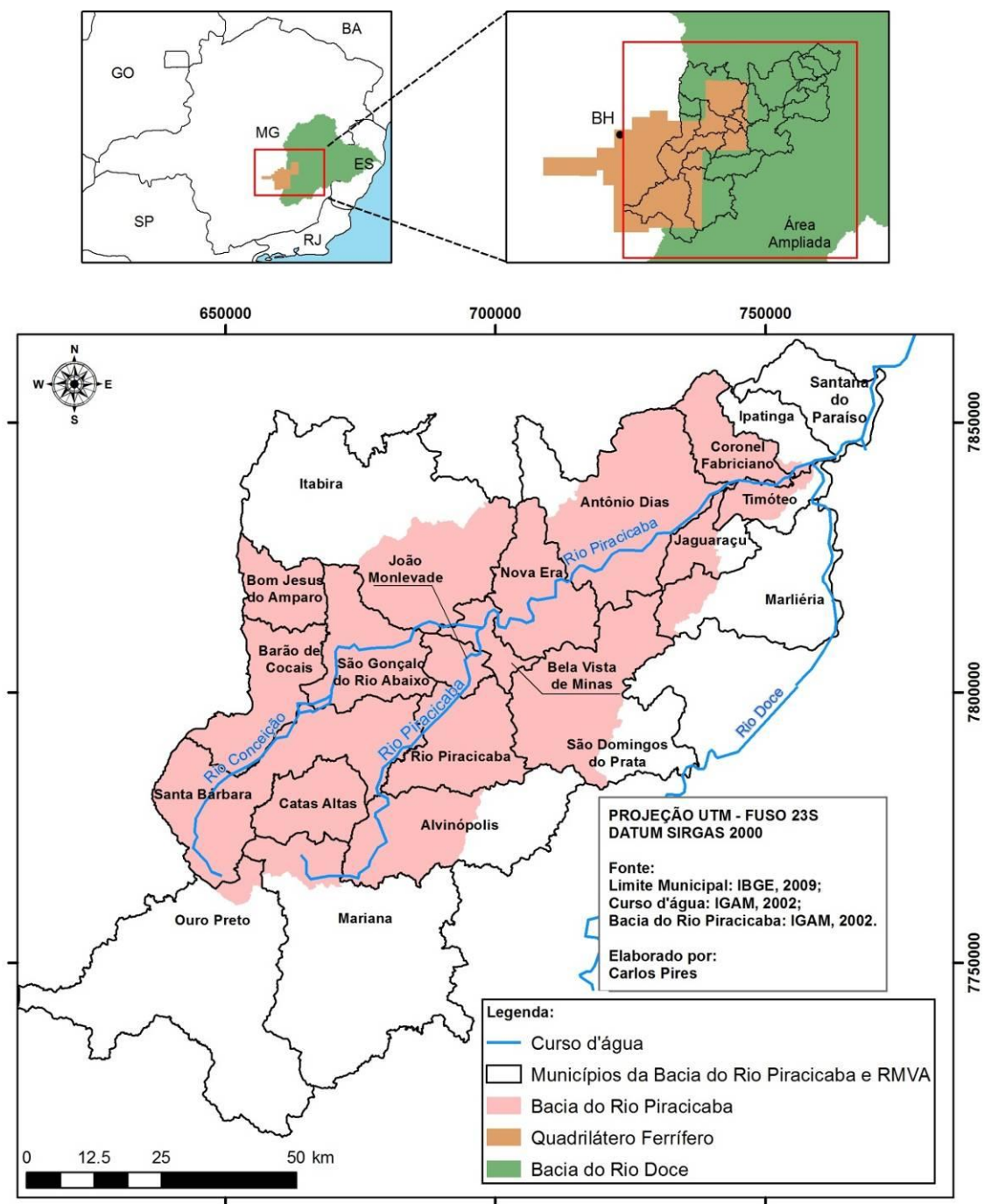


Figura 5 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, dos municípios dessa bacia e dos municípios da RMVA.

Durante esse período, como consequência e atrativo natural dessas grandes empresas, ocorreu a chegada de infraestrutura e força de trabalho, reforçando ainda mais os elementos de transformação da paisagem na região. Atividades como a exploração do carvão vegetal pelas siderúrgicas, manejo inadequado das empresas reflorestadoras e crescimento urbano desordenado têm transformado o quadro natural da região (GUERRA, 1993).

3.3 Demografia

Segundo dados do Censo IBGE a população total em 1980 era de 613.332 habitantes (IBGE, 1980) e passou, em 2010, para de 926.861 habitantes (IBGE, 2010). O crescimento da população total no período foi de 33,82%. O histórico do crescimento populacional por município é apresentado na Tabela 5, pelos dados de população total do IBGE (1980, 1991, 2000, 2010).

Tabela 5 – População total por município para 1980, 1991, 2000 e 2010.

Município	População Total				Crescimento (%)
	1980	1991	2000	2010	
Alvinópolis	15.047	15.324	15.588	15.261	1,40
Antônio Dias	10.663	9.772	10.044	9.565	-11,48
Barão de Cocais	15.293	20.291	23.391	28.442	46,23
Bela Vista de Minas	9.915	9.594	9.846	10.004	0,89
Bom Jesus do Amparo	4.322	4.951	4.817	5.491	21,29
Catas Altas	–	–	4.241	4.846	12,48
Coronel Fabriciano	75.701	87.439	97.451	103.694	27,00
Ipatinga	150.318	180.069	212.496	239.468	37,23
Itabira	71.114	85.606	98.322	109.783	35,22
Jaguaraçu	2.051	2.745	2.855	2.990	31,40
João Monlevade	48.198	59.340	66.690	73.610	34,52
Mariana	29.401	38.180	46.710	54.219	45,77
Marliéria	4.111	3.540	40.44	4.012	-2,47
Nova Era	14.679	17.605	17.754	17.528	16,25
Ouro Preto	53.413	62.514	66.277	70.281	24,00
Rio Piracicaba	12.613	13.676	14.138	14.149	10,86
Santa Bárbara	18.057	25.931	24.180	27.876	35,22
Santana do Paraíso	–	–	18.155	27.265	33,41
São Domingos do Prata	17.742	18.742	17.642	17.357	-2,22
São Gonçalo do Rio Abaixo	10.093	8.322	8.462	9.777	-3,23
Timóteo	50.601	58.298	71.478	81.243	37,72
Total	613.332	721.939	834.581	926.861	33,83

Fonte: IBGE (1980, 1981, 2000 e 2010)

Parte do aumento populacional se deve a atração da força de trabalho pelas indústrias, uma vez que a evolução da participação da indústria no PIB cresceu em quase todos os municípios – como mostra a Tabela 6.

3.4 A economia no contexto da expansão da indústria de papel e celulose

A tendência de aumento da contribuição da atividade industrial para o PIB pode ser observada na Tabela 6, na qual é apresentada uma comparação do percentual do PIB baseado na indústria e na agropecuária, para os anos de 1999 e 2010 (IBGE, 2012).

Tabela 6 – Percentual do PIB baseado nos setores industrial e agropecuário.

Município	% PIB na Indústria			% PIB na Agropecuária		
	1999	2010	Variação	1999	2010	Variação
Alvinópolis	22,24	25,98	3,74	16,41	6,63	-9,78
Antônio Dias	18,04	11,48	-6,56	21,57	21,15	-0,42
Barão de Cocais	50,46	67,71	17,25	1,03	0,52	-0,51
Bela Vista de Minas	22,02	49,31	27,29	7,22	1,36	-5,86
Bom Jesus do Amparo	10,24	11,28	1,04	32,34	21,58	-10,76
Catas Altas	24,77	76,88	52,11	4,68	3,54	-1,14
Coronel Fabriciano	11,62	14,64	3,02	1,64	0,28	-1,36
Ipatinga	43,79	49,57	5,78	0,04	0,04	0,00
Itabira	61,26	68,14	6,88	0,83	0,50	-0,33
Jaguaraçu	15,90	42,49	26,59	26,96	6,40	-20,56
João Monlevade	42,48	43,67	1,19	0,11	0,07	-0,04
Mariana	58,21	76,95	18,74	0,98	0,56	-0,42
Marliéria	8,97	9,16	0,19	15,78	16,68	0,90
Nova Era	38,42	35,25	-3,17	3,04	1,78	-1,26
Ouro Preto	53,77	72,35	18,58	0,79	0,37	-0,42
Rio Piracicaba	51,65	73,59	21,94	4,29	1,28	-3,01
Santa Bárbara	40,39	29,64	-10,75	2,12	3,16	1,04
Santana do Paraíso	38,37	32,85	-5,52	2,40	2,58	0,18
São Domingos do Prata	18,71	19,7	0,99	18,92	13,35	-5,57
São Gonçalo do Rio Abaixo	20,60	83,22	62,62	21,28	0,85	-20,43
Timóteo	50,14	50,01	-0,13	0,09	0,04	-0,05
Média	33,43	44,95	11,52	8,69	4,89	-3,80
Minas Gerais	25,31	37,88	12,57	12,92	9,87	-3,05

Fonte: IBGE (2012).

Como pode ser observado, em quase todos os municípios houve aumento da participação da indústria na composição do PIB. Na média, para área de estudo, em 1999 a contribuição da indústria para o PIB era de 33,43%, e em 2010 de 44,95%, o que constitui uma variação de 11,52% no período. Essa variação foi menor do que a observada em Minas Gerais (12,57%), mas ainda assim, proporcionalmente, a participação da indústria no PIB da região é maior do que o do Estado como um todo uma vez que o percentual baseado na indústria foi de 44,95% contra 37,88% na média do Estado. Em relação à participação do setor agropecuário no PIB, na maioria dos municípios houve queda. Na média, em 1999 a contribuição do setor agropecuário na composição do PIB era de 8,69% e passou para 4,89% em 2010, o que representa uma variação de -3,80 % no período. Em comparação a Minas Gerais, a variação no período é parecida, uma vez que na média do Estado houve queda de -3,05%. Esses dados reforçam a indicação de tendência de expansão da indústria na área de estudo e retração do setor agropecuário. Esse aumento da participação da indústria na composição do PIB está relacionado à expansão da siderurgia e da indústria de papel e celulose.

Esse fato é reforçado pelo número de pessoas ocupadas na indústria de extração e transformação, conforme mostrado no gráfico da Figura 6, um indicativo da expansão das atividades industriais que são baseadas no reflorestamento com eucalipto, tanto para fornecimento de carvão para a siderurgia quanto para produção de celulose.

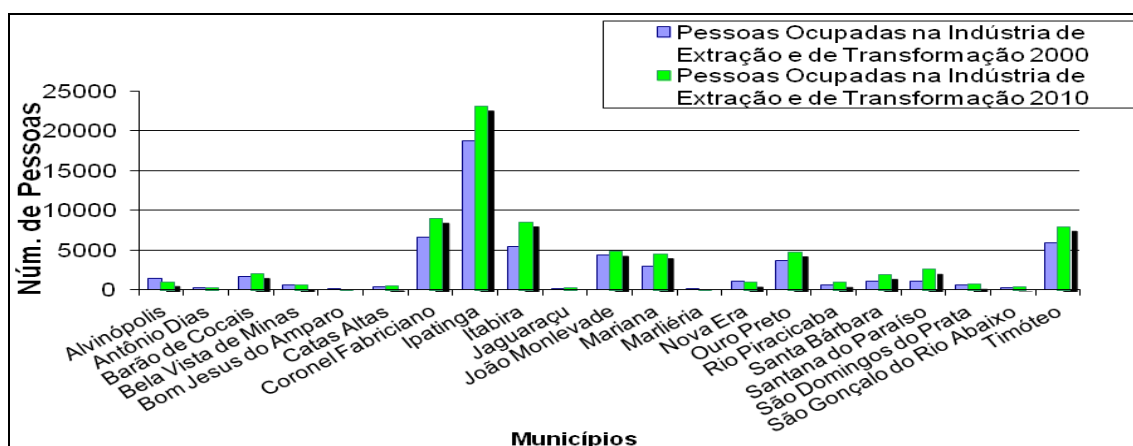


Figura 6 – Número de pessoas ocupadas na indústria de extração e transformação em 2000 e 2010.

Fonte: IBGE (2000, 2010).

Em quase todos os municípios da área de estudo houve aumento do número de pessoas ocupadas na indústria de extração e transformação entre 2000 e 2010. Essa tendência está relacionada tanto ao aumento da participação da indústria no PIB, apresentado na Tabela 6, quanto no aumento da produção anual de madeira para papel e celulose na área de estudo, apresentado na Figura 7. No gráfico da Figura 7 é possível observar a tendência da expansão da produção anual de madeira para papel e celulose ao longo do tempo, que de maneira geral teve um aumento expressivo da produção a partir do ano 2000 e leve flutuação a partir de 2008. Isso pode estar relacionado aos efeitos da crise no mercado mundial em 2008.

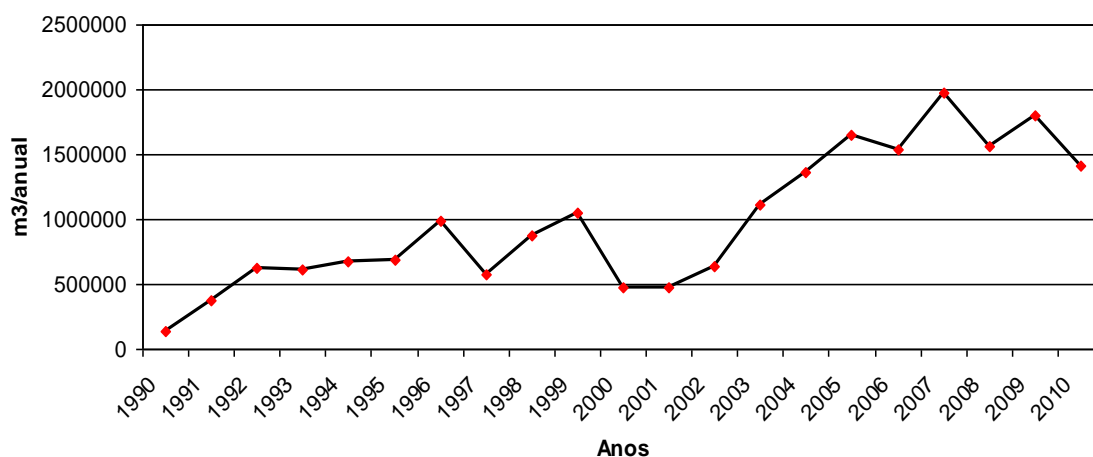


Figura 7 – Produção anual de madeira para papel e celulose nos municípios da área de estudo.

Fonte: IBGE (2011).

Em relação à produção de carvão vegetal na área de estudo, existe uma particularidade quanto a sua origem e utilização nas indústrias siderúrgicas: enquanto que para a indústria de papel e celulose seus produtos dependem exclusivamente do eucalipto, para a indústria de siderurgia não há essa exclusividade. Como o preço do carvão originado de mata nativa é menor que os da floresta plantada de eucalipto (PAULA, 1997), não necessariamente houve substituição em um primeiro momento das áreas de floresta nativa por reflorestamentos. Dessa forma, as companhias siderúrgicas avançaram na região comprando terras cobertas com matas nativas, desmatando, aproveitando a madeira e em seguida plantando eucalipto.

Embora contraditória, a tendência da utilização do carvão vegetal de florestas nativas, ainda é uma realidade, pois representa 50% do carvão necessário para manutenção dos fornos. Para burlar a legislação ambiental, as empresas adquirem esse carvão de áreas mais distantes, onde a fiscalização é menos intensa como áreas no norte de Minas Gerais, Mato Grosso e Bahia (GUERRA, 1993; PAULA, 1997). Essa prática é reforçada com a Política Florestal de 1979, quando o Conselho de Desenvolvimento Econômico determinou que recursos do Fundo de Investimentos Setoriais – FISET, destinados à reflorestamentos com eucaliptos, fruticultura e xerófitas na região nordestina e semi-árido, papel e celulose, carvão vegetal para a siderurgia, substituição de óleo combustível e madeira processada mecanicamente, fossem destinados preferencialmente para área de atuação da SUDENE. Nesse período, houve um deslocamento da expansão do reflorestamento para áreas do norte de Minas Gerais. Paralelo a isso ainda ocorreu a expansão urbana na área de estudo, gerando aumento no preço da terra decorrente de especulação imobiliária.

Enquanto as companhias siderúrgicas buscaram diversificar a origem do carvão, a CENIBRA, por exemplo, que depende especificamente da produção de eucalipto, adotou política contrária e adquiriu na região cerca de 10.000 ha de terras anuais na década de 1980 (PAULA, 1997). Dessa forma, foram utilizadas estratégias distintas para produção de carvão, enquanto as siderúrgicas tinham parte do carvão vegetal oriundo de florestas nativas, comprado de outras regiões e com parcerias de produtores rurais da área de estudo, a CENIBRA foi comprando terras, tanto de agricultores quanto de empresas reflorestadoras. Uma amostra da quantidade de terras da CENIBRA está disponível no resumo do Plano de Manejo Florestal CENIBRA, publicado em 2011 pela própria empresa, que apresenta a quantidade e proporção de terras nos municípios de atuação, até 2010. Na Tabela 7 apresentado um recorte dessa publicação com os dados disponíveis para os municípios da área de estudo.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 7, a CENIBRA está presente em 17 dos 21 municípios da área de estudo. A relação entre área do município e área CENIBRA mostra que a maior ocupação ocorre em Santana do Paraíso, onde essa proporção é de 39,02% das terras do município pertencentes à CENIBRA. Entretanto, o

fato que mais chama atenção, e confirma a tendência de expansão das áreas de eucalipto, é a coluna que mostra o percentual dos municípios ocupados por plantações de eucalipto. Essa coluna revela um potencial de expansão do eucalipto, tendo em vista que as áreas dos municípios pertencentes à CENIBRA, e, portanto, disponíveis ao plantio, em nenhum município está totalmente plantada. Esses dados mostram a representatividade de área ocupada pela CENIBRA e o seu potencial de influência sobre a transformação da paisagem no contexto da área de estudo.

Tabela 7 – Área total de ocupação, área plantada e % dos municípios ocupado por plantações de eucalipto da CENIBRA na área de estudo em 2010.

Município	Área Total do Município (ha)	Área Total da CENIBRA (ha)	Área CENIBRA Plantada (ha)	% Total de Ocupação	% do Município Ocupado por Eucaliptos
Alvinópolis	61.600	4.231,13	1.878,49	6,87%	3,05%
Antônio Dias	83.300	19.408,89	10.086,97	23,30%	12,11%
Barão de Cocais	35.300	3.657,34	1.970,97	10,36%	5,59%
Bela Vista de Minas	10.700	1.133,85	409,09	10,60%	3,82%
Bom Jesus do Amparo	19.700	710,23	439,45	3,61%	2,23%
Catas Altas	23.821	5.463,51	3.137,93	22,94%	13,17%
Coronel Fabriciano	20.200	5.981,27	2.668,45	29,61%	13,21%
Ipatinga	16.000	2.102,62	792,13	13,14%	4,95%
Itabira	130.500	5.972,66	2.543,82	4,58%	1,95%
Mariana	119.800	3.165,35	1.130,00	2,64%	0,94%
Marliéria	47.800	865,56	358,31	1,81%	0,75%
Nova Era	35.500	8.690,99	3.768,22	24,48%	10,61%
Rio Piracicaba	37.140	576,85	291,28	1,55%	0,78%
Santa Bárbara	68.471	9.582,64	5.655,12	14,00%	8,26%
Santana do Paraíso	27.480	10.724,20	6.193,44	39,02%	22,54%
São Domingos do Prata	79.100	3.682,44	1.696,64	4,66%	2,14%
São Gonçalo do Rio Abaixo	37.400	7.959,23	3.953,21	21,28%	10,57%
Total	853.812	93.908,76	46.973,52	11,00%	5,50%

Fonte: CENIBRA (2012).

Além da produção de eucalipto relacionada à indústria de papel e celulose, a produção de carvão a partir de eucaliptos é mais um elemento de transformação da paisagem. No gráfico da Figura 8 está representada, em toneladas anuais, a quantidade de carvão produzida nos municípios da área de estudo, entre 1990 e 2010. Na maioria dos anos a produção se manteve abaixo de 100.000 toneladas anuais. Contudo, entre 1991 e 1996 houve um pico significativo na produção, que pode estar relacionado à privatização das

siderúrgicas: USIMINAS, em 24/10/1991; ACESITA, em 22/10/1992; e AÇOMINAS, em 10/09/1993 (PAULA, 1997).

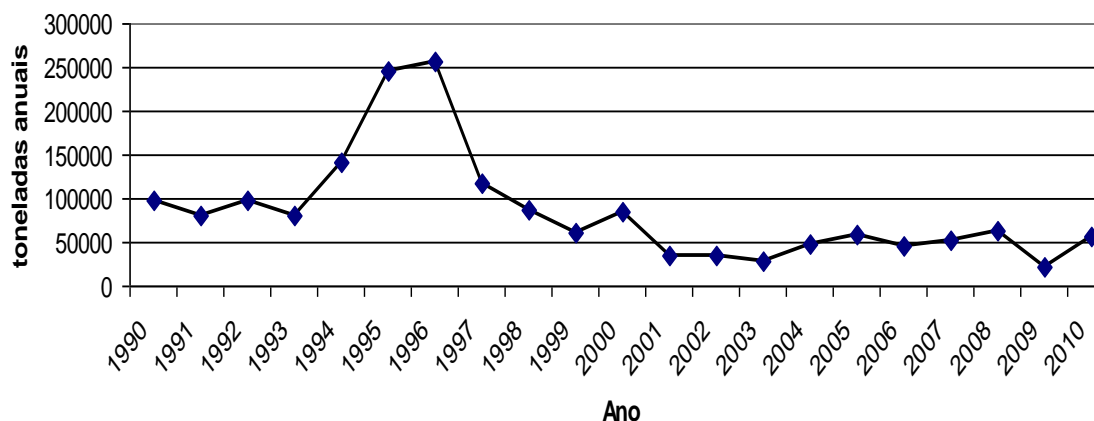


Figura 8 – Produção anual de carvão vegetal.
Fonte: IBGE (2011).

Esse processo de privatização ocorreu no âmbito do Programa Nacional de Desestatização (PND), que visou a recuperação da indústria brasileira face as perdas e estagnação tecnológica da década de 1980. Nesse período, a crise do Estado brasileiro impedia investimentos de modernização do parque industrial. Com as privatizações foi possível a recuperação do setor por meio da mudança do enfoque da gestão, bem como a capitalização de novos sócios empreendedores e alongamento do perfil de endividamento. Desse modo, a privatização trouxe alguns benefícios, dentre esses o aumento da produção e lucros (BNDES, 2001), o que explica o aumento da produção de carvão no período.

3.5 Cobertura da terra

No quadro ambiental a área de estudo está predominantemente sobre bioma da Mata Atlântica com pequena área de Cerrado, conforme pode ser observado no mapa da Figura 9. Contudo, a maior parte da vegetação natural foi substituída por pastagens e reflorestamento, restando apenas 0,2 % dos remanescentes florestais de Mata Atlântica (PAULA, 1997).

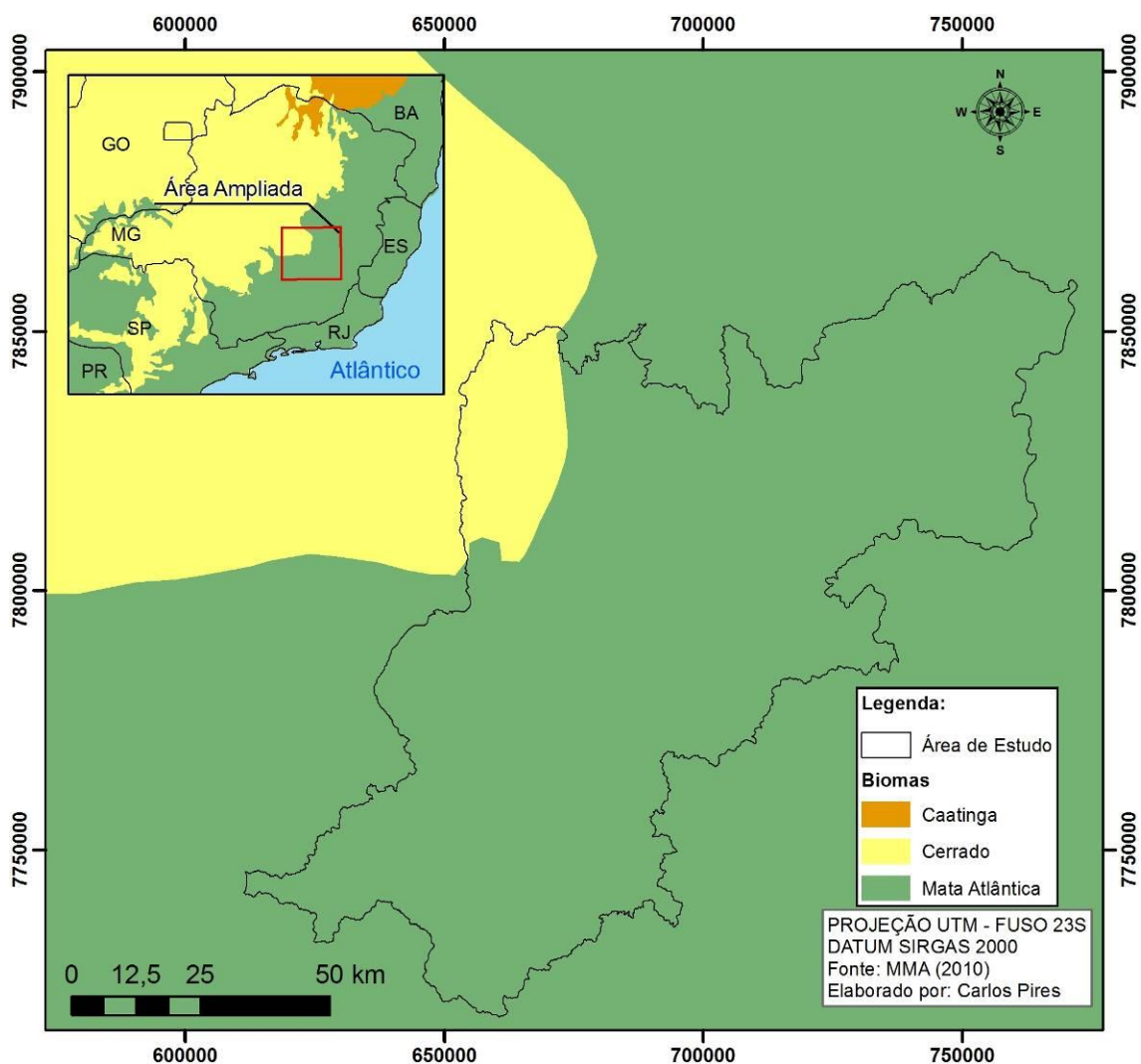


Figura 9 – Biomas na área de estudo.

Quanto à cobertura da terra, segundo mapeamento do Instituto Estadual de Florestas – IEF (2009), as tipologias mais expressivas são: Pastagem (40%), Floresta Estacional Semi-decidual Montana – FESM (26 %) e Reflorestamento com Eucalipto (18%).

A alteração da cobertura vegetal, principalmente para plantio de eucalipto tem colaborado para a crescente diminuição da biodiversidade local e impactos diversos no ambiente (ECOPLAN–LUME, 2008). A transformação da paisagem na área de estudo tem contribuição direta dos atores que ocupam a região. Dentre esses, as empresas de siderurgia e de papel e celulose, que utilizam o eucalipto como insumo e combustível na produção, têm papel decisivo nas mudanças da cobertura da terra.

A paisagem da região é formada por um conjunto de unidades de paisagem, compostas por um mosaico de coberturas com predomínio das áreas de FESM, Reflorestamento com Eucalipto e Pastagem. Uma paisagem típica, observada na área de estudo nos trabalhos de campo, que ocorreram em janeiro e outubro de 2013, é apresentada nas fotografias da Figura 10.

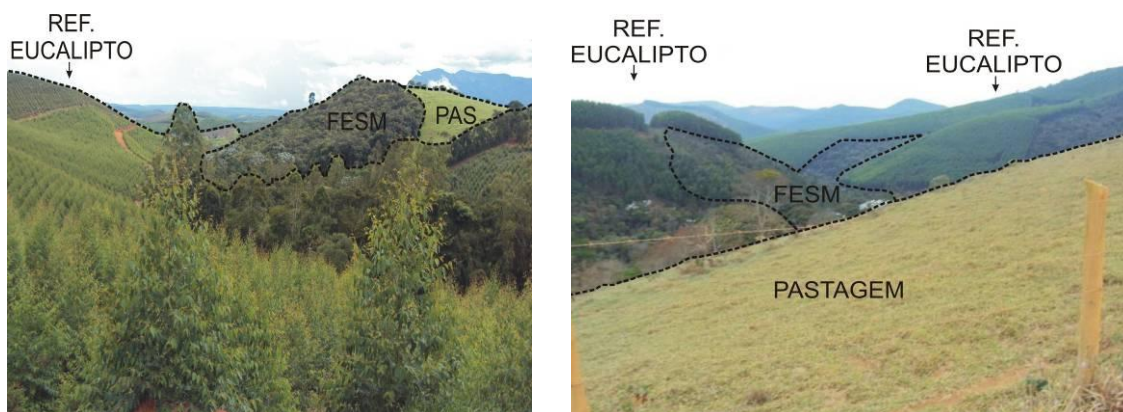


Figura 10 – Coberturas da terra mais representativas na área de estudo.

3.6 Solos

Os solos da área de estudo em sua maior parte são compostos por Latossolos, conforme pode ser observado na Figura 11. Uma vez que o Latossolo é a classe de solo mais representativa, a maior parte das áreas de reflorestamento se dá nesse substrato. As áreas de afloramento, Neossolo Litólico e Cambissolo possuem solos mais rasos e estão mais associadas às áreas de vegetação campestre.

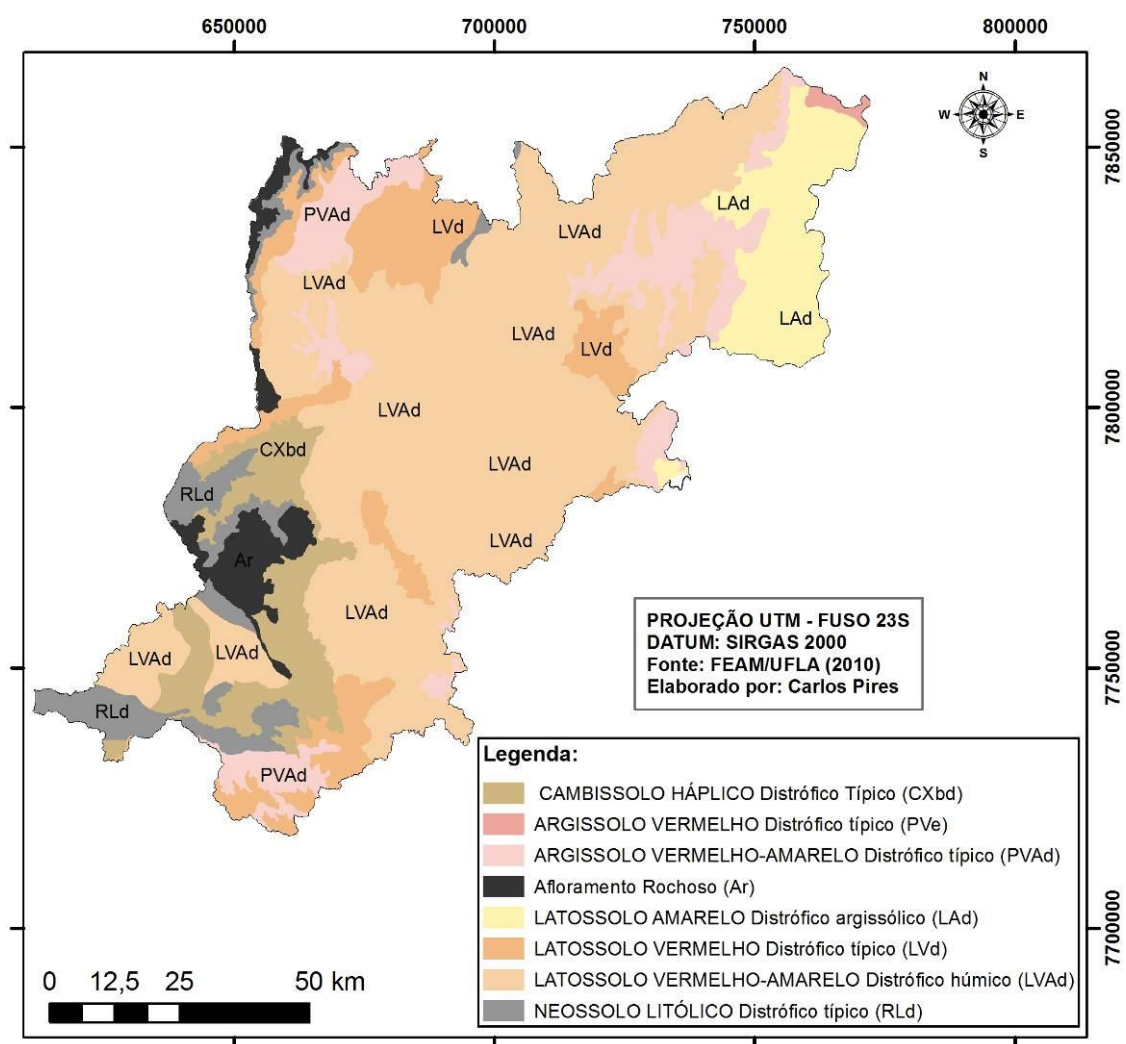


Figura 11 – Mapa pedológico da área de estudo.

Embora o latossolo apresente baixa fertilidade, em função da acidez elevada e dos altos teores de alumínio e manganês, as características físicas do solo, como profundidade e resistência a processos erosivos, o torna favorável à plantação de eucalipto (ROCHA et al, 2008).

3.7 Unidades de conservação

Com relação às Unidades de Conservação (UC) na área de estudo, existem 21 UC na área de estudo, sendo 16 de uso sustentável e 5 de proteção integral. Na Figura 12 é apresentado um mapa dessas UC.

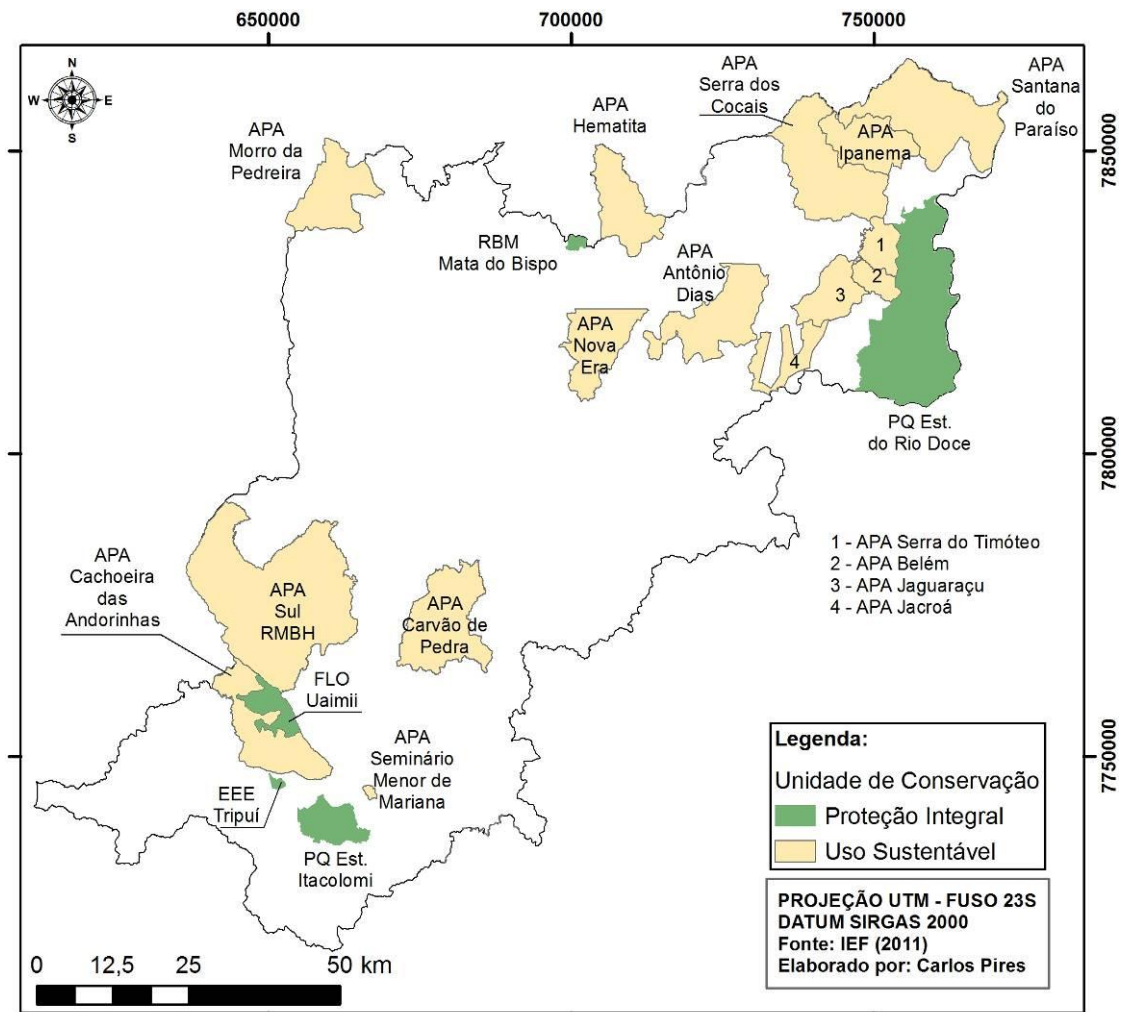


Figura 12 – Unidades de conservação na área de estudo.

Nas UC de uso sustentável as formas de ocupação não se restringem apenas às atividades ligadas à expansão das áreas de reflorestamento. Como pode ser observado no mapa da Figura 13, há concentração de áreas extensas de plantio de eucalipto nas APA de Santana do Paraíso, Ipanema e Serra dos Cocais.

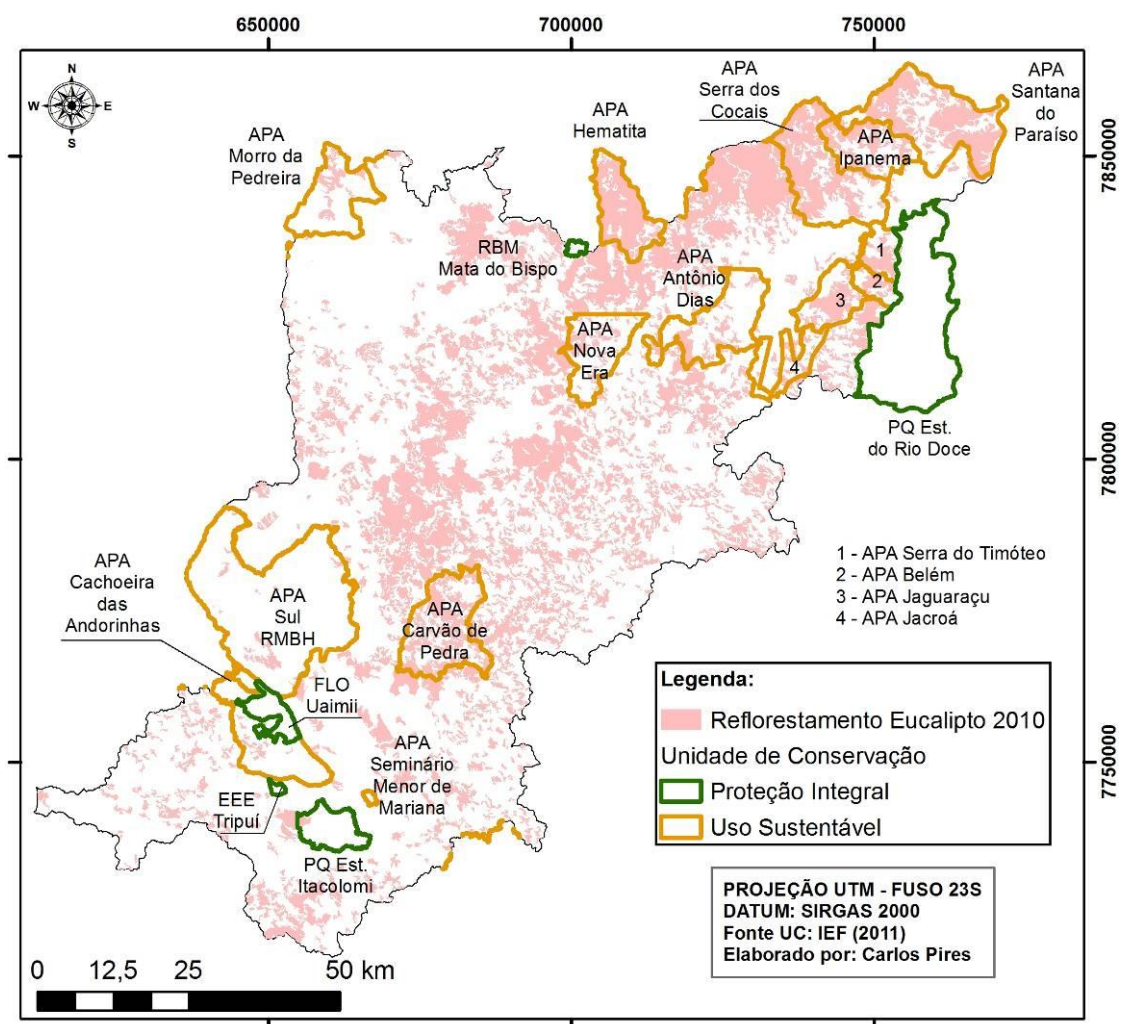


Figura 13 – Áreas de reflorestamento com eucalipto em relação a distribuição das unidades de conservação na área de estudo.

Todas as UC de uso sustentável da região foram criadas após a chegada das indústrias siderúrgicas e de papel e celulose – ver Tabela 8. Por esse motivo, somado ao baixo nível de restrição das UC de uso sustentável, apenas as áreas com UC de proteção integral é que de fato restringem as transformações na cobertura da terra causadas por interferência antrópica.

Tabela 8 – Unidades de conservação na área de estudo: por ano de criação e tipo de proteção ambiental.

Unidade de Conservação	Ano de Criação	Tipo
APA Morro da Pedreira	1990	Uso Sustentável
APA Sul RMBH	1994	
APA Hematita	2003	
APA Nova Era	1998	
APA Antônio Dias	2002	
APA Jacroá	2001	
APA Jaguarapu	1998	
APA Carvão de Pedra	2002	
APA Serra do Timóteo	2003	
APA Belém	2002	
APA Serra dos Cocais	2004	
APA Ipanema	1997	
APA Santana do Paraíso	1999	
APA Cachoeira das Andorinhas	1989	
Floresta Estadual do Uaimii	2003	Proteção Integral
APA Seminário Menor de Mariana	1984	
EEE Tripuí	1978	
PAQE Rio Doce	1944	
RBM Mata do Bispo	2003	
PAQE Itacolomi	1967	

Fonte: MMA (2010) e IEF (2011).

A fim de melhor entender a dinâmica dessas interferências, no Capítulo 4 é apresentada uma metodologia para análise e modelagem da mudança da cobertura da terra e suas implicações na alteração da paisagem.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia para análise e modelagem das mudanças de cobertura da terra na área de estudo e as alterações que essas mudanças provocam na estrutura da paisagem. No fluxograma da Figura 14 tem-se uma representação esquemática da metodologia dividida em quatro etapas principais: 1) pré-modelagem, 2) construção e calibração do submodelo de transição potencial; 3) modelagem e; 4) simulação e análise da paisagem.

Na etapa de pré-modelagem é feita uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos que norteiam o desenvolvimento da metodologia da pesquisa e o levantamento e aquisição dos dados para a caracterização da área de estudo. Nesta etapa, é realizada a análise e mapeamento das mudanças de cobertura da terra, que incluem etapas pré-processamento das imagens (georreferenciamento, mosaico, recorte), o uso de técnicas de classificação automática e avaliação dos mapas da cobertura da terra com dados de campo. A segunda etapa consiste na construção e calibração do sub-modelo de transição potencial, onde, a partir da entrada das transições de interesse e de variáveis explanatórias relacionadas com a mudança, uma rede neural *perceptron* multi-camadas é treinada para obtenção dos mapas de transição potencial. Em seguida é feita a calibração do modelo, onde o treinamento dessa rede neural é testado e realizado com base em diferentes conjuntos de variáveis.

Na terceira etapa é feita a modelagem e a validação do modelo. A modelagem é realizada a partir da obtenção da matriz de transição, que determina a quantidade de mudança para t_3 por meio de cadeias de Markov oriundas das transições entre t_1 e t_2 . A validação é realizada comparando os mapas de cobertura da terra para t_3 mapeado e t_3 simulado. Na quarta etapa é feita a simulação da cobertura da terra para um tempo t_4 (2035), utilizando o modelo calibrado e validado, e análise da paisagem simulada. Na quinta e última etapa é feita a análise comparativa da paisagem para t_1 , t_2 e t_4 por meio de métricas de paisagem. A seguir é apresentada uma descrição detalhada dessas etapas.

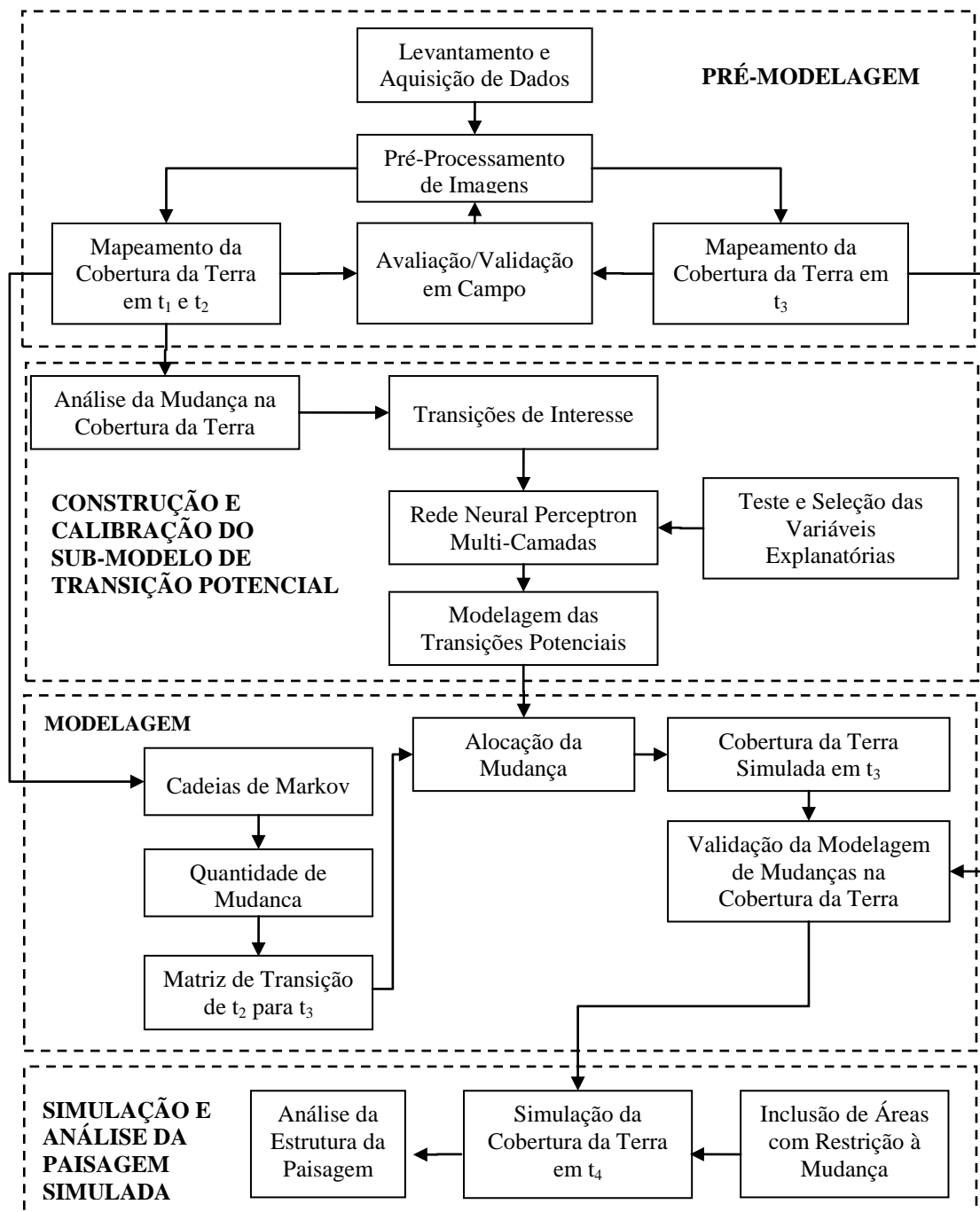


Figura 14 – Fluxograma da metodologia.

4.1 Pré-modelagem

4.1.1 Levantamento e aquisição dos dados

Para avaliação da mudança é construída uma base de dados composta de imagens multitemporais que servem para análise e entendimento da mudança e de uma série de outros dados relacionados aos fatores condicionantes das mudanças, como características físicas, bióticas e socioeconômicas da área de estudo.

As imagens utilizadas na presente pesquisa são oriundas dos satélites TM LANDSAT 5 e OLI TIRS LANDSAT 8 (descritas no Capítulo 2 – Seção 2.1). São utilizadas cenas TM LANDSAT 5 para o mapeamento da cobertura da terra nos tempos t_1 (1985) e t_2 (2010), para análise de mudanças; e cenas OLI TIRS LANDSAT 8 para mapeamento da cobertura da terra no tempo t_3 (2013). As imagens TM LANDSAT 5 estão disponíveis no site do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) e as imagens LANDSAT 8 no site do USGS (<http://glovis.usgs.gov/>).

O critério para seleção das imagens envolve a escolha das datas das imagens para que não haja interferências de ocorrências sazonais na análise, como a presença de nuvens e a variação de umidade, por exemplo. Essa última pode interferir na quantidade de água da vegetação, o que pode gerar confusão no mapeamento da cobertura da terra nos diferentes anos. Para atenuação dessas interferências, são selecionadas as imagens da estação seca, entre junho e setembro.

Na Tabela 9 são apresentadas as imagens (por sensor, órbita/ponto e data) utilizadas no presente trabalho, para mapeamento da cobertura da terra.

Tabela 9 – Dados das imagens utilizadas no mapeamento da cobertura da terra.

Satélite/Sensor	Órbita/Ponto	Data
LANDSAT 5/TM	217/73 e 217/74	04/07/1985
LANDSAT 5/TM	218/73 e 218/74	25/06/1985
LANDSAT 5/TM	217/73 e 217/74	26/08/2010
LANDSAT 5/TM	218/71 e 218/74	01/08/2010
LANDSAT 8/TIRS	217/73 e 217/74	02/08/2013
LANDSAT 8/TIRS	217/73 e 217/74	25/08/2013

Além das imagens, também são adquiridos dados para caracterização da área de estudo e composição de variáveis explanatórias. Para isso foram consultadas bases de fontes oficiais como o IBGE, MMA, FEAM/UFLA e IEF. No IBGE (1980, 1991, 2000, 2010 e 2012). Foram adquiridos dados relacionados à população, PIB, pessoas ocupadas na indústria, produção anual de madeira para celulose, produção anual de carvão vegetal. Do MMA (2010) foram obtidos dados para caracterização da área de estudo em relação aos biomas. Os dados de solo utilizados foram obtidos do mapeamento FEAM/UFLA (2010). No IEF (2011) foi adquirida a base de unidades de conservação. E na CPRM (2010) foi adquirida a base de geologia.

4.1.2 Pré-processamento de imagens

Para analisar comparativamente as imagens, é necessário realizar a correção geométrica com base numa mesma referência espacial e o mosaico, tendo em vista que a área de estudo está localizada em mais de uma cena.

No presente trabalho, para correção geométrica as cenas são registradas no sistema de coordenadas UTM, fuso 23S – datum horizontal SIRGAS-2000. As imagens LANDSAT 5 e LANDSAT 8 são corrigidas por meio de pontos de controle adquiridos de um mosaico de imagens de alta resolução do satélite Rapideye, dos meses de maio e junho de 2010, cedidas pelo Instituto Estadual de Florestas – IEF. Para a reamostragem das imagens LANDSAT 5 e LANDSAT 8 é utilizado o interpolador vizinho mais próximo. Para normalização de imagens foi adotada a metodologia proposta por Chávez (1988), descrita no Capítulo 2 – Seção 2.2.1. Nesse caso, o menor valor de *pixel* escuro foi adotado para estimar as interferências do espalhamento atmosférico nas imagens.

A partir das cenas georreferenciadas, são gerados os mosaicos de imagens para os tempos t_1 (1985), t_2 (2010) e t_3 (2013).

4.1.3 Mapeamento da cobertura da terra

O mapeamento da cobertura da terra é feito com base no processamento e análise das imagens TM LANDSAT 5 dos tempos t_1 (1985) e t_2 (2010), e OLIS/TIRS LANDSAT 8 do tempo t_3 (2013). Os mapeamentos para os tempos t_1 (1985) e t_2 (2010) são utilizados

na análise e modelagem das mudanças na cobertura da terra, enquanto que o mapeamento da cobertura da terra para tempo t_3 (2013) é utilizado para validar a cobertura da terra simulada para 2013.

O processamento e análise das imagens, visando o mapeamento de cobertura da terra, parte do agrupamento daquelas feições que apresentam níveis de cinza semelhantes, em uma única classe. Esse mapeamento é feito por meio de segmentação e classificação das imagens.

Para a segmentação e classificação das imagens, no presente trabalho, é utilizado o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING – versão 5.1.8). O método de segmentação escolhido é o de crescimento de regiões (ver Capítulo 2 - Seção 2.2.3) com padrões de similaridade de 40 e área de 300 *pixels*. Esses valores de similaridade e área foram obtidos a partir de alguns testes de segmentação e a escolha dos limiares baseou-se no nível de detalhamento necessário para o mapeamento na escala 1:100.000. A imagem segmentada passa pelo processo de classificação, para gerar o mapeamento da cobertura da terra, na qual é utilizada a medida de distância de *Battacharya* para mensurar a separabilidade estatística das diferentes classes espectrais (Capítulo 2 – Seção 2.2.3). Após a classificação é feita a inspeção visual e edição manual para realização de ajustes finos.

Para definição das classes para o mapeamento da cobertura da terra é utilizado como ponto de partida a avaliação dos dados e informações de mapeamento existente. Neste trabalho é utilizado o mapeamento da cobertura da terra elaborado pelo IEF (2009), para o Estado de Minas Gerais, resultando nas seguintes classes: Floresta Estacional Semidecidual Montana (FESM), Reflorestamento com Eucalipto, Área Arada para Reflorestamento com Eucalipto, Pastagem; Mineração, Área Urbana, Vegetação Campestre Natural, Solo Exposto e Água. No mapa final da cobertura da terra, as classes Reflorestamento com Eucalipto e Área Arada para Reflorestamento com Eucalipto foram agrupadas, pois neste trabalho são consideradas como uma mesma cobertura.

A avaliação da classificação das imagens é feita a partir da matriz de confusão e do índice *Kappa* (descritos no Capítulo 2 – Seção 2.2.3).

4.1.4 Avaliação em campo do mapeamento da cobertura da terra

Para avaliação do mapeamento de cobertura da terra são realizadas visitas de observação, em pontos de dúvidas na execução do mapeamento preliminar, e entrevistas com moradores sobre a evolução da cobertura da terra na região. Com isso são obtidas informações para correção do mapeamento da cobertura.

No presente trabalho, o levantamento de campo foi realizado em duas campanhas. A primeira, no período de 24 a 27 de janeiro de 2013, e a segunda, no período de 4 a 6 de outubro de 2013.

Os pontos de avaliação/validação do mapeamento de cobertura da terra foram coletados com auxílio de um receptor GPS de navegação.

O roteiro de entrevistas constitui-se de questionamentos sobre a cobertura da terra, como:

- o(a) senhor(a) mora aqui há quanto tempo?
- nesse tempo que o senhor(a) vive na região, notou muita diferença na paisagem?
- qual a principal ocupação das pessoas da região?
- como é o plantio de eucalipto nesta região?
- há quanto tempo o eucalipto é plantado na região?

4.1.5 Análise da mudança da cobertura da terra

A análise da mudança da cobertura da terra é realizada com base nos mapas da cobertura da terra para os tempos t_1 (1985) e t_2 (2010), os quais devem estar no formato *raster*. São calculadas as áreas das classes de cobertura da terra (em hectares) e em seguida os valores de área são transformados em percentual de representatividade em relação à área de estudo. Com isso é possível saber qual classe de cobertura é mais representativa para cada um dos tempos da análise.

Para compreensão da dinâmica da mudança na cobertura da terra são gerados, no módulo de análise de mudança do LCM (ver Capítulo 2 – Seção 2.3.1), mapas que subsidiam as análises como: mapa de perdas, mapa de ganhos, mapa de trocas, mapa de mudança e mapa de persistência. Pela interpretação dos mapas de perdas e ganhos é

possível entender quais as classes de cobertura da terra perderam mais área e quais ganharam mais. O mapeamento das trocas é utilizado para determinar o sentido da mudança: por exemplo, quanto da classe X muda para classe Y. O mapa de mudança destaca as áreas que mudaram de classe de cobertura; e o mapa de persistência aquelas áreas que não tiveram nenhuma mudança de cobertura.

Essas informações são úteis na criação de hipóteses para a explicação das mudanças e no entendimento da dinâmica dessas mudanças de cobertura da terra na área de estudo.

4.2 Construção e calibração do sub-modelo de transição potencial

O ponto de partida para construção do sub-modelo de transição potencial é a definição das transições de interesse (detalhadas na Seção 4.2.1). Essas transições são determinadas a partir da análise e do entendimento da mudança da cobertura da terra na área de estudo. Após a entrada das transições de interesse, são agregadas ao sub-modelo variáveis explanatórias para essas transições. As variáveis explanatórias passam antes por um teste de associação espacial com as áreas de mudança (teste de Cramer-V, descrito no Capítulo 2 – Seção 2.3.1.1). Na sequência as transições de interesse, juntamente com as variáveis explanatórias, são fornecidas para treinamento da rede neural (MLPNN – descrita no Capítulo 2 – Seção 2.3.1.2), para obtenção das transições potenciais. A acurácia da MLPNN depende da interação entre as variáveis explanatórias e as transições de interesse. Nessa pesquisa foram feitos vários testes de calibração da MLPNN (com base em diferentes conjuntos de variáveis explanatórias) e após a obtenção de uma acurácia maior que 90% foram gerados os mapas de transição potencial. A seguir são descritas cada uma dessas etapas.

4.2.1 Definição das transições de interesse

Com base no estudo das trocas entre as principais classes de cobertura (Seção 4.1.5) e na dinâmica da área de estudo, que tem como fator principal a expansão de áreas de reflorestamento com eucalipto, são escolhidas para construção do sub-modelo de transições potenciais as seguintes transições: de FESM, Campos Naturais e Pastagem para Reflorestamento com Eucalipto; de Reflorestamento com Eucalipto para Pastagem,

Campos Naturais e FESM; de Campos Naturais e FESM para Pastagem; de Pastagem para Reflorestamento com Eucalipto e FESM. Essas transições de interesse, que compõem o sub-modelo de transição potencial, são apresentadas de forma esquemática na Figura 15.

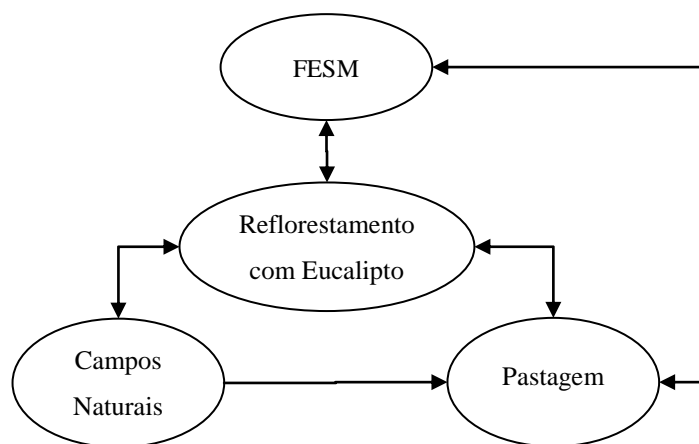


Figura 15 – Transições de interesse.

Na análise de mudança da cobertura da terra (Seção 4.1.5), como era de se esperar não foi detectada transição entre as coberturas de FESM e Campos Naturais.

4.2.2 Teste e seleção das variáveis explanatórias

Uma vez definidas as transições de interesse, são testadas e selecionadas as variáveis explanatórias da mudança, para entrada e calibração do sub-modelo de transição potencial. Para isso é utilizado o teste de Cramer-V, disponibilizado pelo LCM e apresentado no Capítulo 2 – Seção 2.3.1.1.

No presente trabalho, baseado no conhecimento da área de estudo e na sua caracterização, apresentada no Capítulo 3, foram testadas variáveis explanatórias relacionadas a fatores físicos, bióticos e socioeconômicos. Na Tabela 10 são Foram apresentadas essas variáveis.

Tabela 10 – Variáveis explanatórias testadas para construção e calibração do sub-modelo de transição potencial.

Variável Explanatória	Unidade	Observação
Altitude	m	–
Embasamento Gnaisse-Granítico	–	–
Declividade	%	–
Latossolo	–	–
Precipitação Média Anual	mm	–
Distância de Rodovias	m	–
Distância dos Cursos d'Água	m	–
Distância de Unidade de Conservação PI	m	–
Distância de Unidade de Conservação US	m	–
Distância de Áreas Urbanas	m	–
Distância de Áreas com Eucalipto	m	–
Distância de Áreas com Pastagem	m	–
Área de Mudança	m	–
Produção Municipal de Madeira para Celulose	m ³	Soma do período 1990 – 2010
Produção Municipal de Carvão Vegetal	ton	Soma do período 1990 – 2010
População Municipal 2010	–	–
% PIB na Indústria Municipal	%	Média do período 1999 - 2010
% PIB na Agropecuária Municipal	%	Média do período 1999 - 2010
Pessoas Ocupadas na Indústria Municipal	–	Pessoas ocupadas em 2010

Após o teste, foram pré-selecionadas para entrada no sub-modelo as variáveis com Cramer-V superior a 0,10, uma vez que, conforme descrito no Capítulo 2 – Seção 2.3.1.1, é a partir desse valor que passa a existir uma relação significativa entre a mudança de cobertura e a variável explanatória.

4.2.3 Modelagem das transições potenciais

Após a definição das transições de interesse e das variáveis explanatórias (Seções 4.2.1 e 4.2.2), o passo seguinte consiste no treinamento da MLPNN, no LCM, como uma rede de três camadas: uma camada de entrada com as variáveis explanatórias e as transições de interesse (Figura 14), uma camada escondida de interação de cada variável explanatória com as transições de interesse e uma camada de saída, representando o mapa de transição potencial. O mapa de transição potencial representa a probabilidade de mudança para cada célula das transições de interesse. As células são classificadas em valores entre 0 e 1, sendo que valores próximos a zero representam baixa probabilidade de mudança e valores próximos a 1 maior potencial de mudança. Essa probabilidade é utilizada para fazer a alocação da mudança.

4.3 Modelagem das mudanças da cobertura da terra

A partir dos dados dos mapeamentos da cobertura da terra para os tempos t_1 (1985) e t_2 (2010) foi determinada a quantidade de mudança, por cadeias de Markov (Capítulo 2 – Seção 2.3.1.3), e a alocação dessas mudanças, pela interação das transições potenciais, resultantes do sub-modelo de transição potencial, com a matriz de transição das cadeias de Markov.

Adicionalmente, foram incluídas no modelo áreas de restrição à mudança para diminuir a probabilidade de ocorrência de mudanças em unidades de conservação de proteção integral. A inclusão dessas áreas parte do pressuposto de que a possibilidade de ocorrência de mudanças nessas áreas é pequena, tendo em vista as análises temporais de mudança de cobertura e o fato de serem áreas protegidas destinadas à conservação.

Com base nesses dados e pressupostos é feita a simulação de mudança para o tempo t_3 (2013). Essa simulação é utilizada para calibração/validação do modelo, a partir da comparação do mapa de cobertura simulado com o mapa de cobertura da terra gerado a partir de imagem de. Os critérios para validação da cobertura simulada são descritos a seguir (Seção 4.3.1).

4.3.1 Validação da simulação de mudanças da cobertura da terra

A validação da simulação da cobertura da terra é realizada a partir da comparação dos mapas de cobertura para 2013: cobertura mapeada e cobertura simulada. Nessa comparação é calculado, para grades de diferentes tamanhos, o percentual de cada classe de cobertura da terra contido no mapa simulado e no mapeado. Com base nesses resultados é obtido o desvio padrão, a média e a mediana dos erros, para avaliação das diferenças entre a cobertura mapeada e a simulada para cada célula. Esse procedimento é executado para células de análise de: 10 x 10 km, 7,5 x 7,5 km, 5 x 5 km, 2 x 2 km, 1 x 1 km, 500 x 500 m e 250 x 250 m. Isso se faz necessário, pois é difícil acertar exatamente o local da mudança; dessa forma, uma avaliação para diferentes tamanhos de célula indica o ajuste de uma vizinhança de *pixels*. Com essa avaliação é possível entender o comportamento da diferença entre a cobertura mapeada e a cobertura simulada, sob diferentes tamanhos de célula. É esperado que quanto mais fina for a

célula, menor deve ser o ajuste entre os dois mapas de cobertura. Essa avaliação é feita para as classes mais representativas e de interesse desse trabalho: Reflorestamento com Eucalipto, Floresta e Pastagem.

Para a malha de célula mais fina, 250 x 250 m, a aferição da diferença entre a cobertura mapeada e a simulada, é feita a partir da identificação e classificação dos não-acertos em: falso-positivo e falso-negativo. As áreas que foram apontadas como pertencente a determinada classe no mapa simulado, mas não a mesma classe no mapeado, são classificadas como falsos positivos. As áreas onde era esperado que houvesse determinada classe e, contudo, a simulação não indicou, foram classificadas como falsos negativos.

Na Figura 16 é apresentado o fluxograma da etapa de validação da modelagem de mudanças da cobertura da terra.

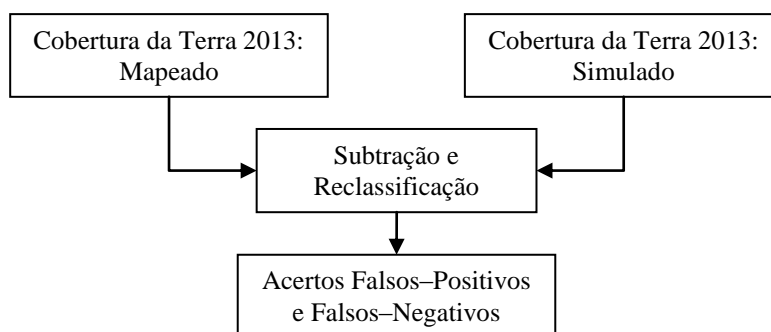


Figura 16 – Fluxograma para validação da cobertura da terra

A identificação e classificação dos não-acertos em: falso-positivo e falso-negativo é feita por uma subtração entre a cobertura mapeada e a simulada. Como resultado é possível obter valores iguais a zero que representam acerto do modelo, e valores diferentes de zero que representam não-acerto (falso-positivo e falso-negativo).

4.3.2 Inclusão de áreas com restrições à mudança

Para evitar que sejam simuladas mudanças para as áreas de proteção integral (Parque Estadual do Rio Doce, Parque Estadual do Itacolomi, Floresta Estadual do Uaimii, Estação Ecológica do Tripuí), essas áreas foram incluídas no modelo como áreas com

restrições à mudança. Contudo, embora sejam áreas protegidas, existe uma pequena possibilidade de que ocorram alterações na cobertura da terra. Para contemplar essa possibilidade de mudança, é possível adicionar um multiplicador para essas áreas com restrição. Um multiplicador próximo a zero funciona como restrição total, um multiplicador igual a 1 não tem nenhum efeito na modelagem e valores acima de 1 agem como estímulo à mudança. Dessa forma, para as Unidades de Conservação de Proteção Integral, foi adicionado o multiplicador 0,001, representando pequena possibilidade de mudança nessas áreas. Esse multiplicador foi escolhido a partir da constatação que no período de análise não ocorreram mudanças significativas nessas UC e da suposição de que no futuro também não ocorrerão.

4.3.3 Simulação da cobertura da terra

A modelagem da cobertura da terra foi feita a partir da comparação da cobertura da terra para um período de 25 anos: de 1985 e 2010. Com base nesses dados foram realizadas simulações para duas datas: 2013 e 2035. A simulação para 2013 foi utilizada para calibração e validação do modelo. Uma vez calibrado e validado o modelo foi realizada a simulação para 2035, que representam os próximos 25 anos a partir de 2010.

A simulação da cobertura da terra é baseada no pressuposto de que as condições de demanda por reflorestamentos com eucalipto observadas entre 1985 e 2010 irão permanecer.

A partir da análise de cadeias de Markov (Seção 2.3.1.3) para as coberturas mapeadas para os anos de 1985 e 2010, foi gerada a matriz de transição para 2013. Com isso é simulada a quantidade de mudança que ocorreu no período. A alocação da mudança para 2013 foi feita de forma *hard prediction* (ver Capítulo 2 – Seção 2.3.1). A simulação *hard prediction* indica para cada célula qual será a cobertura da terra no tempo futuro. Essa simulação é realizada a partir da interação entre a matriz de transição (obtida com as cadeias de Markov), com as transições potenciais mapeadas para cada *pixel*, resultantes da construção do sub-modelo de transição potencial. O resultado desse processo é o mapa de cobertura da terra simulado para 2013.

Para o ano de 2035, além da simulação *hard prediction*, foi utilizado o mesmo modelo para a simulação *soft prediction* (ver Capítulo 2 – Seção 2.3.1). A simulação *soft prediction* apresenta a vulnerabilidade à mudança das diferentes coberturas vegetais numa escala de 0 a 100%: 0 significa persistência, e valores próximos a 100% maior vulnerabilidade a mudança. Nessa pesquisa, os percentuais de vulnerabilidade à mudança são agrupados nas classes apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Classes de vulnerabilidade à mudança.

% de Vulnerabilidade à Mudança	Vulnerabilidade à Mudança
0%	Não haverá mudança
0 – 5%	Muito baixa vulnerabilidade à mudança
5 – 15%	Baixa vulnerabilidade à mudança
15 – 50%	Média vulnerabilidade à mudança
50 – 80%	Alta vulnerabilidade à mudança
80 – 100%	Muito alta vulnerabilidade à mudança

Os processos de transformação da cobertura da terra envolvem variáveis complexas, isso faz com que as simulações da cobertura da terra possuam algum grau de incerteza. Assim, em alguns casos acertar exatamente a cobertura para determinado *pixel* pode ser complicado. Dessa forma, dizer que uma área tem maior vulnerabilidade à mudança é mais apropriado do que dizer exatamente qual cobertura da terra ela terá no futuro. Assim, justifica-se a modelagem *soft prediction*, que produz resultados menos deterministas, mas é útil para classificar as células numa escala de vulnerabilidade à mudança.

4.4 Análise da fragmentação da paisagem

Para a análise comparativa da alteração da paisagem (conforme descrito no Capítulo 2 – Seção 2.4) são utilizados mapas da cobertura da terra de três datas: 1985, 2010 e 2035. Os mapas da cobertura da terra de 1985 e 2010 são aqueles gerados com base nas imagens LANDSAT de 1985 e 2010 (conforme descrito na Seção 4.1); e o mapa de cobertura da terra de 2035 é aquele simulado no LCM (conforme descrito na Seção 4.3). Essa análise tem como objetivo avaliar, para essas três datas, a estrutura da paisagem em relação às seguintes métricas (descritas no Capítulo 2 – Seção 2.4): área, número de

manchas, áreas núcleos e isolamento das manchas. Essas métricas foram escolhidas pelo fato de terem sido testadas com sucesso em Ribeiro (2010) em estudo da Paisagem para Mata Atlântica. Para o cálculo das métricas foram utilizadas ferramentas de um ambiente SIG para o cálculo de área, *buffers* e de distância euclidiana para o vizinho mais próximo.

No contexto desse trabalho a análise da paisagem é feita com base no agrupamento de coberturas do solo que possuem ecossistemas relativamente semelhantes em uma mesma paisagem. O agrupamento de classes de cobertura da terra proposto nesta pesquisa para análise da paisagem é apresentado no Capítulo 5 – Seção 5.3.

Adicionalmente, considera-se que as manchas compostas por vegetação nativa podem estar interligadas entre si, dependendo da distância em que se encontram uma das outras e das espécies consideradas, favorecendo os fluxos ecológicos e a formação de corredores. As classes de cobertura “Cursos d’Água” e “Outras” não entraram nos cálculos das métricas, embora possam funcionar como obstáculos ou corredores facilitando ou dificultando fluxos entre as manchas de vegetação. A análise da alteração da paisagem é feita a partir da interpretação dos resultados e da análise comparativa baseada em métricas aplicadas aos agrupamentos da cobertura da terra para as três datas.

5 RESULTADOS

Nesse capítulo inicialmente são apresentados os resultados da correção das imagens de satélite e dos processamentos para classificação das mesmas. Em seguida são apresentados os resultados analíticos de comparação das mudanças da cobertura da terra, que subsidiam a modelagem e a simulação de mudanças e os respectivos resultados. Na última seção deste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a análise da paisagem.

5.1 Mapeamento da cobertura da terra: 1985, 2010 e 2013

Nesta seção são apresentados os resultados relacionados ao mapeamento da cobertura da terra para os anos de 1985, 2010 e 2013, que incluem as etapas de pré-processamento, levantamento de campo e a classificação das imagens LANDSAT.

5.1.1 Resultados do pré-processamento dos dados

As imagens LANDSAT foram georreferenciadas conforme descrito no Capítulo 4 - Seção 4.1.2. Os pontos de controle foram distribuídos pela área de estudo e entorno, identificando feições homólogas na imagem a ser corrigida (LANDSAT) e na imagem de referência (RapidEye). A distribuição dos pontos de controle é apresentada na Figura 17.

Ao todo foram definidos 25 pontos de controle, obtendo um erro quadrático médio de 4,84 m utilizando um interpolador com polinômio de segundo grau. Considerando a escala de mapeamento 1:100.000 e o caráter regional da análise, o erro obtido pode ser considerado satisfatório, uma vez que ficou abaixo do tamanho de um *pixel* (30 m).

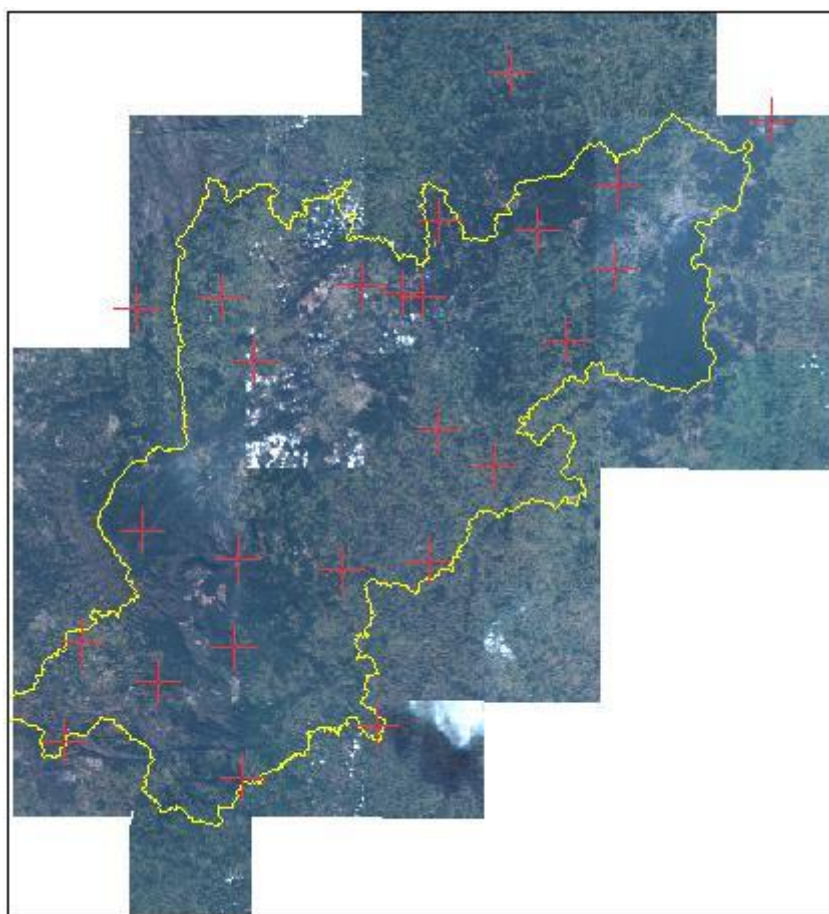


Figura 17 – Distribuição dos pontos de controle para georreferenciamento das imagens LANDSAT.

5.1.2 Levantamentos de campo

Nos trabalhos de campo foram visitados alguns pontos (pontos de observação visual e fotográfica e de entrevistas) que ajudaram na avaliação do mapeamento da cobertura da terra a no melhor entendimento da dinâmica de alteração dessa cobertura ao longo do tempo. Na Figura 18 estão representados o percurso de campo e os pontos visitados e observados.

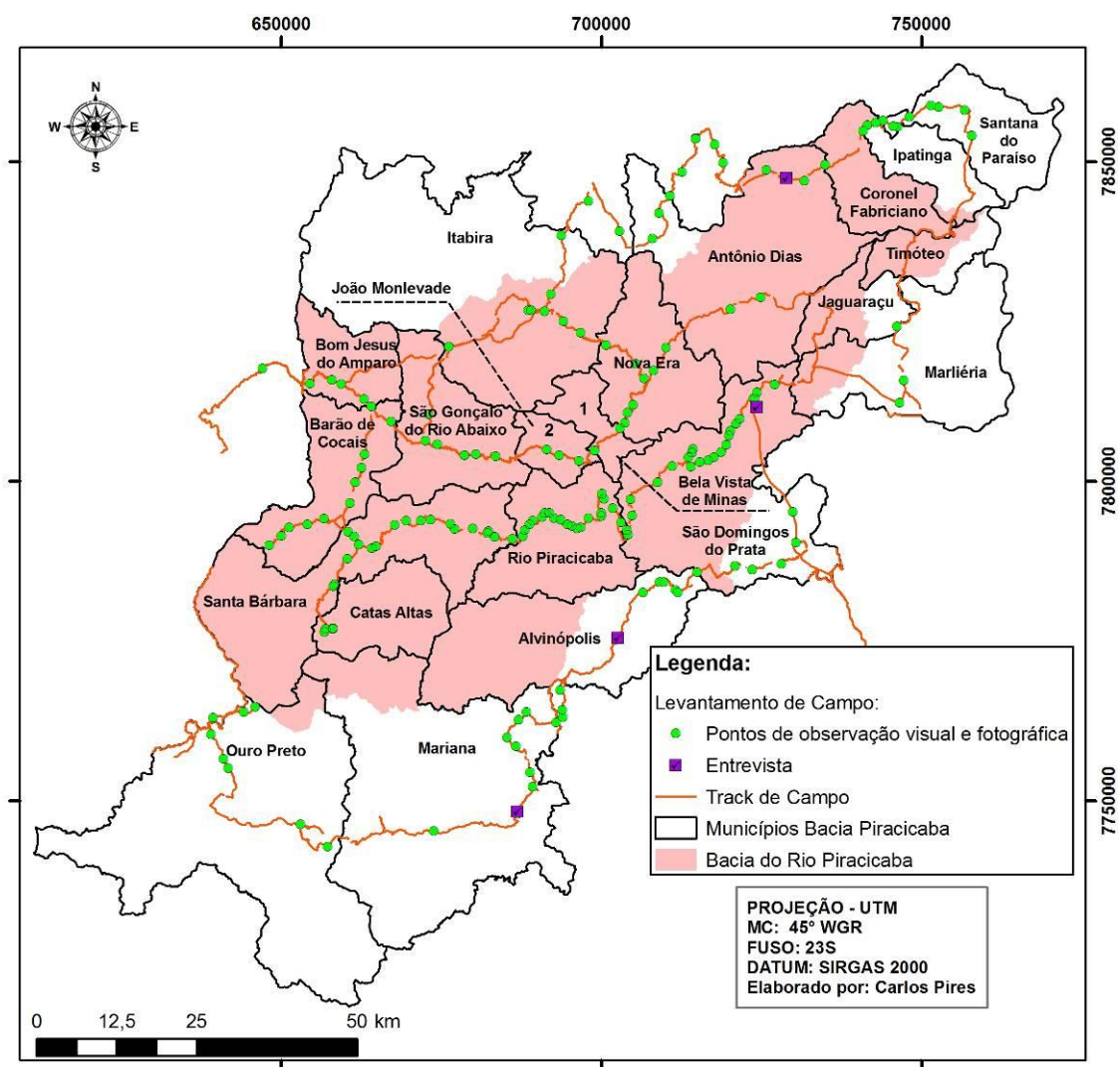


Figura 18 – Pontos de avaliação do mapeamento da cobertura da terra: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

A área de atuação do setor de papel e celulose, principalmente representada pela CENIBRA, está mais concentrada na porção noroeste da área de estudo, região dos municípios de Coronel Fabriciano, Antônio Dias e Nova Era. Conforme entrevista realizada em 26/10/2013 (disponível no Apêndice A1), no município de Antônio Dias, é possível perceber a influência da empresa na região. Em alguns trechos da entrevista, o entrevistado afirma que a ocupação de reflorestamento com eucalipto é antiga, superior a 40 anos. Essa entrevista reforça a influência da CENIBRA nessa parte da área de estudo, bem como sua estratégia de reflorestamento, que é de comprar as terras para expansão do reflorestamento.

Na porção nordeste da área de estudo, no município de São Domingos do Prata, também há algumas áreas de reflorestamento com eucalipto, contudo, o predomínio são das áreas de pastagem. Numa entrevista nessa região, em 26/10/2013 no Distrito de Ilheus do Prata (disponível no Apêndice A2), foi possível notar que no passado houve aproveitamento da mata nativa para produção de carvão vegetal. Contudo, com a mudança da legislação, que não mais permite a derrubada de mata nativa para produção de carvão, isso não ocorre mais. Apesar da presença do eucalipto na região, algumas produções mais tradicionais, como a produção do leite, ainda persistem.

Na região do município de Alvinópolis, o plantio de eucalipto está mais relacionado à produção de carvão, sendo a GERDAU-Açominas a companhia responsável pela produção. Contudo, com uma diferença no modo de produção em relação à CENIBRA: o sistema de plantio do eucalipto é feito em parceria com pequenos produtores rurais. A parceria firmada com os produtores é para que os mesmos produzam carvão em suas terras a partir de mudas cedidas pela empresa. Esse fato foi registrado em entrevista, no município de Alvinópolis em 25/10/2013 (disponível no Apêndice A3).

As informações coletadas em campo subsidiaram a avaliação dos mapeamentos de cobertura da terra apresentados e discutidos na Seção 5.1.3.

5.1.3 Mapeamento da cobertura da terra

Os resultados dos mapeamentos da cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013 são apresentados nas Figuras 19 a 21, respectivamente.

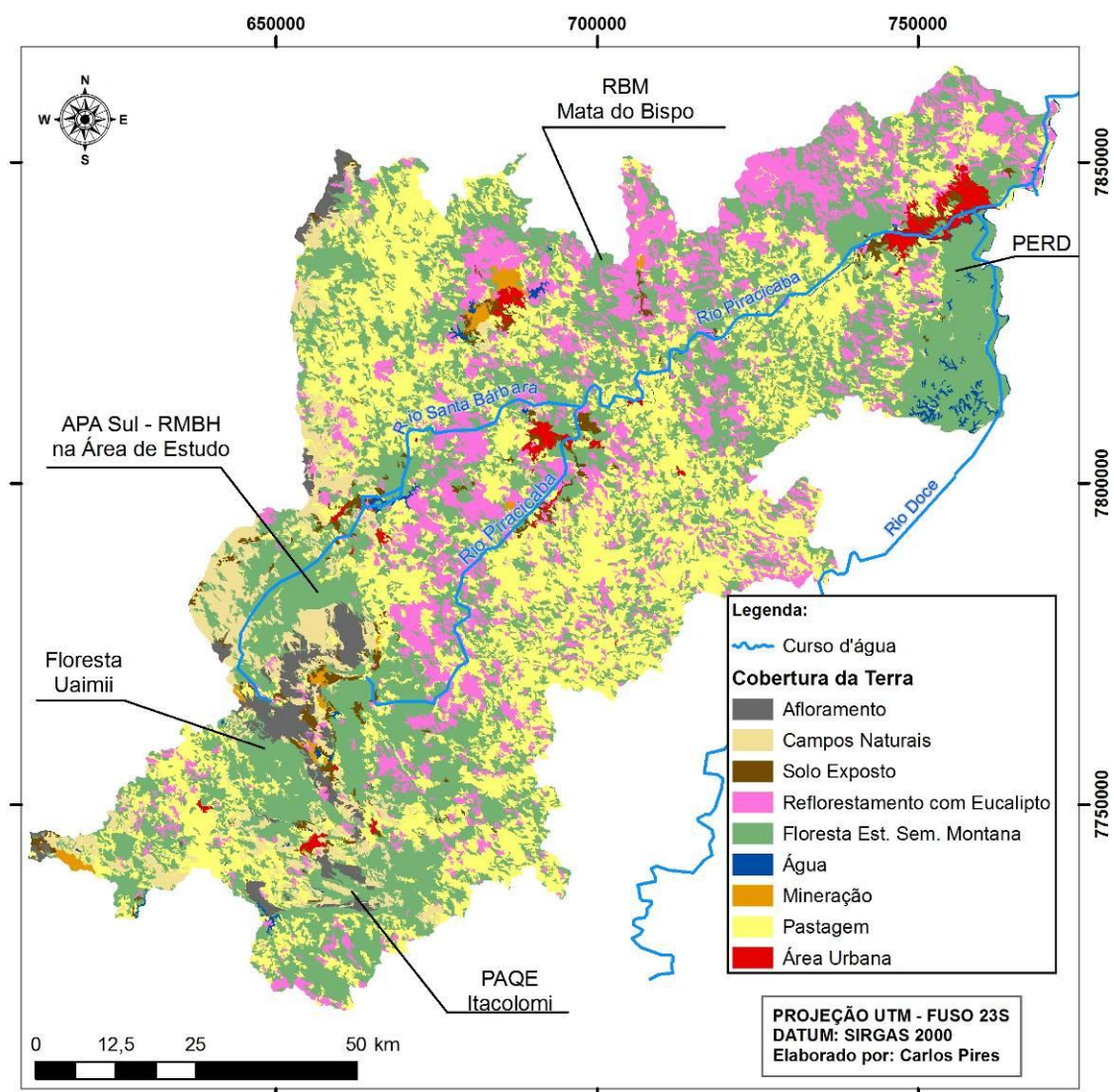


Figura 19 – Mapa da cobertura da terra em 1985: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

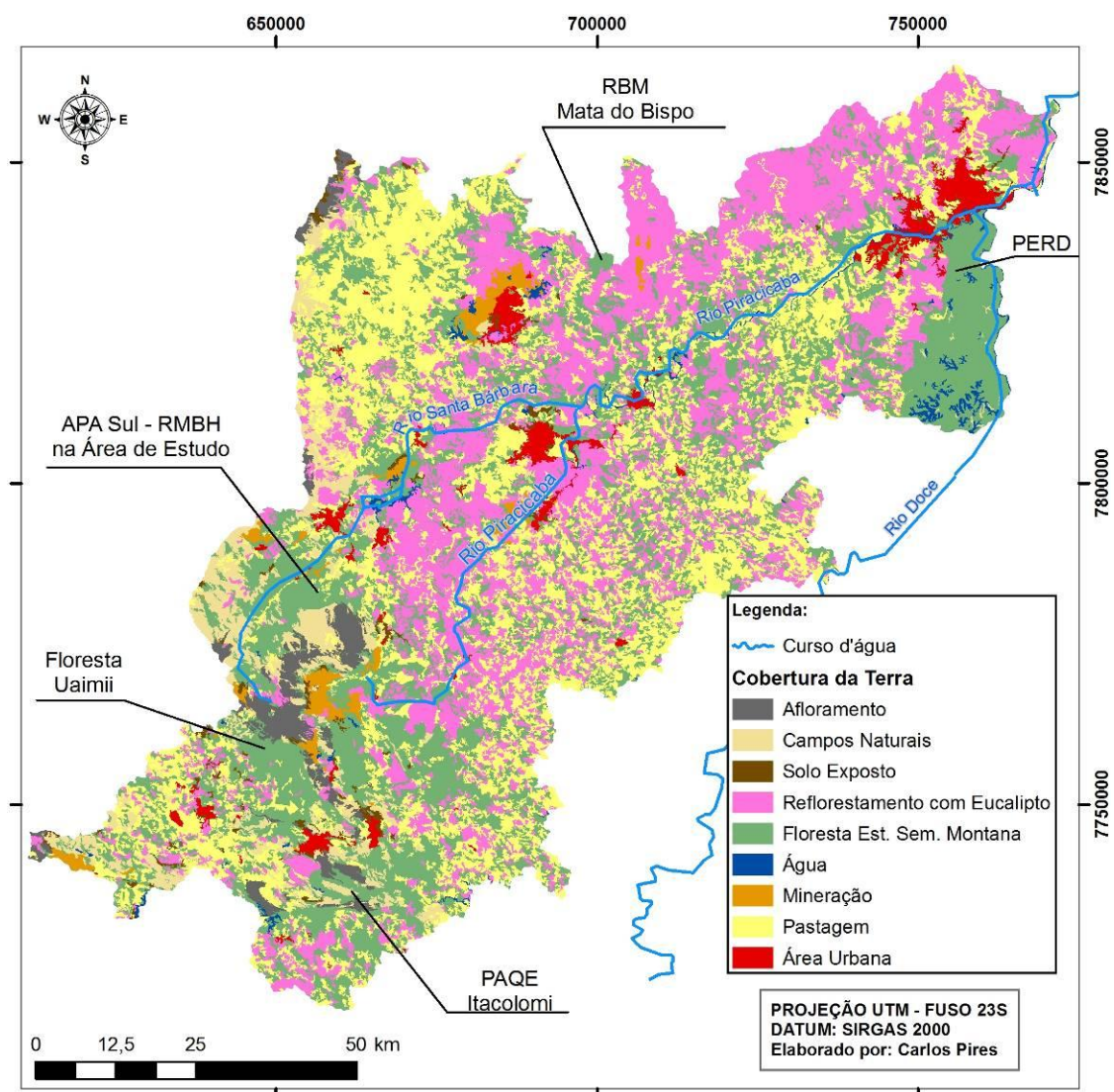


Figura 20 – Mapa da cobertura da terra em 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

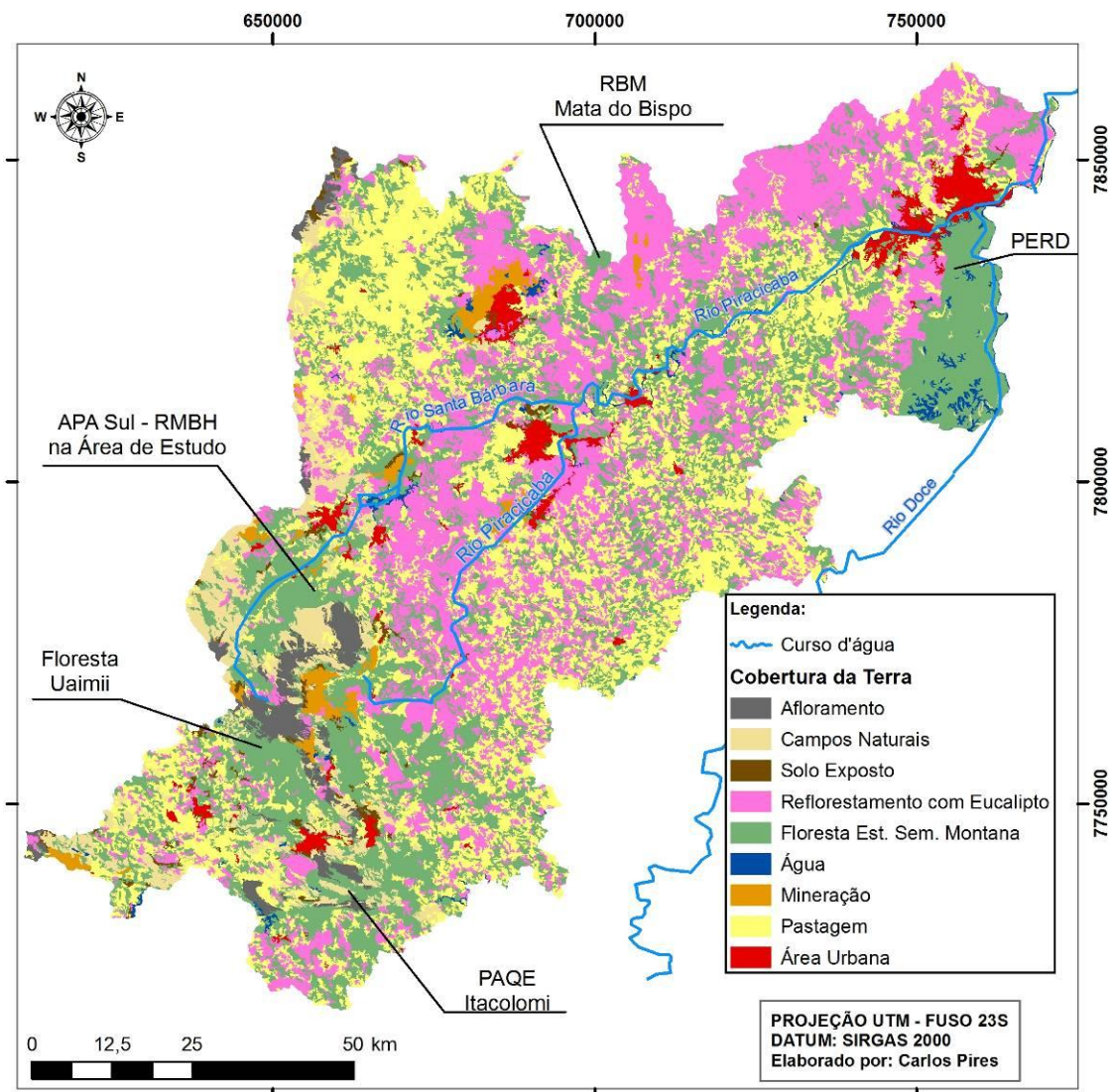


Figura 21 – Mapa da cobertura da terra em 2013: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Para o ano de 1985 o desempenho geral da classificação a partir das amostras de teste foi de 99,80%, e a confusão média foi 0,20%. O índice kappa foi de 0,999. A matriz de erros da classificação está disponível no Apêndice B1. Para os anos de 2010 o desempenho geral da classificação foi de 89,13%, e a confusão média foi 10,87%. O índice kappa foi de 0,87. A matriz de erro da classificação está disponível no Apêndice B2. A avaliação da classificação para 1985 e 2010 foi feita com base nas entrevistas de campo. A classificação da cobertura para 2013 foi validada com base nas observações de dados de campo.

As áreas (ha) e representatividade (%) das classes de cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013 são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Áreas das classes de cobertura da terra para 1985, 2010 e 2013: municípios da bacia do Rio Piracicaba e da RMVA.

Classe de Cobertura da Terra	Área					
	1985		2010		2013	
	ha	%	ha	%	ha	%
Afloramento	23.925,38	2,37	22.849,16	2,26	22.849,16	2,26
Água	6.636,33	0,66	7.280,84	0,72	7.189,35	0,71
Solo Exposto	14.761,29	1,46	7.401,60	0,73	7.707,26	0,76
Vegetação Campestre Natural	60.246,78	5,96	53.972,99	5,34	53.867,30	5,33
Reflorestamento com Eucalipto	157.260,00	15,55	274.999,04	27,19	277.884,99	27,47
FESM - Floresta Estacional Semidecidual Submontana	397.674,03	39,32	305.126,80	30,17	303.884,24	30,04
Mineração	5.216,26	0,52	14.768,52	1,46	15.405,99	1,52
Pastagem	333.813,31	33,00	297.902,72	29,45	295.313,91	29,20
Urbano	11.957,32	1,18	27.189,03	2,69	27.388,50	2,71
Total	1.011.490,70	100,00	1.011.490,70	100,00	1.011.490,70	100,00

Conforme pode ser observado na Tabela 12, as classes de cobertura mais representativas da área de estudo são: FESM, Pastagem, e Reflorestamento com Eucalipto. Esse fato se repete em todas as datas analisadas. Porém, existe uma variação entre essas classes ao longo do tempo. De maneira geral há aumento das áreas de Reflorestamento com Eucalipto e diminuição das áreas de Pastagem e de FESM.

A variação, em percentual, da cobertura da terra na área de estudo, entre 1985 e 2010, é detalhada na Tabela 13.

Tabela 13 – Variação da cobertura da terra entre 1985 e 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Classe de cobertura da terra	1985 (%)	2010 (%)	Varição (%)
Afloramento	2,37	2,26	0,11
Água	0,66	0,72	-0,06
Solo Exposto	1,46	0,73	0,73
Vegetação Campestre Natural	5,96	5,34	0,62
Reflorestamento com Eucalipto	15,55	27,19	11,64
Floresta Estacional Semidecidual Submontana	39,32	30,17	- 9,15
Mineração	0,52	1,46	-0,94
Pastagem	33,00	29,45	-3,55
Urbano	1,18	2,69	1,51
Total	100,00	100,00	-

Em 1985, a FESM representava 39,32% da área de estudo, a Pastagem 33%, e o Reflorestamento com Eucalipto 15,55%. Em 2010, a FESM representava 30,17%, com perda de 9,28% de área com relação a 1985; a Pastagem representava 29,45%, com perda de 3,55% de área com relação a 1985; e o Reflorestamento com Eucalipto com 27,19%, com um ganho de 11,64% de área com relação a 1985. As perdas de áreas de FESM e Pastagem somam 12,83%, ao passo que o ganho de área de Reflorestamento com Eucalipto foi de 11,64%, esse fato aponta para uma relação de transição entre essas três classes. Para investigar se de fato há uma relação de transição entre essas três classes de cobertura da terra, na Figura 22, é apresentado um mapa com todas as classes de cobertura da terra que mudaram para Reflorestamento com Eucalipto e um gráfico, com um percentual de contribuição de cada uma delas.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 22, entre 1985 e 2010, o crescimento das áreas de Reflorestamento com Eucalipto se deu principalmente sobre as áreas de FESM, com 49,49%, e de Pastagem, com 47,58%. Somadas, essas coberturas representam 96,97% da área de expansão do Reflorestamento com Eucalipto. Dessa forma, é possível afirmar que a expansão das áreas de Reflorestamento com Eucalipto tem forte relação com a conversão da Pastagem e FESM.

Essa tendência é reforçada pelas áreas que mudaram para Pastagem, que podem ser observadas na Figura 23. As classes de cobertura que mais contribuíram para o aumento da Pastagem foram: FESM (69,18%) e Reflorestamento com Eucalipto (25,17%). Somadas, essas duas coberturas representam 94,35% das áreas que mudaram para Pastagem.

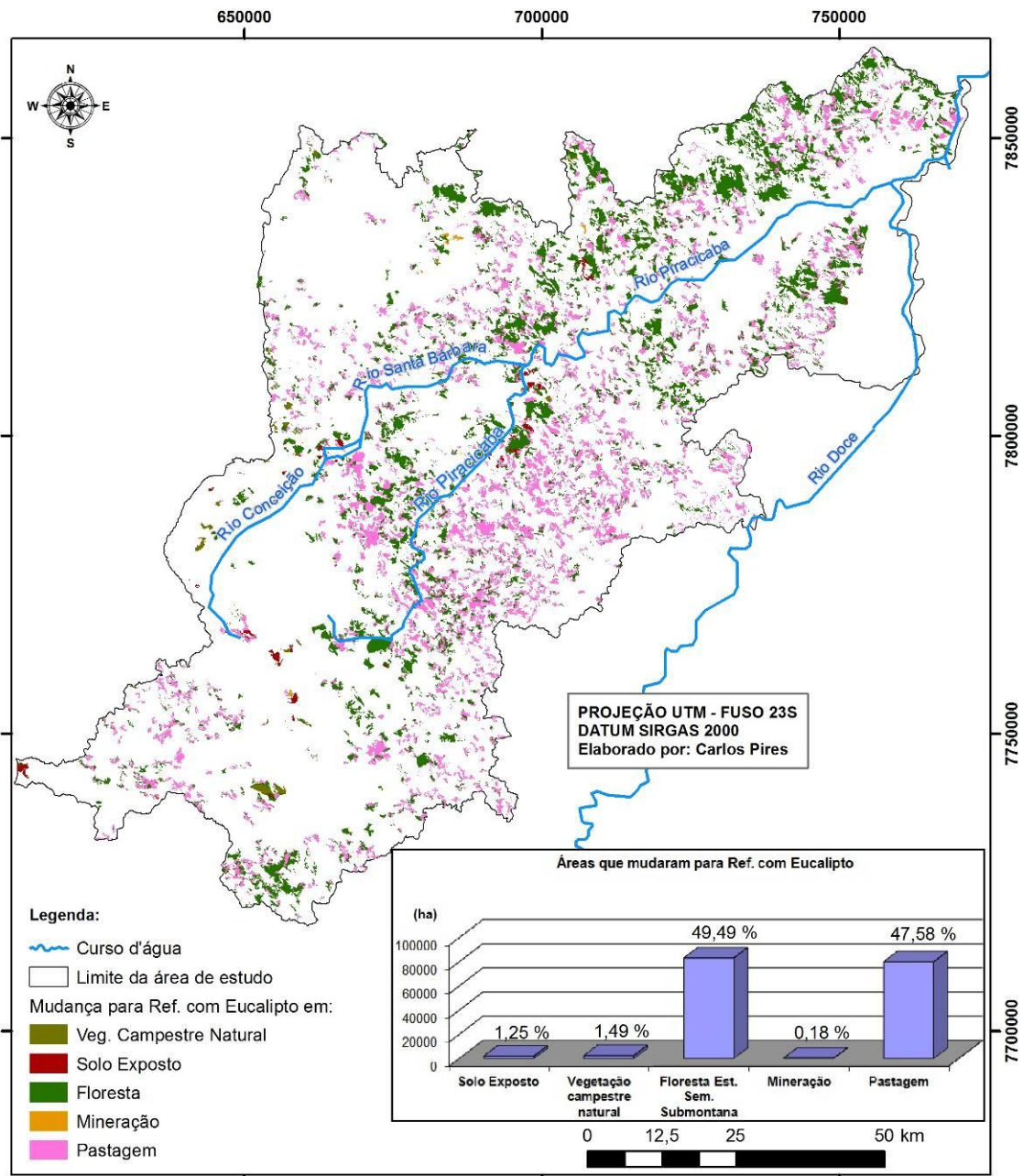


Figura 22– Áreas de mudança de cobertura da terra para Reflorestamento com Eucalipto entre 1985 e 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

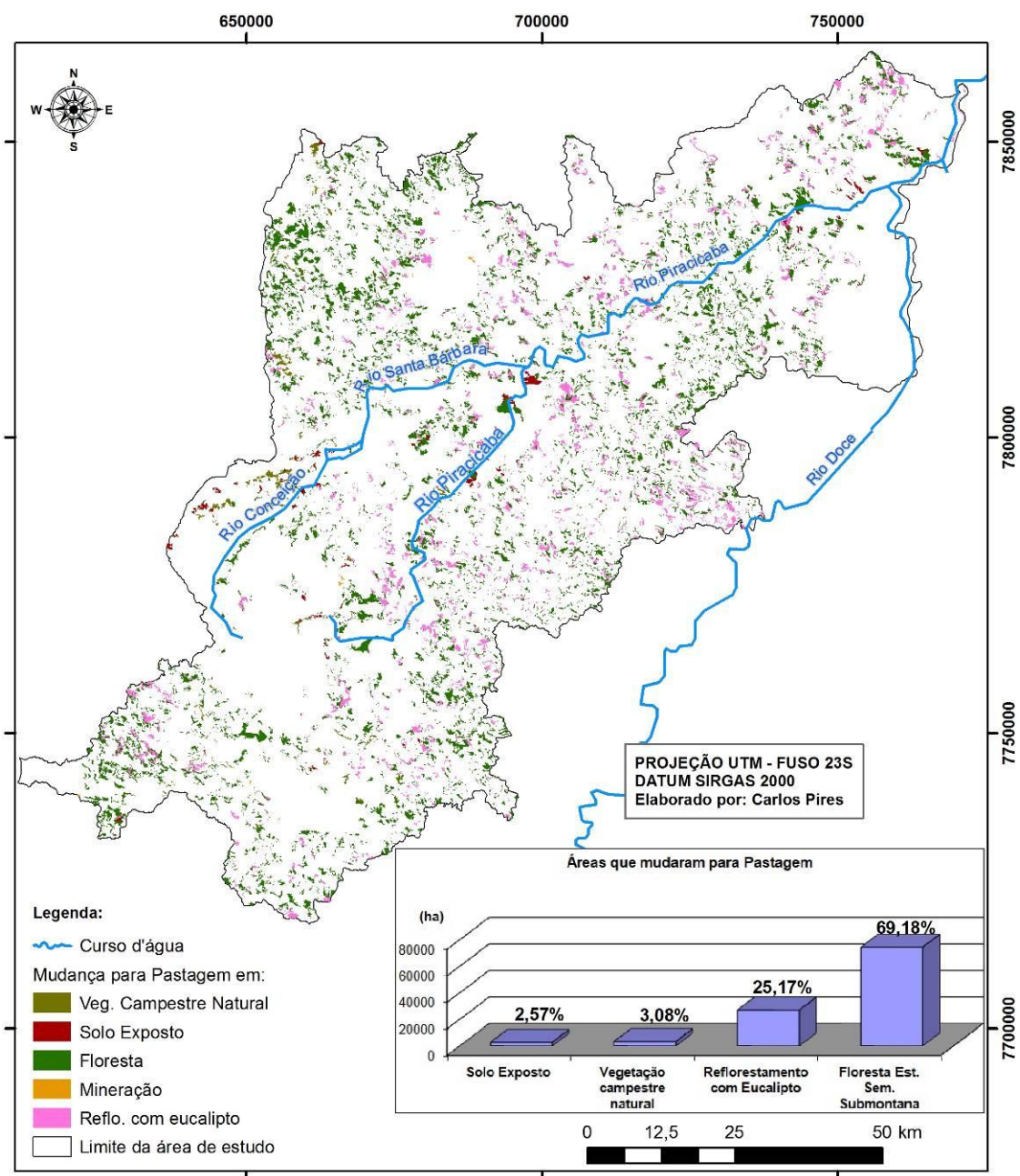


Figura 23 – Áreas de mudança de cobertura da terra para Pastagem com Eucalipto entre 1985 e 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

A regeneração das áreas de FESM, apresentada na Figura 24, está mais associada a mudança a partir das áreas de Pastagem, uma vez que essas representam 69,25% do total da área que mudou para FESM.

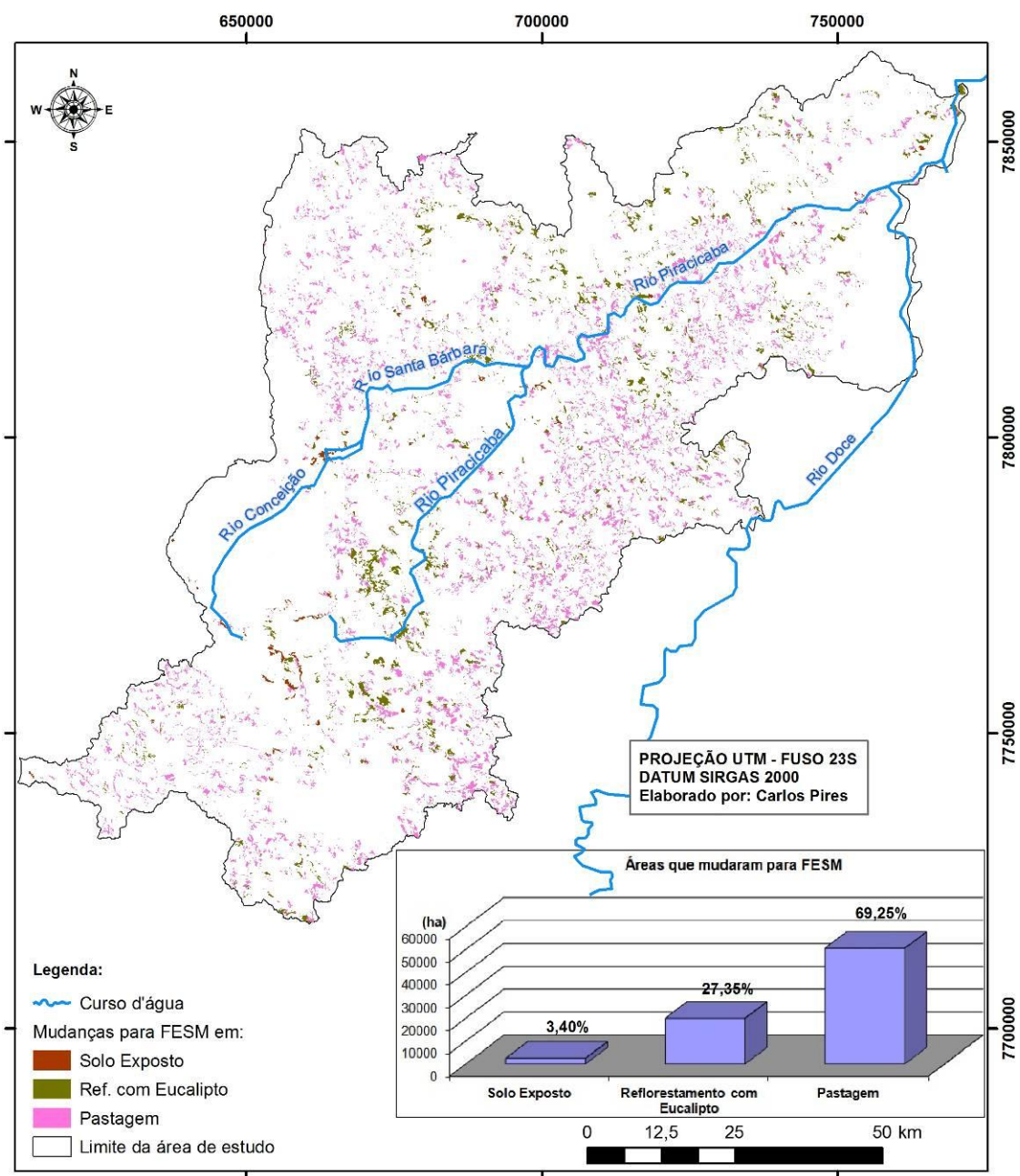


Figura 24 – Áreas de mudança de cobertura da terra para FESM com Eucalipto entre 1985 e 2010: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

A partir dos resultados apresentados ao longo desta seção, é possível concluir que as mudanças mais significativas na área de estudo estão relacionadas às classes de Pastagem, FESM e Reflorestamento com Eucalipto. Com base nessas análises, foi

construído um modelo de mudança de cobertura da terra apresentado e discutido na Seção 5.2.

5.2 Modelagem das mudanças na cobertura da terra

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados da modelagem da mudança na cobertura da terra, nos municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA: construção, calibração e validação do sub-modelo de transição potencial; modelagem e validação do modelo de mudança; simulação da cobertura da terra para 2035, utilizando o modelo de mudança.

5.2.1 Construção, calibração e validação do sub-modelo de transição potencial

A definição do sub-modelo de transição potencial, envolve as seguintes etapas: definição das transições de interesse; teste e seleção das variáveis explanatórias; e modelagem das transições potenciais (descritas no Capítulo 4 – Seção 4.2). Como resultado tem-se, para cada transição de interesse, um mapa com o potencial de conversão para cada célula. A seguir são apresentados os resultados para cada uma dessas etapas.

Após a definição das transições de interesse (descrita no Capítulo 4 – Seção 4.2.1), foi feito o teste e seleção das variáveis explanatórias relacionadas às mudanças da cobertura da terra. O critério para inclusão das variáveis explanatórias no sub-modelo foram definidos no Capítulo 4 – Seção 4.2.2. Porém, nem todas variáveis com Cramer-V superior a 0,10 foram utilizadas no sub-modelo final, pois algumas variáveis são correlacionados, o que provavelmente poderia incorporar uma redundância ao sub-modelo que resulta na diminuição do percentual de acurácia da MLPNN. Na Tabela 14 são apresentadas as variáveis explanatórias testadas e o status em relação à inclusão ou não no sub-modelo de transição potencial.

Tabela 14 – Resultado do teste e seleção das variáveis explanatórias para inclusão no sub-modelo de transição potencial.

Variável Explanatória	Cramer - V	Unidade	Observação	Status de Seleção
Altitude	0,1523	m	-	Selecionada
Embasamento Gnaisse-Granítico	0,1482	-	-	Não Selecionada
Declividade	0,0281	%	-	Não Selecionada
Latossolo	0,1683	-	-	Selecionada
Precipitação Média Anual	0,1324	mm	-	Não Selecionada
Distância de Rodovias	0,0928	m	-	Não Selecionada
Distância de Cursos d'Água	0,0760	m	-	Não Selecionada
Distância de UC Proteção Integral	0,1033	m	-	Não Selecionada
Distância de UC Uso Sustentável	0,0829	m	-	Não Selecionada
Distância de Áreas com Eucalipto	0,3815	m	-	Selecionada
Distância de Áreas Urbanas	0,5113			Selecionada
Distância de Áreas com Pastagem	0,5560	m	-	Selecionada
Áreas de Mudança	0,3513	m	-	Selecionada
Produção Municipal de Madeira para Celulose	0,1354	m ³	Soma do período 1990 – 2010	Selecionada
Produção Municipal de Carvão Vegetal	0,1561	ton	Soma do período 1990 – 2010	Selecionada
População Municipal 2010	0,1506	-	-	Selecionada
% PIB na Indústria Municipal	0,1360	%	Média do período 1999 - 2010	Não Selecionada
% PIB na Agropecuária Municipal	0,1278	%	Média do período 1999 - 2010	Não Selecionada
Pessoas Ocupadas na Indústria Municipal	0,1499	-	Pessoas ocupadas em 2010	Selecionada

As variáveis com Cramer-V mais alto são: Distância das Áreas com Pastagem (0,5560), Distância das Áreas Urbanas (0,5113); Distância das Áreas com Eucalipto (0,3815); e Áreas de Mudança (0,3513). Esse resultado apresenta coerência, uma vez que as áreas com pastagem, por serem áreas com vegetação nativa já suprimida, podem se converterem com maior facilidade em reflorestamento com eucaliptos. Para as áreas urbanas é esperado que quanto mais próximo das ocupações urbanas, maior seja o potencial de ocorrerem mudanças. Em relação à distância das áreas com eucalipto, o critério para inclusão foi: quanto mais próxima das áreas com eucalipto, maior a possibilidade de uma área adjacente se converter em eucalipto, uma vez que todo o processo para o plantio, manejos e escoamento da produção já estão estabelecido na região. O raciocínio é o mesmo para as áreas de mudança: quanto mais próxima de

alguma área que ocorreu mudanças, maior a chance de ocorrer alguma conversão na cobertura da terra.

O melhor resultado do treinamento da MLPNN a partir da interação das variáveis explanatórias com as transições de interesse (descritas no Capítulo 4 – Seções 4.2.1 e 4.2.2) foi de 94,28% após 5.000 iterações.

O resultado da construção do sub-modelo de transição potencial são os mapas de conversão potencial, onde para cada uma das transições de interesse é gerado um mapa com probabilidade de mudança com valores entre zero e um, conforme descrito no Capítulo 4 – Seção 4.2.3.

Como exemplo, na Figura 25 é apresentado o mapa de potencial de conversão da transição de FESM para Reflorestamento com Eucalipto. De maneira geral, as áreas de FESM com maior potencial de transição para Reflorestamento com Eucalipto (em vermelho) são os fragmentos menores espalhados pela área de estudo. Já as áreas de FESM com maior potencial de persistência (em verde), são os fragmentos maiores, como aqueles relacionados às Unidades de Conservação de Proteção Integral: Parque Estadual do Itacolomi - PEI, Floresta do Uaimii, Parque Estadual do Rio Doce – PERD e Reserva da Biosfera Mata do Bispo. Além dessas áreas, há persistência relacionada à altitude, como nas áreas a montante do Rio Piracicaba e Unidades de Conservação de Uso Sustentável como a Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte – APA-Sul RMBH.

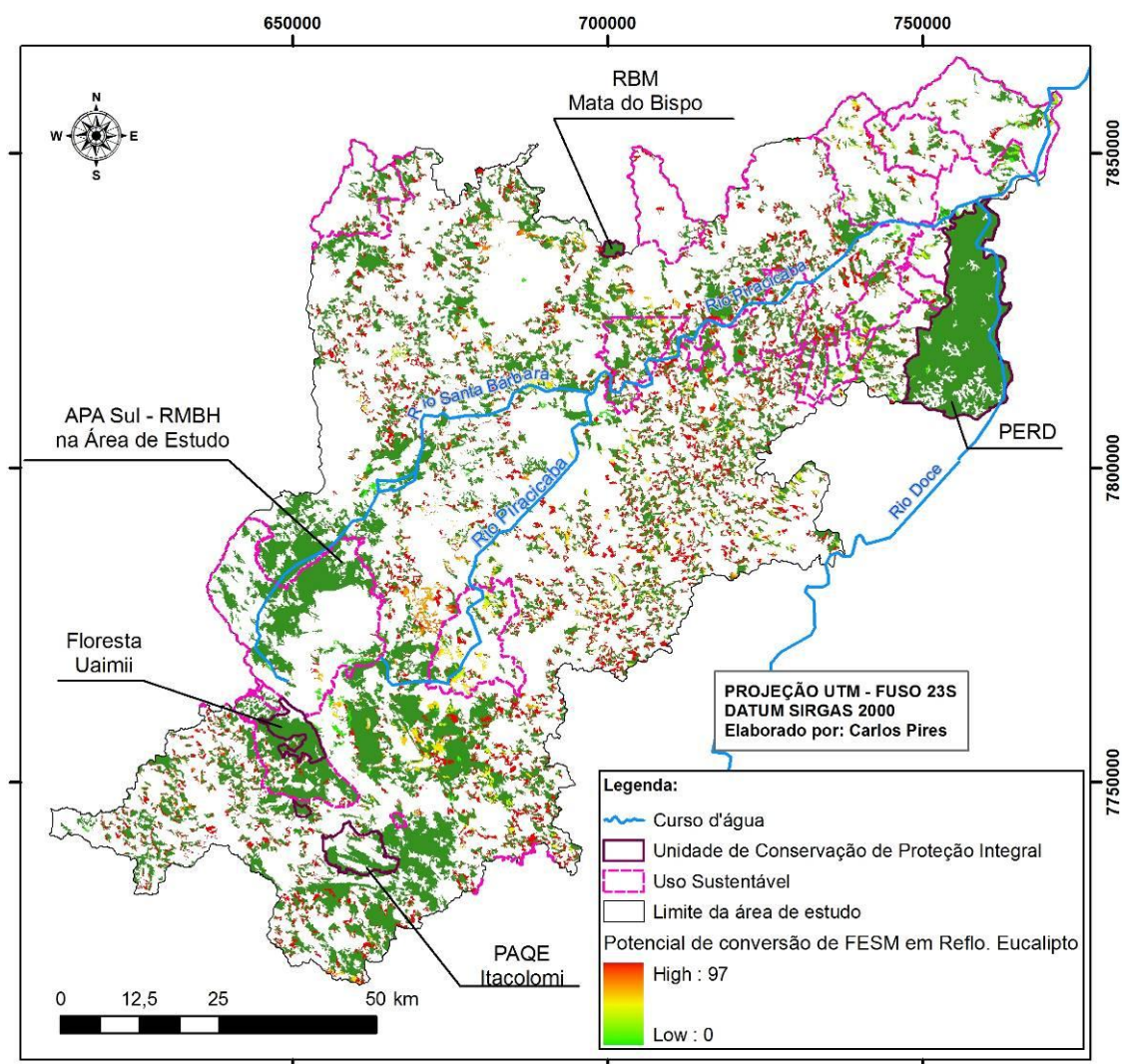


Figura 25 – Potencial de conversão de FESM em Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Outro exemplo de mapa de potencial de conversão, apresentado na Figura 26, é das áreas de Pastagem em Reflorestamento com Eucalipto. É perceptível na Figura 26 que as áreas de pastagem com maior potencial de mudança estão concentradas próximas às áreas de reflorestamento. Por outro lado, as áreas de pastagem com maior probabilidade de persistência (em verde) estão espalhadas na área de estudo, porém visivelmente mais afastadas das áreas de reflorestamento com eucalipto. Isso reforça a hipótese de que a expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto se dá, preferencialmente, em áreas de pastagem já próximas às áreas de reflorestamento.

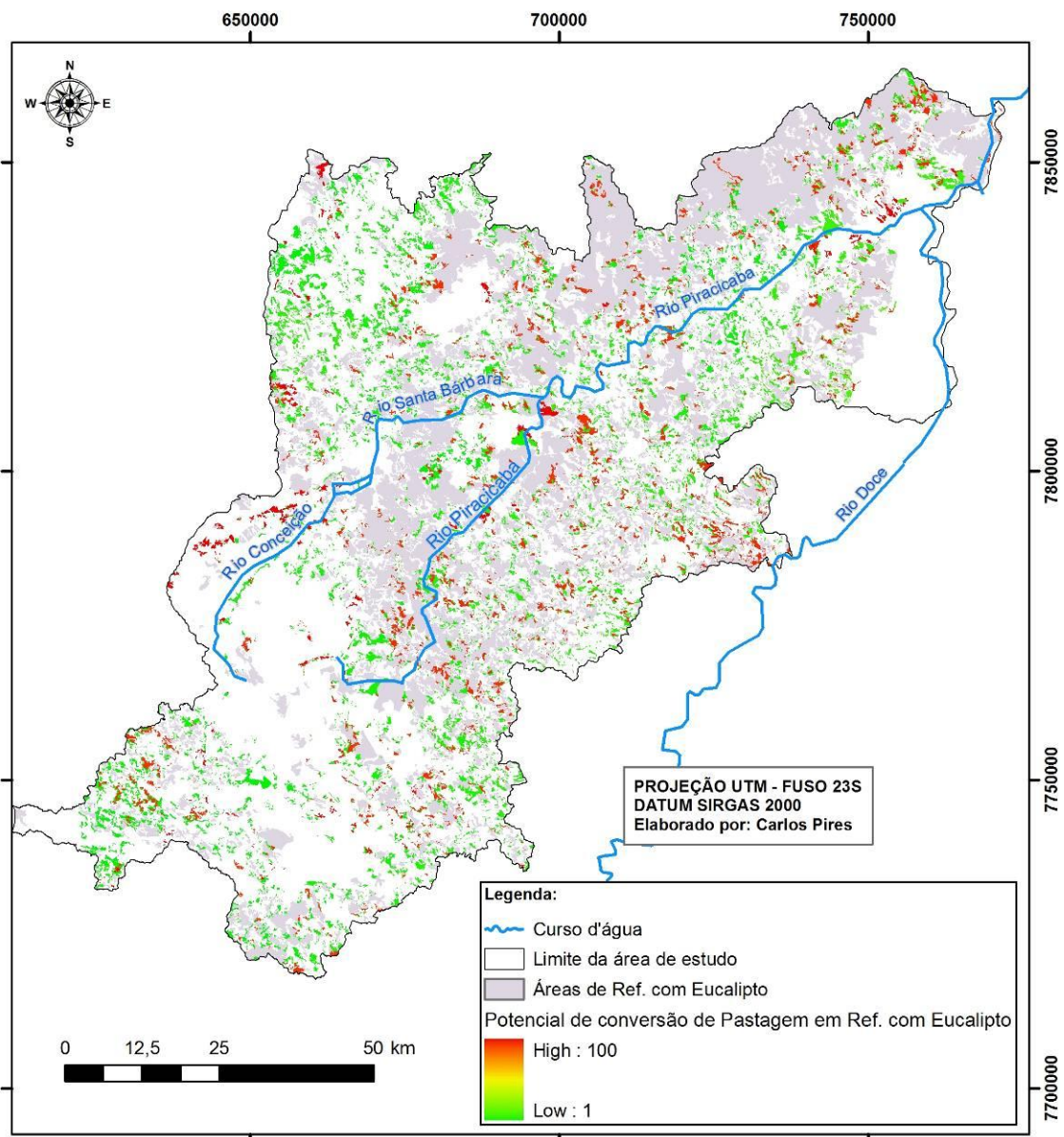


Figura 26 – Potencial de conversão de Pastagem em Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

5.2.2 Modelagem e validação do modelo de mudança

A modelagem e validação do modelo de mudança de cobertura da terra, descrita no Capítulo 4 – Seção 4.3, teve como base para alocação da mudança, a interação dos mapas de potenciais de conversão com a matriz de transição das cadeias de Markov. A matriz de transição da cobertura da terra, entre 2010 e 2013, é apresentada na Tabela 15,

que mostra nas diagonais os percentuais de persistência e nas linhas o percentual de mudança.

Tabela 15 – Matriz de transição da cobertura da terra entre 2010 e 2013 com os percentuais de mudança e persistência.

	Aflo.	Camp.	S. Exp.	Reflo.	FESM	Água	Min.	Pas.	Urb.
Aflo.	0,9945	0	0,0055	0	0	0	0	0	0
Camp.	0	0,9849	0,003	0,002	0	0	0,0013	0,0085	0
S. Exp.	0	0	0,2129	0,10	0,1581	0,0019	0,1470	0,1712	0,2077
Reflo.	0	0	0,001	0,8734	0,0469	0	0,0014	0,0769	0
FESM	0	0	0,0036	0,0745	0,8296	0,0010	0,0005	0,0906	0
Água	0	0	0	0	0,0015	0,9964	0,0021	0	0
Min.	0	0	0,007	0,0115	0	0,0014	0,9797	0	0,0002
Pas.	0	0	0,008	0,1079	0,0702	0,002	0	0,8062	0,0068
Urb.	0	0	0,008	0	0,00	0,007	0	0,0072	0,9785

Aflo – Afloramento

Camp. – Vegetação Campestre Natural

S. Exp. – Solo Exposto

Reflo. – Reflorestamento com Eucalipto

Min. – Mineração

Pas. - Pastagem

Urb. - Urbano

O cálculo da quantidade de mudança para 2013, assumindo as premissas do presente trabalho (definidas no Capítulo 1), mostra que para um período de três anos, a tendência das classes de cobertura é maior para persistência do que para mudança. Para a maioria das classes de cobertura o valor da persistência foi superior a 80% de probabilidade. A única exceção foi a classe de cobertura Solo Exposto, que pela modelagem tem apenas 21,29 % de probabilidade de permanecer como Solo Exposto. Isso acontece porque pela modelagem 20,77% das áreas de Solo Exposto tendem a se converter em Urbano, 17,12% em Pastagem, 14,70% em Mineração, 15,81% em FESM e 10% em Reflorestamento com Eucalipto.

Em relação as demais classes de cobertura, as maiores probabilidades de mudança envolvem a conversão de Pastagem em Reflorestamento com eucalipto (10,79%), de FESM para Pastagem com 9,06%, de Pastagem para FESM com 7,02%.

Na Figura 27 são representados o mapa de cobertura da terra em 2013 mapeado em campo, gerado a partir de imagem LANDSAT, e o mapa da cobertura da terra simulado para 2013. Como a simulação foi feita para apenas três anos, a diferença no mapeamento é pouco perceptível. Assim sendo, a percepção das divergências entre a cobertura mapeada e a simulada fica mais clara na validação do modelo, apresentada a seguir.

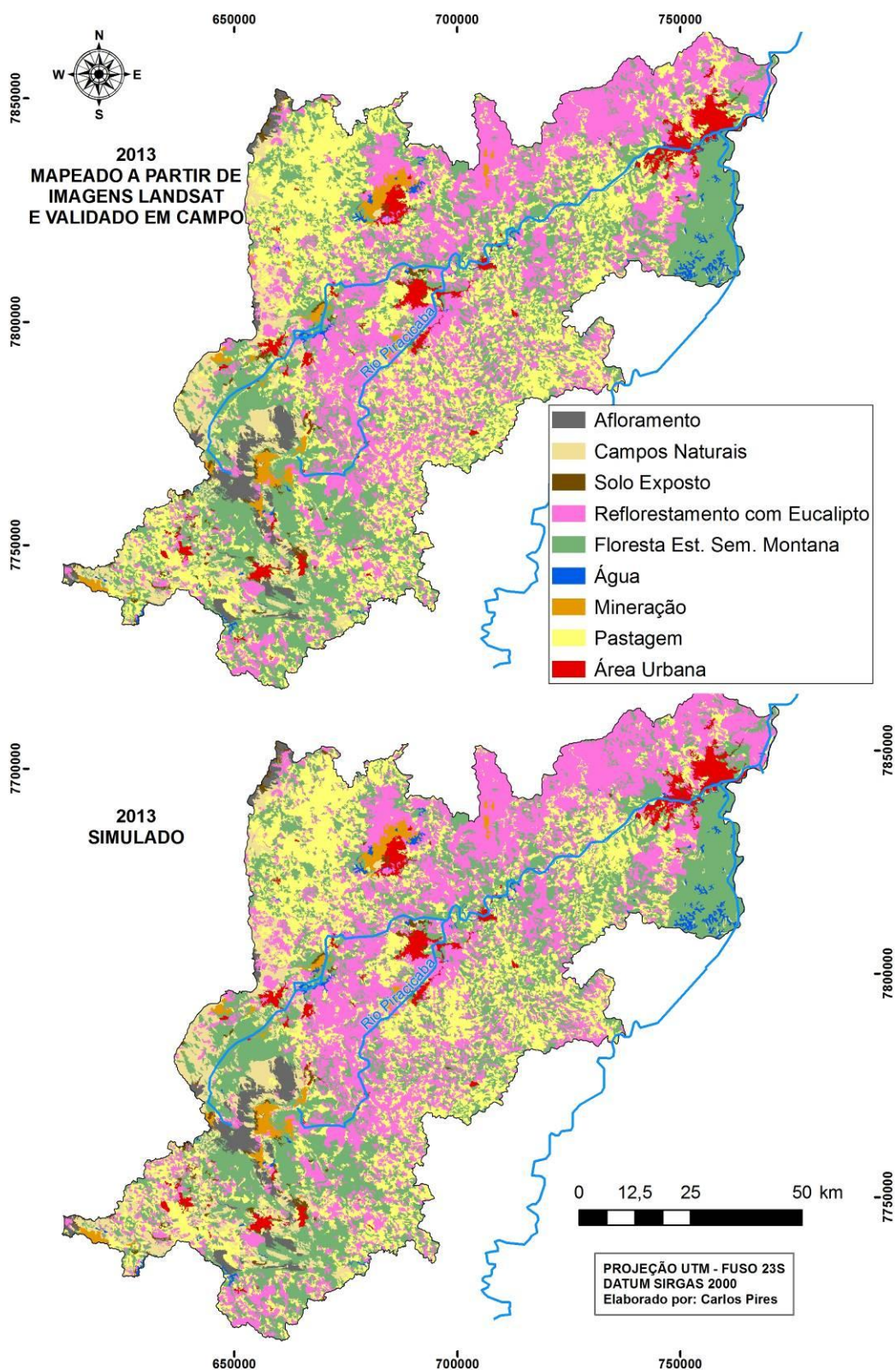


Figura 27 – Mapas da cobertura da terra em 2013 – municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA: gerado a partir de imagem LANDSAT e simulado pelo modelo LCM.

A validação da cobertura da terra para 2013, a partir da cobertura mapeada e da simulada, foi realizada com base nas etapas descritas no Capítulo 4 – Seção 4.3.1. A validação foi feita para diferentes tamanhos de célula. Isso é necessário, pois é difícil acertar exatamente qual *pixel* mudou de cobertura. É esperado que a medida que o tamanho da célula de análise diminui, menor é o acerto entre a cobertura mapeada e a simulada. Dessa forma, realizar a validação sob diferentes tamanhos de célula permite entender como varia o acerto entre a cobertura mapeada e a simulada, para diferentes tamanhos de análise.

5.2.2.1 Floresta estacional semidecidual montana

Na Figura 28 são apresentadas graficamente as diferenças entre a cobertura FESM mapeada e a simulada para 2013 para células de análise de 10km x 10 km, 7,5 km x 7,5 km, 5km x 5 km, 2km x 2km, 1km x 1km, 500m x 500m e 250m x 250 m. Nessa figura são apresentados também: a média de acerto e o desvio padrão a partir da diferença entre o mapeado e o simulado.

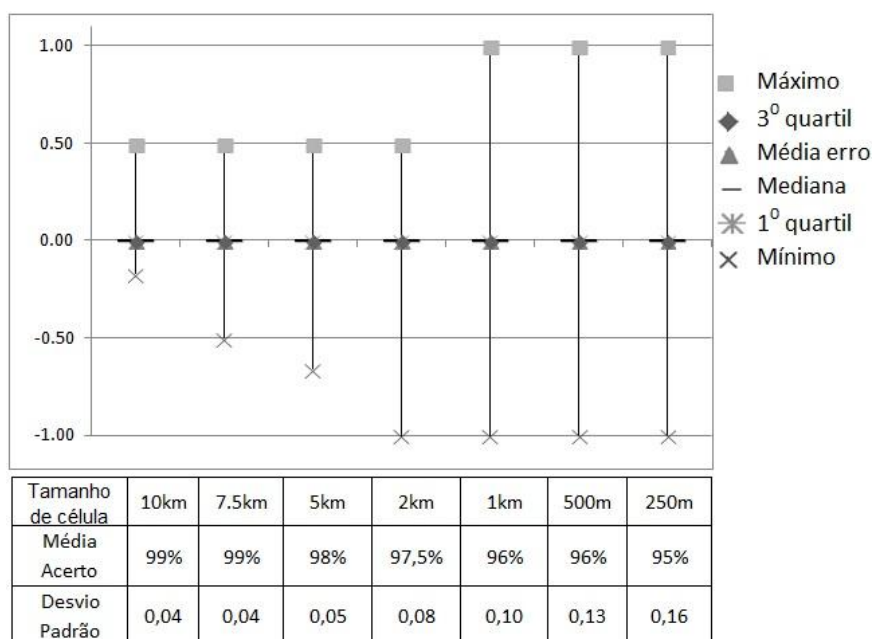


Figura 28 – Diferenças entre a cobertura FESM mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise.

No gráfico da Figura 28 é possível observar que a medida que o tamanho da célula de análise diminui, o ajuste entre a cobertura mapeada e a simulada também diminui. Isso pode ser visto através do aumento da distância do máximo e do mínimo, do aumento do desvio padrão e da queda da média de acerto, que varia de 99%, com a célula de análise 10 km x 10 km, a 95%, com a célula de análise 250 m x 250 m. É possível observar ainda que o terceiro quartil, a mediana e o primeiro quartil estão juntos – com valores muito próximos. Isso é um indicativo que nos tamanhos de célula avaliados existe pouca variação entre a cobertura mapeada e a simulada. Na Figura 29, as diferenças entre a cobertura mapeada e a simulada são destacadas e classificadas em áreas de falso-positivo e falso-negativo.

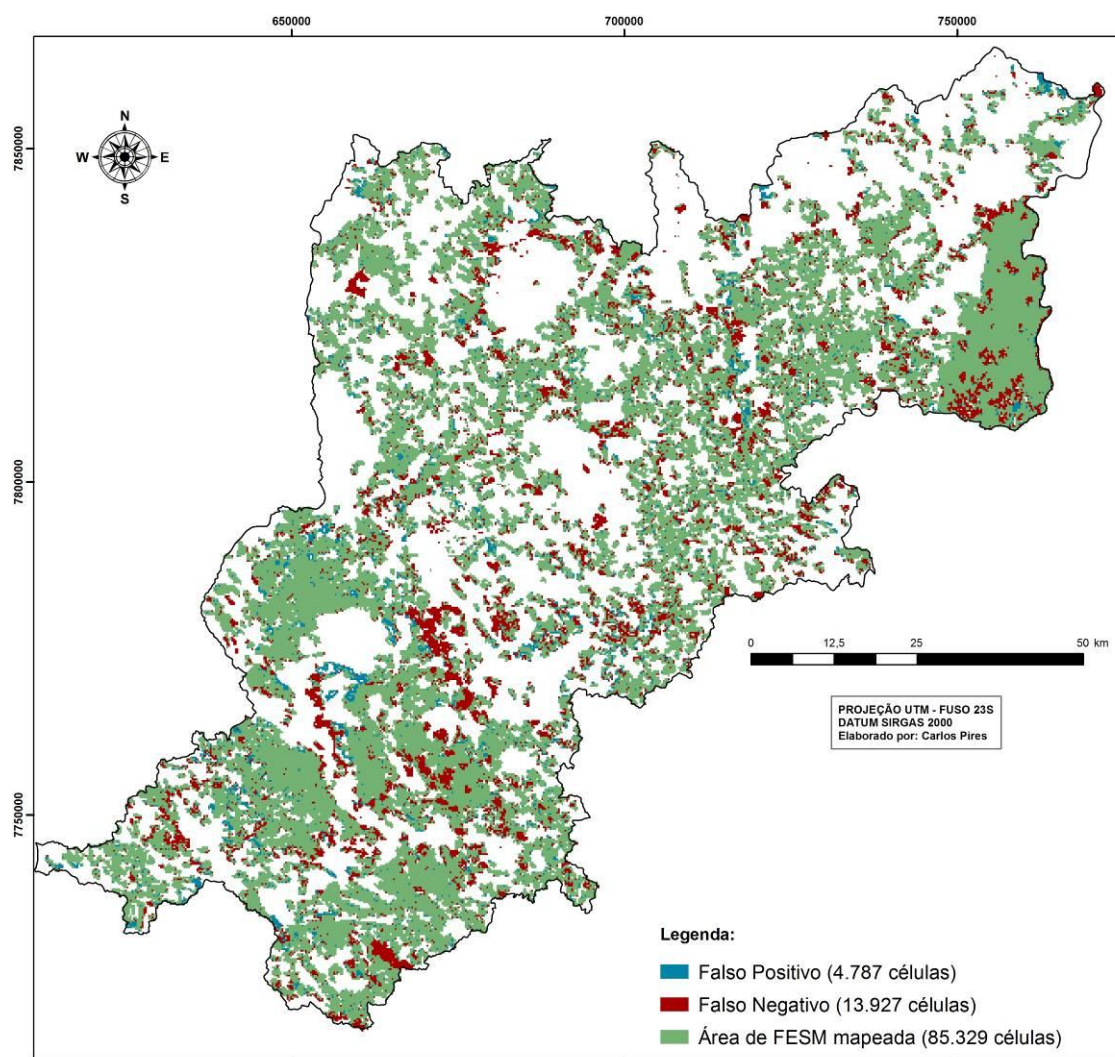


Figura 29 – Mapa de áreas de falsos-positivos e falsos-negativos da cobertura FESM: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

É possível observar na Figura 29 que do total de 85.329 células (de 250 x 250m) de FESM, 4.787 (6%) são áreas de falso-positivo e 13.927 (16%) áreas de falso-negativo. Contudo, essas células possuem diferentes percentuais de acerto, como pode ser observado na Figura 30.

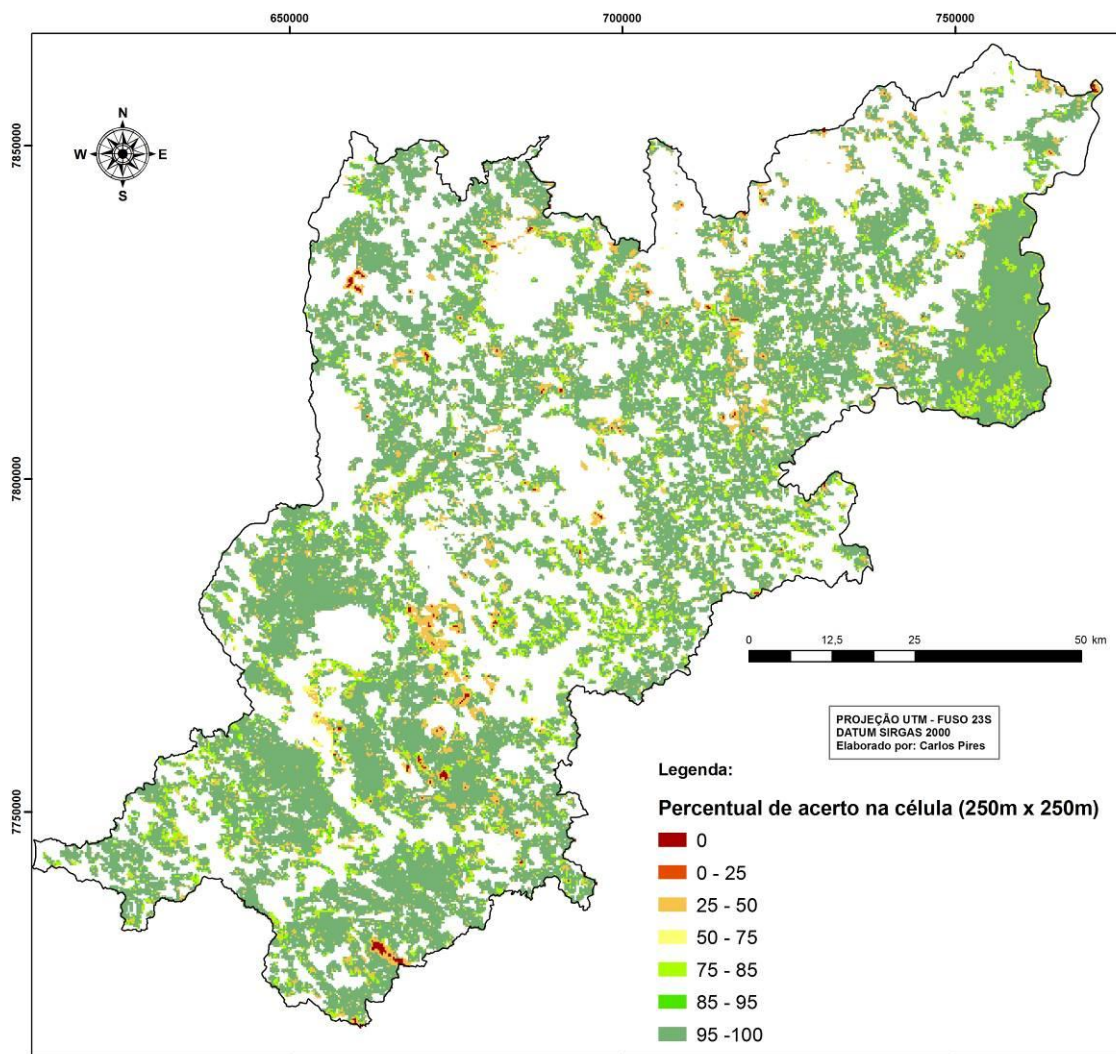


Figura 30 – Percentual de acerto da cobertura FESM: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Na Figura 30 é possível observar que a maior parte das células possui mais de 95% de acerto. Para melhor compreensão da proporção de acertos, a Tabela 16 apresenta quantidade de células por faixa de percentual de acerto e a representatividade dessas células em relação ao total mapeado da classe FESM.

Tabela 16 – Quantidade de células por faixa de acerto entre a cobertura mapeada e a simulada para a classe FESM.

Percentual de Acerto (%)	Quantidade de Células	Representatividade (%)
0	381	0,45
0 - 25	1	0,00
25 - 50	8.131	9,53
50 - 75	1.704	2,00
75 - 85	7.877	9,23
85 - 95	620	0,73
95 - 100	66.615	78,07
Total	85.329,00	100,00

Conforme Tabela 16, as células com nenhum acerto representam 0,45%. Por outro lado, 78,07% das células estão concentradas na faixa de percentual de acerto acima de 95%.

5.2.2.2 Pastagem

Na Figura 31 são apresentadas graficamente as diferenças entre a cobertura Pastagem mapeada e a simulada para 2013 para células de análise de 10km x 10 km, 7,5 km x 7,5 km, 5km x 5 km, 2km x 2km, 1km x 1km, 500m x 500m e 250m x 250 m. Nessa figura são apresentados também: a média de acerto e o desvio padrão a partir da diferença entre o mapeado e o simulado.

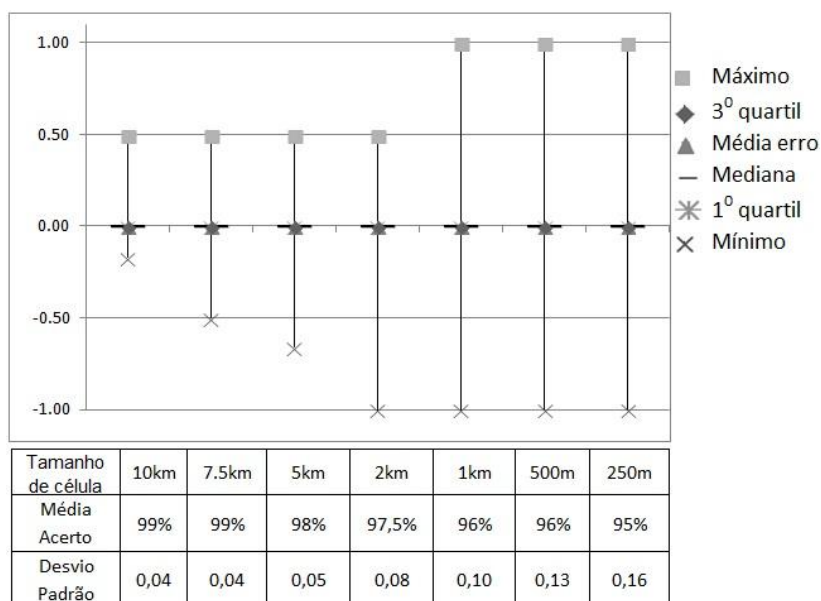


Figura 31 – Diferenças entre a cobertura Pastagem mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise.

No gráfico da Figura 31 é possível observar que a medida que o tamanho da célula de análise diminui, o acerto entre a cobertura mapeada e a simulada também diminui. Isso pode ser visto através do aumento da distância do máximo e do mínimo, do aumento do desvio padrão e da diminuição da média de acerto, que vai de 99%, com as células de análise 10 km x 10 km, para 95%, com as células de análise de 250 m x 250 m. É possível observar ainda que o terceiro quartil, a mediana e o primeiro quartil estão com valores muito próximos. Isso é um indicativo que para os tamanhos de células avaliados existe pouca variação entre a cobertura mapeada e a simulada. Na Figura 32, as diferenças entre a cobertura Pastagem mapeada e a simulada são destacadas e classificadas em áreas de falso-positivo e falso-negativo.

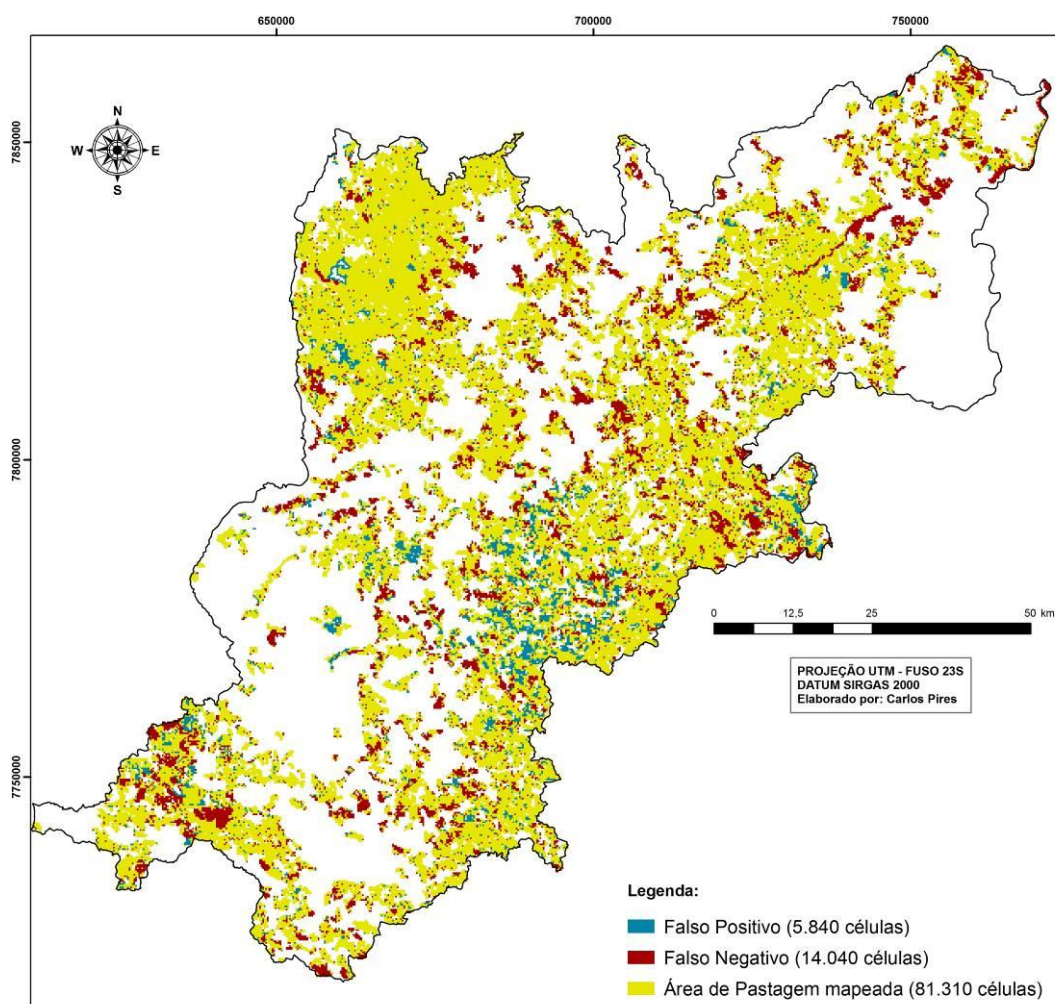


Figura 32 – Mapa de áreas de falsos-positivo e falsos-negativos para a cobertura Pastagem: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

De acordo com os dados apresentados na Figura 32, tem-se que do total de 81.310 células (250 x 250m) de Pastagem, 5.840 (~7%) são áreas de falso-positivo e 14.040 (17%) são áreas de falso-negativo. Contudo, essas células possuem diferentes percentuais de acerto, como pode ser observado na Figura 33.

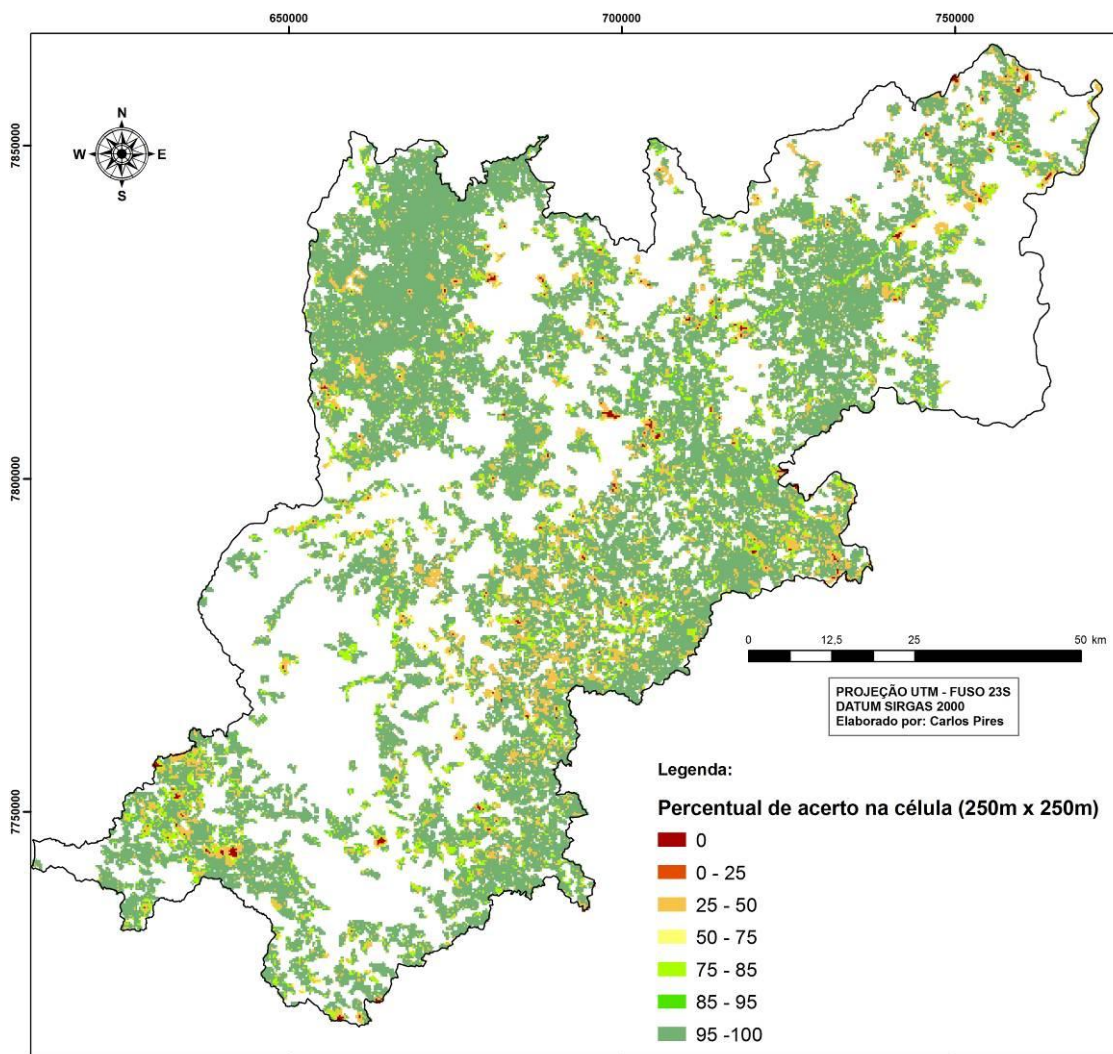


Figura 33 – Percentual de acerto entre a cobertura Pastagem mapeada e simulada: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Na Figura 33 é possível observar que a maior parte das células possui mais de 95% de acerto. Para melhor compreensão da proporção de acertos, a Tabela 17 apresenta quantidade de células por faixa de percentual de acerto e a representatividade dessas células em relação ao total mapeado da classe Pastagem.

Tabela 17– Quantidade de células por faixa de acerto entre a cobertura mapeada e a simulada para a classe Pastagem.

Percentual de Acerto (%)	Quantidade de Células	Representatividade (%)
0	474	0,58
0 - 25	0	0,00
25 - 50	10.789	13,27
50 - 75	1.634	2,01
75 - 85	6.508	8,00
85 - 95	475	0,58
95 - 100	61.430	75,55
Total	81.310,00	100,00

Conforme Tabela 17, as células com nenhum acerto representam 0,58%. Por outro lado, 75,55% das células estão concentradas na faixa de percentual de acerto acima de 95%.

5.2.2.3 Reflorestamento com Eucalipto

Na Figura 34 são apresentadas graficamente as diferenças entre a cobertura Pastagem mapeada e a simulada para 2013 para células de análise de 10km x 10 km, 7,5 km x 7,5 km, 5km x 5 km, 2km x 2km, 1km x 1km, 500m x 500m e 250m x 250 m. Nessa figura são apresentados também: a média de acerto e o desvio padrão a partir da diferença entre o mapeado e o simulado.

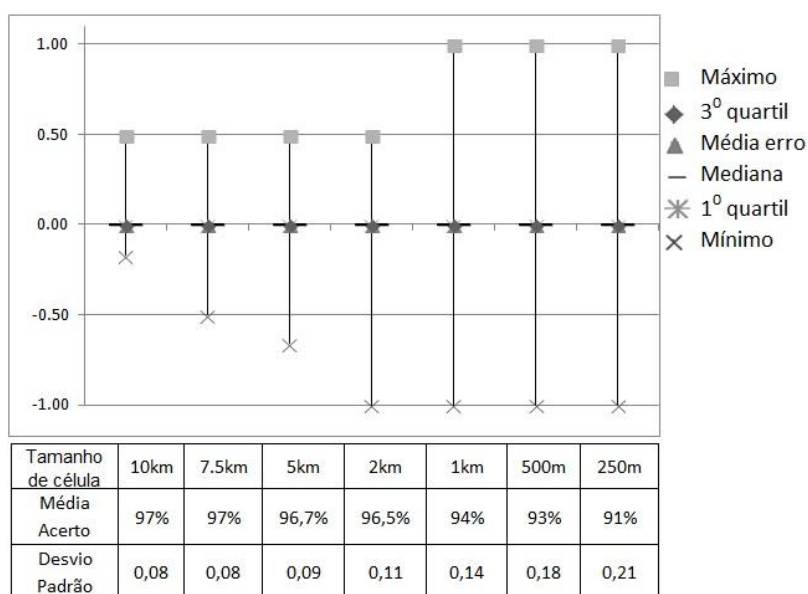


Figura 34 – Diferenças entre a cobertura Reflorestamento com Eucalipto mapeada e a simulada para 2013 em diferentes tamanhos de células de análise.

Conforme gráfico da Figura 34, é possível observar que a medida que o tamanho da célula de validação diminui, o acerto entre o mapeado e o simulado também diminui. Isso pode ser visto através do aumento da distância do máximo e do mínimo, do aumento do desvio padrão e da diminuição da média de acerto que vai de 97% nas células 10km x 10km, para 91% com tamanho de célula de 250 m x 250 m. É possível observar ainda que o terceiro quartil, a mediana e o primeiro quartil estão juntos – com valores muito próximos. Isso é um indicativo que nessas células existem pouca variação entre o mapeado e o simulado. Na Figura 35, as diferenças entre o mapeado e o simulado são destacadas e classificadas em áreas de falso positivo e falso negativo.

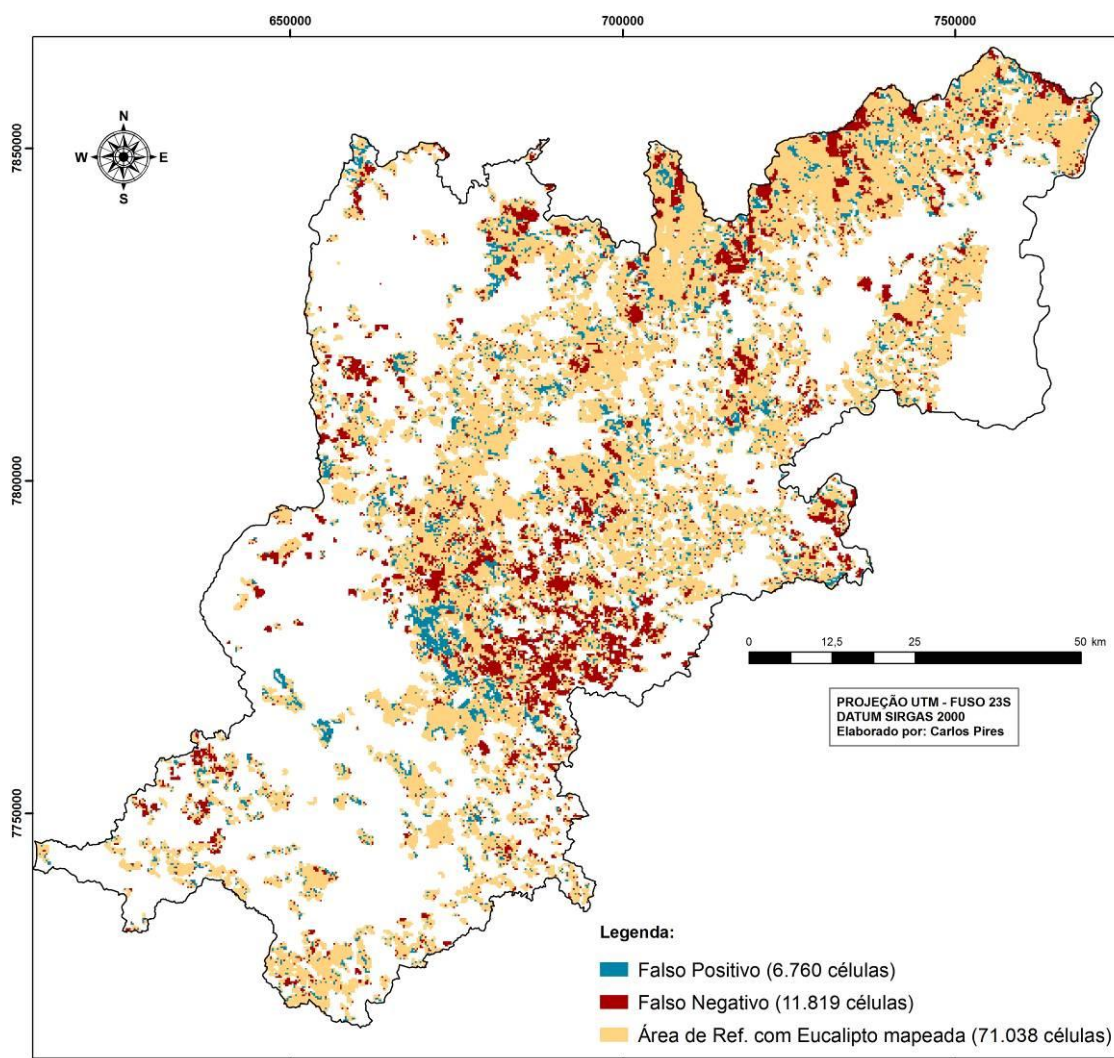


Figura 35 – Mapa de áreas de falsos-positivos e falsos-negativos para a cobertura Reflorestamento com Eucalipto: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

É possível observar na Figura 35 que do total de 71.038 células de Reflorestamento com eucalipto, 6.760 (9,51%) são áreas de falsos-positivo e 11.819 (16,63%) áreas de falsos-negativo. Contudo, essas células possuem diferentes percentuais de acerto como pode ser observado na Figura 36.

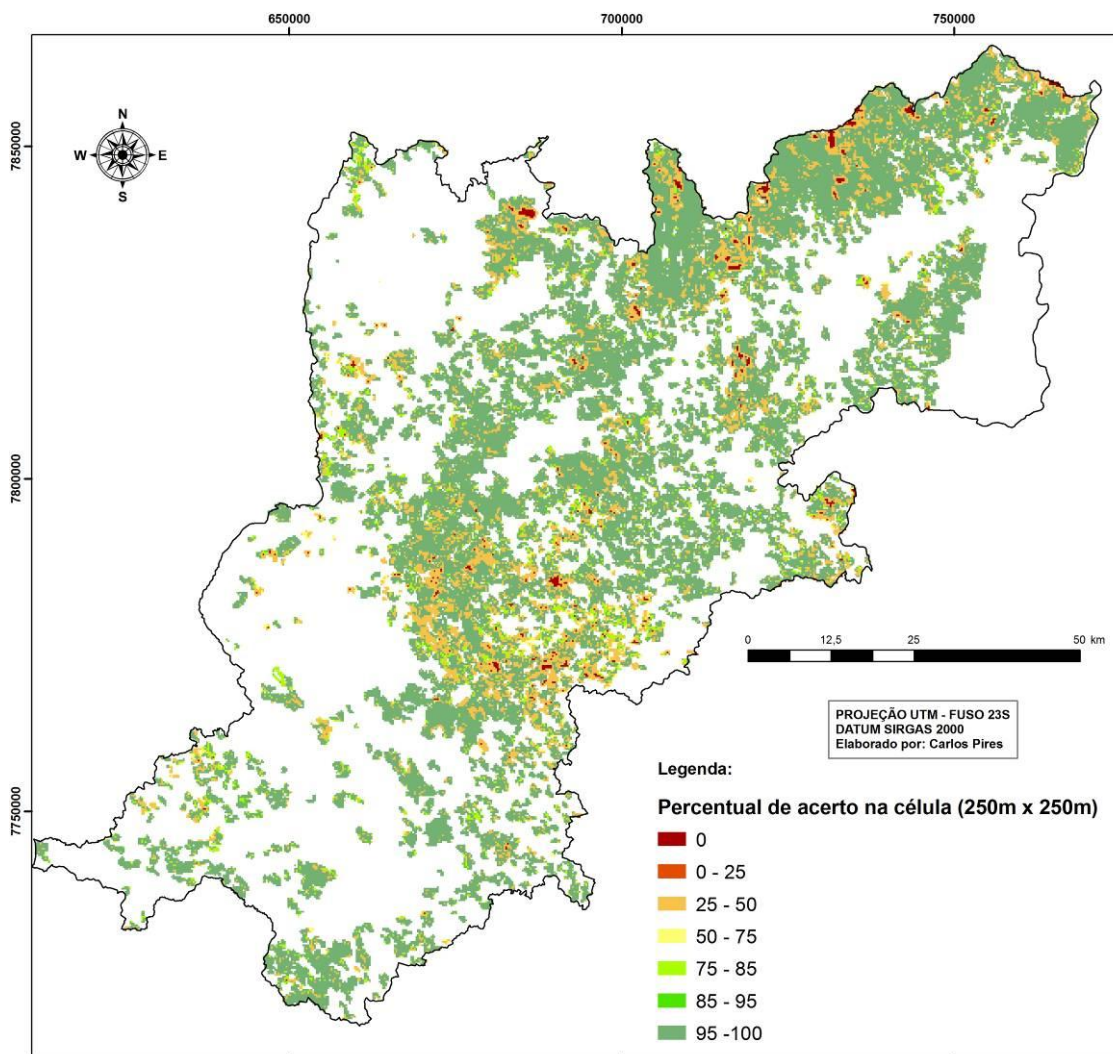


Figura 36 – Percentual de acerto entre a cobertura Reflorestamento com Eucalipto mapeada e simulada: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Na Figura 36 é possível observar que a maior parte das células possui mais de 95% de acerto. Para melhor compreensão da proporção de acertos, a Tabela 18 apresenta quantidade de células por faixa de percentual de acerto e a representatividade dessas células em relação ao total mapeado da classe Pastagem.

Tabela 18 - Quantidade de células por faixa de acerto entre a cobertura mapeada e a simulada para a classe Reflorestamento com Eucalipto.

Percentual de Acerto (%)	Quantidade de Células	Representatividade (%)
0	736	1,04
0 - 25	4	0,01
25 - 50	12.597	17,73
50 - 75	1.438	2,02
75 - 85	3.578	5,04
85 - 95	226	0,32
95 - 100	52.459	73,85
Total	71.038,00	100,00

Conforme Tabela 18, as células com nenhum acerto representam 0,58%. Por outro lado, 75,55% das células estão concentradas na faixa de percentual de acerto acima de 95%.

De modo geral, considerando áreas de análise de 250 m x 250 m, a média de acerto do modelo foi superior a 90% em todas as classes de cobertura. Mesmo as áreas de falsos-positivos e falsos-negativos possuem diferentes percentuais de acerto, e as áreas de análise que onde não houve nenhum acerto representam 0,45% para FESM, 0,58% para Pastagem e 1,04% para Reflorestamento com Eucalipto.

5.2.3 Simulação da cobertura da terra para 2035

De 1985 para 2010 ocorreram diversas mudanças na cobertura da terra na área de estudo, conforme resultados apresentados na Seção 5.1.3. Dentre essas, nesse período de 25 anos, houve grande expansão das áreas de Reflorestamento com Eucalipto. Para investigar se essa tendência se manterá para os próximos 25 anos, foi feita uma simulação da cobertura da terra para o ano de 2035 sob o cenário de que a demanda por eucalipto continuará aumentando conforme observado entre 1985 e 2010.

Utilizando o modelo-LCM (Seção 2.3.1) essa simulação foi feita de duas formas: *hard prediction* e *soft prediction*. Na alocação *hard prediction* a simulação da cobertura para 2035 se dá de forma determinista, e na alocação *soft prediction* a simulação é representada como classes de potencial de vulnerabilidade à mudança variando entre 0 a 100%. Dessa forma, a partir da calibração e validação do modelo, a matriz de transição

potencial para as classes de cobertura da terra entre os anos de 2010 e 2035 é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Matriz de transição potencial para as classes de cobertura da terra entre os anos de 2010 e 2035.

	Aflo	Cam	S Exp	Reflo	FESM	Água	Min	Past	Urb
Aflo	0,955	0,0000	0,022	0,0000	0,0000	0,0000	0,021	0,0000	0,0000
Camp	0,000	0,888	0,005	0,034	0,0000	0,000	0,017	0,044	0,008
S Exp	0,000	0,0000	0,090	0,170	0,168	0,007	0,154	0,187	0,221
Reflo	0,0000	0,0000	0,003	0,677	0,126	0,001	0,008	0,172	0,009
FESM	0,0000	0,0000	0,004	0,209	0,579	0,004	0,007	0,187	0,006
Água	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,006	0,971	0,022	0,0000	0,0000
Min	0,0000	0,0000	0,009	0,058	0,016	0,011	0,868	0,021	0,013
Pas	0,0000	0,0000	0,007	0,239	0,149	0,002	0,005	0,569	0,025
Urb	0,0000	0,0000	0,012	0,019	0,037	0,007	0,006	0,045	0,870

Aflo – Afloramento

Camp. – Vegetação Campestre Natural

S. Exp. – Solo Exposto

Reflo. – Reflorestamento com Eucalipto

Min. – Mineração

Pas. – Pastagem

Urb. – Urbano

Em 25 anos as classes de cobertura com menor chance de sofrer alteração, ou seja, com maior probabilidade de persistência, são: Afloramento (95,59%); Vegetação Campestre Natural (88,89%); Mineração (86,81%); e Urbano (87,03%). As transições mais significativas continuam com as três classes de cobertura que tem estreita relação de trocas entre si: Pastagem, FESM e Reflorestamento com Eucalipto. A Pastagem é a classe de cobertura com maior potencial de conversão para Reflorestamento com Eucalipto, com 23,91% de probabilidade, seguida da FESM, com 20,93% de probabilidade. A conversão em FESM se dá principalmente pela regeneração em áreas de pastagem, onde 14,96% dessas áreas podem se converter em FESM. Em seguida, as áreas com Reflorestamento de Eucalipto representam 12,69% de probabilidade de conversão para FESM. A mudança para Pastagem será maior nas áreas de FESM, onde 18,71% da área atual pode se converter para Pastagem. Em seguida estão as áreas de Reflorestamento com Eucalipto, com 17,22% de probabilidade de se converter em Pastagem. Portanto, considerando o cenário proposto é esperado que nos próximos 25 anos, a dinâmica mais expressiva de transição ainda ocorrerá sobre as três classes mais representativas da área de estudo: Pastagem, FESM e Reflorestamento com Eucalipto. Baseado na matriz de transição da cobertura da terra da Tabela 19, a alocação da

cobertura da terra é realizada para 2035 e é apresentada no mapa da Figura 37, juntamente com o mapa da cobertura da terra de 2010, para comparação.

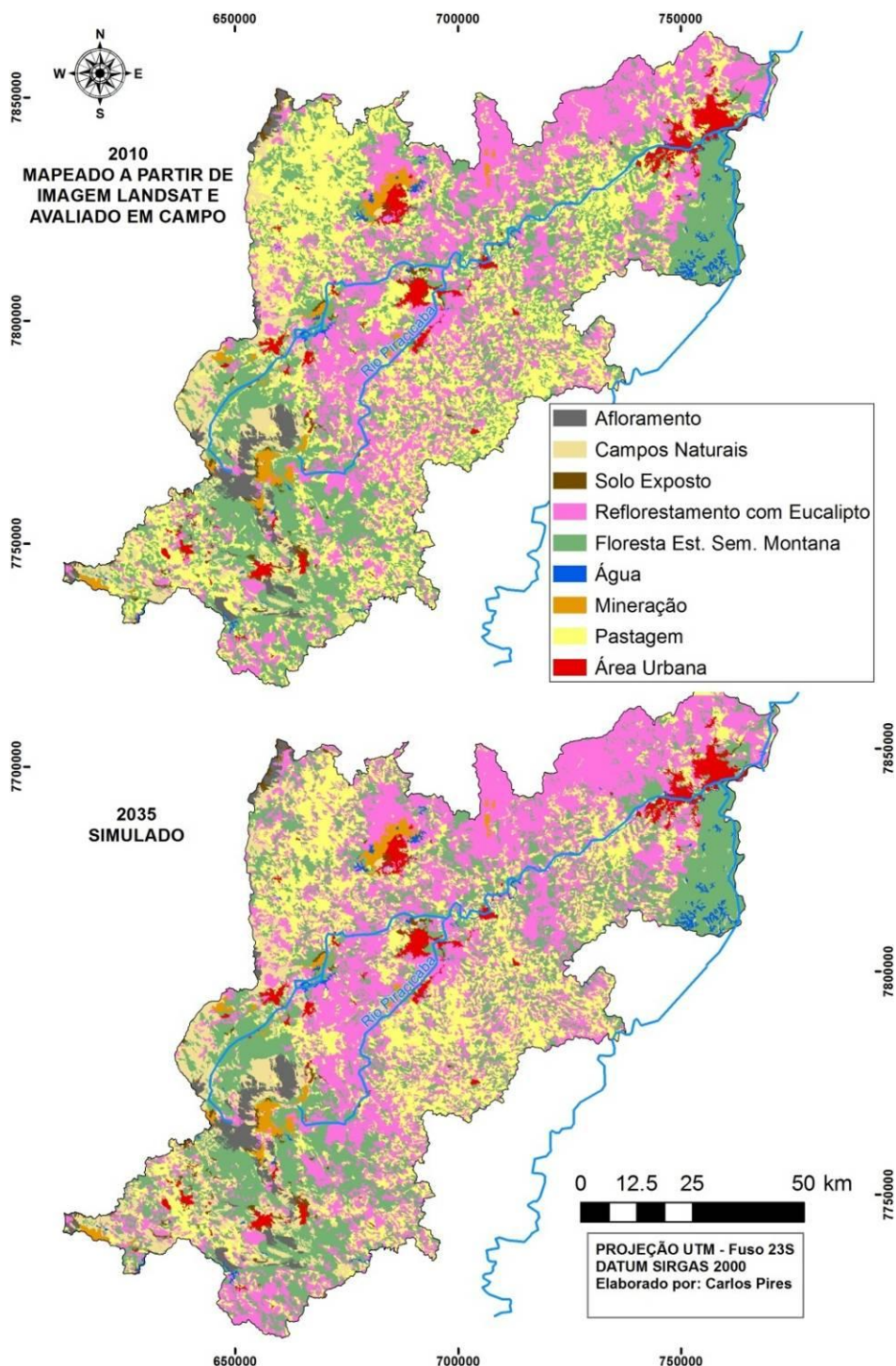


Figura 37 – Mapas da cobertura da terra para 2010 (mapeada a partir de imagem LANDSAT) e 2035 (simulada pelo modelo-LCM): municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Na Figura 38 é apresentado um gráfico com a representatividade das classes de cobertura da terra em 2010 e 2035.

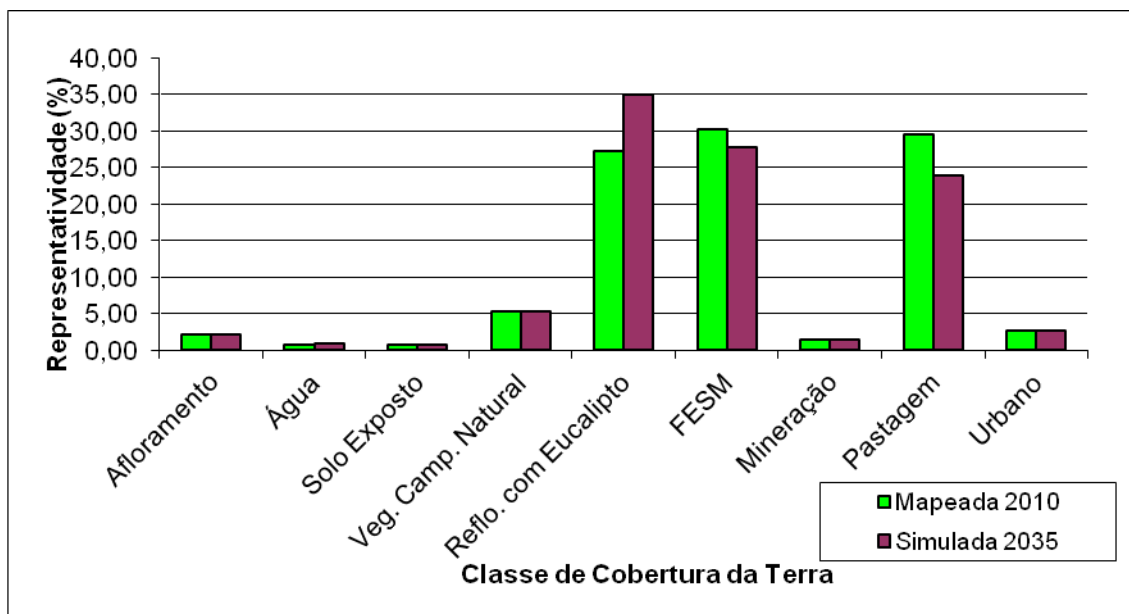


Figura 38 – Representatividade das classes de cobertura da terra em 2010 e 2035.

Conforme Figura 38, em 2010 as classes com maiores extensões em são FESM e Pastagem. Contudo, para 2035, caso seja mantida a mesma dinâmica de produção e demanda por eucalipto conforme observada entre 1985 e 2010, é esperado que a área de Reflorestamento com Eucalipto passe a ser a mais representativa, ocupando quase 35% da área de estudo. Isso representa um aumento de cerca de 8% da área de reflorestamento com eucalipto, em 25 anos. Esse aumento está diretamente ligado a diminuição das áreas de FESM e Pastagem, que podem perder até 2,33% e 5,57%, respectivamente, de suas áreas atuais.

Analisando o potencial de mudança numa abordagem de vulnerabilidade à mudança, o resultado é menos determinista, mas coerente com a dinâmica de mudança observada na área de estudo. Dessa forma, foi gerada uma predição de mudança *soft prediction*, apresentada no mapa da Figura 39. Esse mapa mostra a vulnerabilidade à mudança numa escala de 0 a 100%, conforme apresentado na Tabela 11 no Capítulo 4 – Seção 4.3.3.

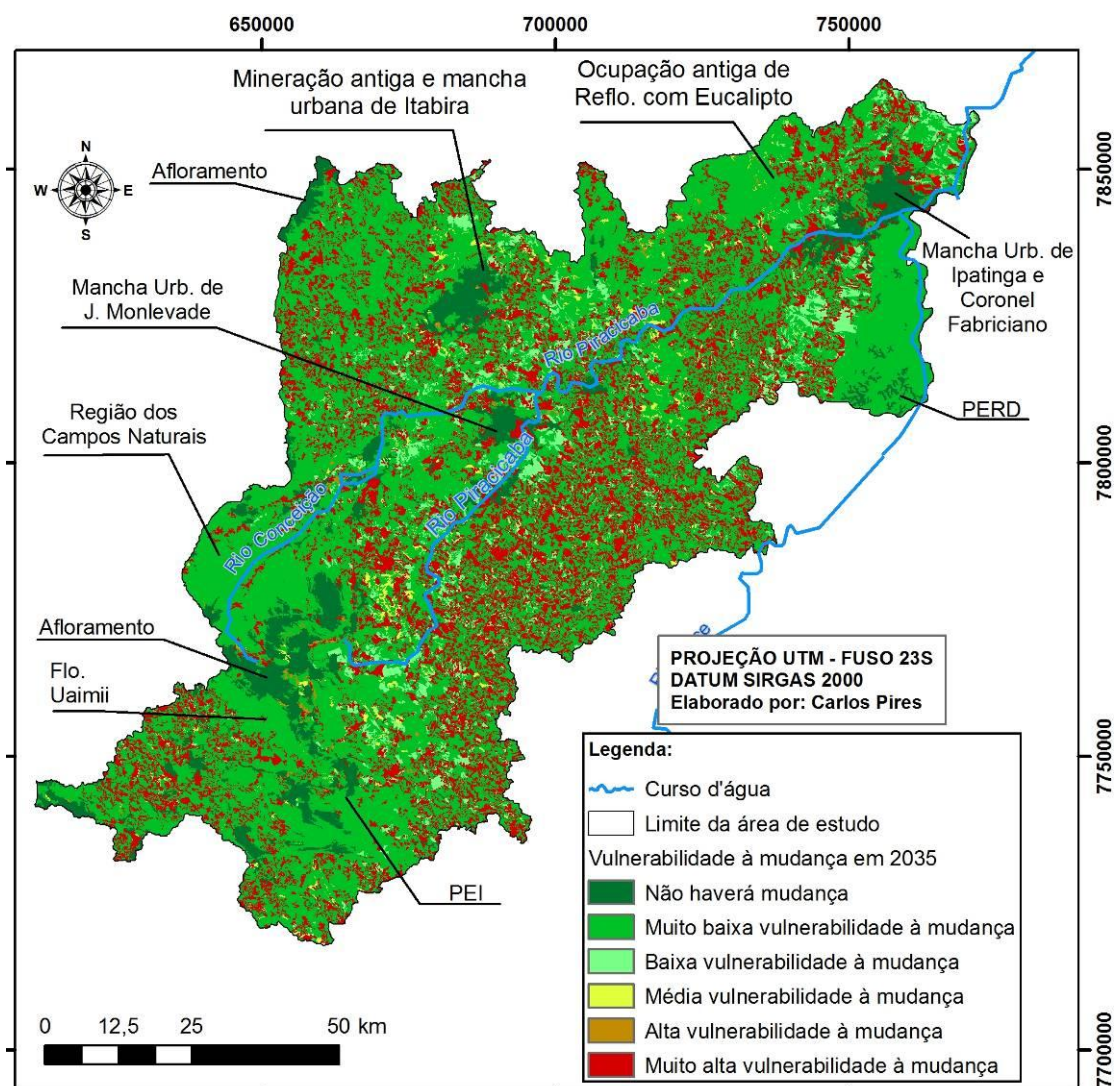


Figura 39 – Mapa de vulnerabilidade à mudança até 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

No mapa da Figura 39 é possível observar que algumas áreas não são vulneráveis em relação a alteração na cobertura da terra, essas áreas representando 8,09% da área de estudo. É o caso de áreas de manchas urbanas consolidadas, como, por exemplo, as manchas urbanas referentes a Ipatinga, Coronel Fabriciano, Itabira e João Monlevade. Do mesmo modo, áreas relacionadas aos afloramentos também possuem vulnerabilidade zero a mudança.

A maior parte da área de estudo está localizada em áreas de “muito baixa” vulnerabilidade à mudança, representando 62,20%. Essas áreas de “muito baixa” vulnerabilidade à mudança estão relacionadas com Unidades de Conservação, como o

PERD, o PEI, a Floresta do Uaimii, e com as áreas com altitudes elevadas como onde estão localizados os campos naturais e ainda à áreas de Reflorestamento de eucalipto mais antigas próximas as manchas urbanas de Ipatinga e Coronel Fabriciano.

As áreas de baixa, média e alta vulnerabilidade à mudança possuem representatividade pequena, 4,78%, 1,17% e 0,29%, respectivamente. Essas áreas estão espalhadas ao longo da área de estudo e têm relação direta com a proximidade das áreas de “muito baixa” e “muito alta” vulnerabilidade. As áreas de “muito alta” vulnerabilidade à mudança representam 23,47% e estão espalhadas por toda a área de estudo. Essas áreas estão relacionadas, principalmente, à classe de cobertura pastagem que é a cobertura com maior potencial de mudança: cerca de 43,02%, conforme Tabela 19. Além disso, as áreas de “muito alta” vulnerabilidade estão relacionadas à proximidade das áreas de mudança entre 1985 e 2010 e as áreas de Reflorestamento com Eucalipto.

5.3 Análise da alteração da estrutura da paisagem

Nesta seção são apresentados os resultados da análise da alteração da estrutura da paisagem apoiada pelas métricas de paisagem (número de manchas, área, áreas núcleo e grau de isolamento das manchas, descritas no Capítulo 2 - Seção 2.4), em 1985, 2010 e 2035. Para essa análise, conforme descrito no Capítulo 4 – Seção 4.4, as classes de cobertura da terra, mapeadas (1985 e 2010) e simulada (2035) foram agrupadas e reclassificadas conforme apresentado na Tabela 20. O resultado desse agrupamento é apresentado nos mapas da Figura 40, para 1985, 2010 e 2035.

Tabela 20 – Reclassificação das classes de cobertura para análise da Paisagem.

Novas Classes de cobertura da terra	Classes de Cobertura da terra
Refúgio Ecológico Montano	Afloramentos e Vegetação Campestre Natural
Floresta	Floresta Estacional Semidecidual Montana
Reflorestamento	Reflorestamento com Eucalipto
Pastagem	Pastagem
Corpo d'água	Corpos d'água
Área Antropizada	Áreas Urbanas, Solo Exposto e Mineração

O resultado dessa reclassificação é apresentado nos mapas da Figura 39.

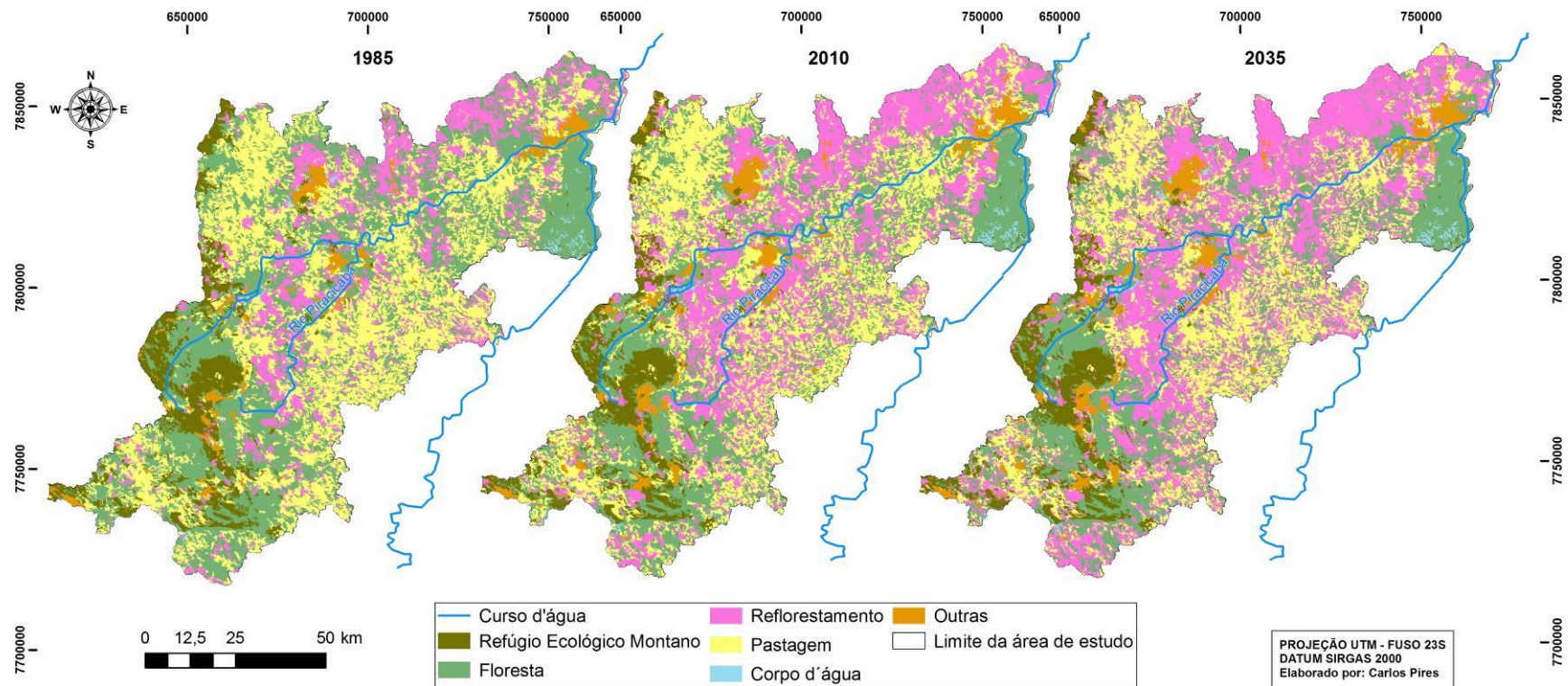


Figura 40 – Classes de cobertura da terra para análise da estrutura da paisagem na área de estudo: 1985; 2010 e 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

A comparação das áreas (em hectares) das classes de cobertura para 1985, 2010 e 2035 é apresentada no gráfico da Figura 41.

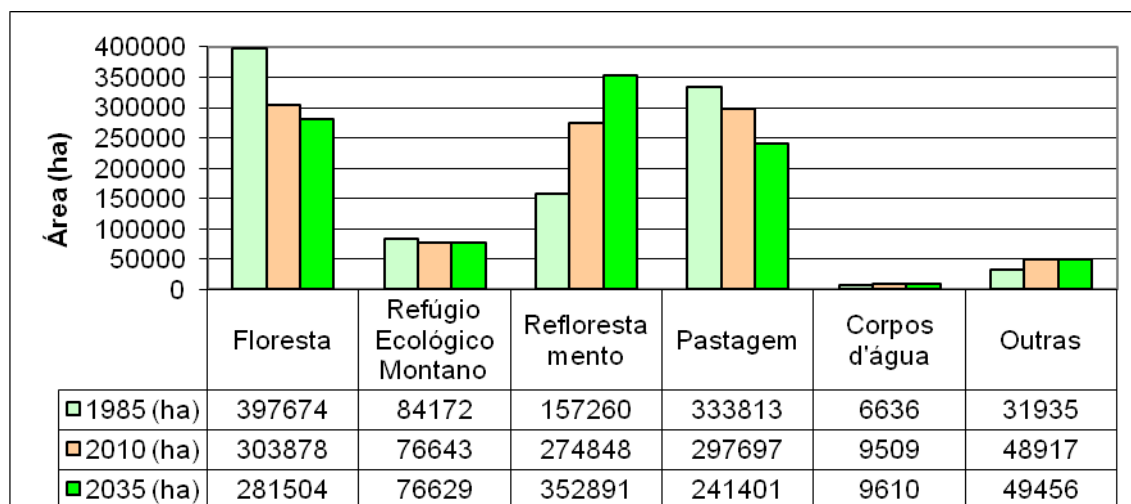


Figura 41 – Classes de cobertura da terra para análise da estrutura da paisagem em 1985, 2010 e 2035: municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA.

Conforme Figura 41, em 1985, a classe de cobertura mais representativa é Floresta, ocupando 39,32% da área de estudo. Em 2010, a mais representativa era Pastagem, ocupando 34,27% da área de estudo. Em 2035, a tendência é que a classe de cobertura mais representativa passe a ser Reflorestamento, com 34,88% da área de estudo. Essa dinâmica mostra a evolução das transformações da paisagem, onde num primeiro momento havia maior área de Floresta; com o passar do tempo, no quadro atual, maior área de pastagem; e assumindo as premissas da modelagem, a tendência é de domínio do Reflorestamento. Isso fica evidenciado no gráfico da Figura 38, que mostra que enquanto as classes de Pastagem e Floresta estão diminuindo, no intervalo de tempo entre 2010 e 2035, a de Reflorestamento está aumentando. As classes de coberturas que apresentaram menores variações são Corpo d'Água e Refúgio Ecológico Montano. Em relação aos corpos d'água não são esperadas grandes variações, pois não ocorreram grandes mudanças nos corpos d'água mapeados entre 1985 e 2010. Já a área de Refúgio Ecológico Montano apresenta pequena variação por estar em locais de difícil acesso, ou seja, em altitudes mais elevadas e próximas a afloramentos rochosos.

A seguir são apresentados os resultados da análise da alteração da estrutura da paisagem, para essas três datas, com apoio das seguintes métricas de paisagem: número de manchas, área, área núcleo e grau de conectividade das manchas (descritas no Capítulo 2 – Seção 2.4). As métricas foram calculadas apenas para as classes de cobertura da terra objeto da análise por métricas de paisagem definidas no Capítulo 4 – Seção 4.4: Reflorestamento, Refúgio Ecológico Montano e Floresta.

5.3.1 Número de manchas

Na Tabela 21 é apresentado o número de manchas para cada classe de cobertura nos três tempos: 1985, 2010 e 2035. O aumento do número de manchas ao longo do tempo pode indicar fragmentação da matriz.

Tabela 21 – Número de manchas para cada classe de cobertura em 1985, 2010 e 2035.

Classe de Cobertura da Terra	Número de Manchas		
	1985	2010	2035
Floresta	1.296	1.442	3.392
Refúgio Ecológico Montano	339	384	410
Reflorestamento	956	1.049	7.024
Total	2.591	2.875	10.826

Na Tabela 21 é possível observar que existe uma tendência geral de aumento da fragmentação da estrutura da paisagem, evidenciada pelo aumento do número de manchas em todas as classes ao longo do período de tempo analisado. A classe de cobertura Refúgio Ecológico Montano é a que apresentou menor variação no número de manchas ao longo do tempo, demonstrando que essa classe, dada as condições atuais e premissas da modelagem futura (definidas no Capítulo 1), é menos propensa a fragmentação. Esse fato pode estar relacionado a essa classe de cobertura estar associada à locais de difícil acesso, com declividade elevada e possuir solo litólico, o que dificulta o plantio de eucalipto. Em relação às classes de cobertura Floresta e Reflorestamento, o número de manchas tende a subir mais expressivamente do que na projeção para 2035, do que o Refúgio Ecológico Montano. Contudo, com uma diferença: na classe Floresta esse aumento do número de manchas está associado a fragmentação das manchas grandes em manchas menores. Já para o Reflorestamento, o

aumento está relacionado ao aumento de área dessa classe de cobertura. Essa dinâmica é mais bem entendida a partir da métrica área, apresentada na seção 5.3.2.

5.3.2 Área

De forma a complementar, a análise do número de manchas por faixas de tamanho, avalia a variação de área das manchas de cada uma das três classes de cobertura ao longo do tempo sendo uma medida adicional para entendimento do processo de fragmentação, o que pode ser feito por meio da métrica de área. Os resultados da aplicação dessa métrica são apresentados na Tabela 22 onde as manchas de cada uma das três classes de cobertura, em 1985, 2010 e 2035 são hierarquizadas em seis intervalos de classe, o que permite um diagnóstico da variação das manchas por intervalo de área.

Tabela 22 – Número de manchas para cada classe de cobertura da terra por faixa de área.

Área (ha)	Floresta			Refúgio Ecológico Montano			Reflorestamento		
	1985	2010	2035	1985	2010	2035	1985	2010	2035
1 - 50	708	723	2.764	168	216	292	481	478	6.439
50 - 100	257	316	289	69	71	55	222	282	273
100 - 200	150	204	182	37	36	24	128	147	181
200 - 500	92	127	95	35	34	20	77	91	80
500 - 1.000	46	33	35	14	11	6	22	28	27
1.000 - 10.000	38	34	28	15	15	12	26	21	21
10.000 - 20.000	1	2	3	1	1	1	0	1	1
>20.000	4	3	2	0	0	0	0	1	2

A partir da Tabela 22 é possível notar que de modo geral, para todas as classes de cobertura ao longo do tempo há um aumento no número de manchas na faixa de área que vai até 50 ha. Isso é um indicativo de que entre 1985 e 2010 houve fragmentação da paisagem e a tendência para 2035 é que isso se mantenha. A exceção entre 1985 e 2010 fica por conta da diminuição de manchas da classe de cobertura Reflorestamento que apresentou dinâmica contrária à observada na classe Floresta e Refúgio Ecológico Montano - diminuição do número de manchas nessa faixa. Havia 481 manchas em 1985

e passou para 478 em 2010. Esse fato está relacionado a expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto.

Em relação ao intervalo de área entre 10.000 e 20.000 ha, a tendência para a classe de Floresta é que haja um aumento do número de manchas, relacionado a fragmentação das manchas acima de 20.000 ha. Contrária à dinâmica de fragmentação da estrutura da paisagem observada para a Floresta, as áreas de Reflorestamento, a partir de 2010, tendem a aumentar o número de manchas no intervalo de área maior que 20.000 ha. Contudo, para que isso aconteça a demanda por produção de eucalipto deve continuar crescendo no mesmo ritmo observado entre 1985 e 2010 e que não ocorram mudanças econômicas no setor, nas políticas ambientais e na adoção de novas tecnologias que utilizem outras fontes de energia e outras formas de produção da celulose e papel.

O Refúgio Herbáceo é a classe menos vulnerável à fragmentação. Isso fica evidenciado pela pequena variação no período analisado, sendo que a maior mancha contínua, na faixa entre 10.000 e 20.000 ha se mantém inalterada nas datas analisadas.

5.3.3 Área núcleo

A fim de avaliar as manchas em relação aos efeitos de borda, a métrica de área núcleo é uma medida que avalia a qualidade das manchas em relação às interferências externas. Nesse sentido, foi aplicada a métrica “área núcleo” para contabilizar a quantidade de áreas núcleo, desconsiderando uma faixa (*buffer*) de 100 metros de borda (definida no Capítulo 4 – Seção 4.4) para cada mancha de cada classe de cobertura analisada, em 1985, 2010 e 2035. Na Tabela 23 é apresentado o resultado dessa quantificação de manchas dividida em 8 intervalos de área núcleo.

Tabela 23 – Quantidade de áreas núcleo por classe de cobertura e faixa de área.

Área (ha)	Floresta			Refúgio Ecológico Montano			Reflorestamento		
	1985	2010	2035	1985	2010	2035	1985	2010	2035
1 - 50	429	422	849	107	104	107	339	428	1.208
50 - 100	257	316	287	69	71	55	222	282	272
100 - 200	150	204	182	37	36	24	128	147	181
200 - 500	92	127	95	35	34	20	77	91	80
500 – 1.000	46	33	35	14	11	6	22	28	27
1.000 - 10.000	38	34	28	15	15	12	26	21	21
10.000 – 20.000	1	2	3	1	1	1	0	1	1
>20.000	4	3	2	0	0	0	0	1	2
Total	1.017	1.141	1.481	278	272	225	814	999	1.792

Conforme Tabela 23, a classe de cobertura que possui a menor quantidade de áreas núcleo é aquela que também possui menor representatividade, em relação as demais classes de cobertura (ver Figura 41): o Refúgio Ecológico Montano. Em 1985 havia 278 áreas núcleo para essa classe de cobertura, em 2010 esse número passou para 272, e a simulação para 2035 mostra que a tendência é que esse número diminua para 225 áreas núcleo. A variação no período entre 1985 e 2010 foi pequena, mas para 2035 é esperado um aumento maior. Contudo, o fato de mancha com área núcleo entre 10.000 e 20.000 ha permanecer inalterada em todas as datas mostra que essa classe de cobertura é estável, com poucas influencias relacionadas ao plantio de eucalipto.

A classe de cobertura Reflorestamento é a que teve o maior aumento no número de manchas com áreas núcleo em todos os intervalos de área. Conforme Tabela 23, havia 814 áreas núcleo em 1985, passando para 999 em 2010. A tendência para 2035 é de aumento do número de áreas núcleo nessa classe: 1.792. Esse aumento é um indicativo que essa classe está aumentando cada vez mais o número de manchas nas classes de área de maior tamanho. Embora o maior número de áreas núcleo ocorra para manchas com área de até 50 ha, é importante destacar que essa é a única classe que terá aumento de manchas com área núcleo nas faixas de áreas acima de 20.000 ha. Isso provavelmente está relacionado a expansão das áreas de Reflorestamento com Eucalipto, sobretudo nas áreas adjacentes à área de ocupação atual dessa cobertura.

A classe de cobertura Floresta apresentou uma pequena variação de áreas núcleo entre 1985 e 2010, passando de 1.071 para 1.141. Para 2035 a expectativa é também de aumento do número de áreas núcleo, passando para 1.481. Porém, a combinação dessa tendência de aumento de áreas núcleo com a de diminuição da área total dessa cobertura indica que há uma maior fragmentação da estrutura da paisagem, onde manchas menores são produzidas devido a subdivisão das manchas maiores. Essa dinâmica pode ser observada na Tabela 24.

Tabela 24 – Número de áreas núcleo e área total da classe Floresta: 1985, 2010 e 2035.

Ano	Número de Áreas Núcleo	Área Total (ha)
1985	1.017	232.246,7
2010	1.141	154.500,87
2035	1.481	145.618,18

Conforme Tabela 24, embora de 1985 para 2035 resulte num aumento de 464 áreas núcleo, a área total diminuirá 85.628,52 ha. Ou seja, o que provavelmente acontecerá é uma fragmentação das grandes manchas de Floresta em manchas menores, uma vez que conforme mostrado na Tabela 22, esse aumento de área núcleo está concentrado na faixa de manchas com área de até 50 ha. Em todas as demais faixas de áreas a tendência é de diminuição do número de áreas núcleo reforçando a tendência de fragmentação.

5.3.4 Grau de isolamento das manchas

De forma complementar ao processo de análise de fragmentação da paisagem, a métrica de isolamento entre as manchas auxilia no melhor entendimento dessa dinâmica. Para avaliar o isolamento das manchas de cobertura vegetal foi calculada a distância entre as manchas das classes de cobertura de Floresta, Refúgio Ecológico Montano e Reflorestamento, para 1985, 2010 e 2035 por meio da distância euclidiana para o vizinho mais próximo de mesma classe.

De maneira geral, foi possível observar aumento do isolamento das manchas nas classes de cobertura de Floresta e Refúgio Ecológico Montano entre 1985 e 2010 e existe a tendência para que isso ocorra em 2035, além da diminuição do isolamento em Reflorestamento.

Para a classe Floresta na Figura 42 é apresentado graficamente o percentual de área para cada classe de cobertura em diferentes intervalos de distância.

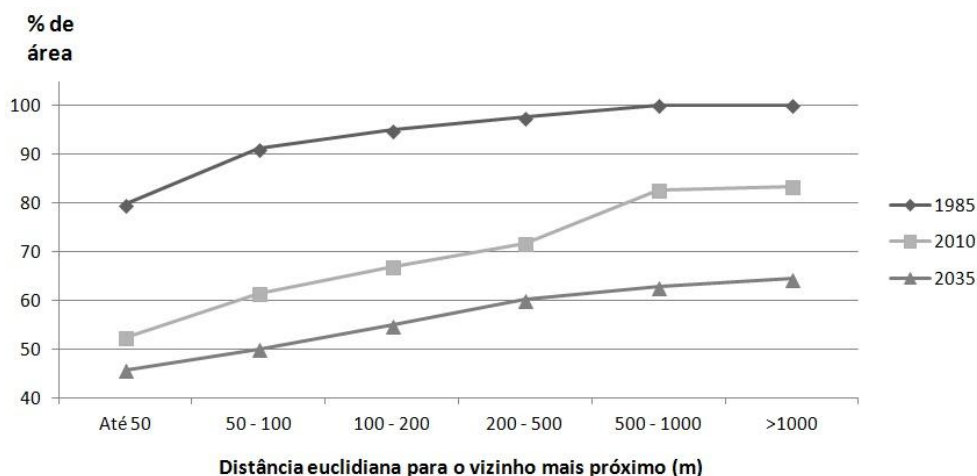


Figura 42 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Floresta em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035.

Na Figura 42 é possível observar que em 1985 quase 80% das áreas de Floresta estavam concentradas numa distância de até 50 m. Em 2010 essa proporção passou para pouco mais de 50% e em 2035 a tendência é que caia para cerca de 45%. Isso mostra que está havendo um aumento do isolamento das manchas de Floresta. Com isso, o maior percentual das áreas de Floresta em 2035 tende a estar concentrado nas distâncias acima de 500 m. A partir de 500 m o percentual de representatividade tem queda menos acentuada do que nas distâncias até 50 m, isso ocorre porque nessa faixa de distância estão concentradas as manchas maiores, que são mais resistentes a fragmentação.

Na Figura 43 é apresentado um mapa que mostra espacialmente o aumento do isolamento ao longo do tempo. Nessa figura é possível notar a supressão das manchas menores e mais distantes ao longo do tempo. Apenas aquelas manchas numa distância de até 50 m para a mancha de Floresta mais próxima em 1985 e 2010 têm tendência de não ser suprimida até 2035. Desse modo, para o ano de 2035, é esperado que existam poucas manchas com distância superior a 50 m, o que significa que provavelmente se um fragmento não está numa distância menor que 50 m, ele será convertido em outra classe de cobertura.

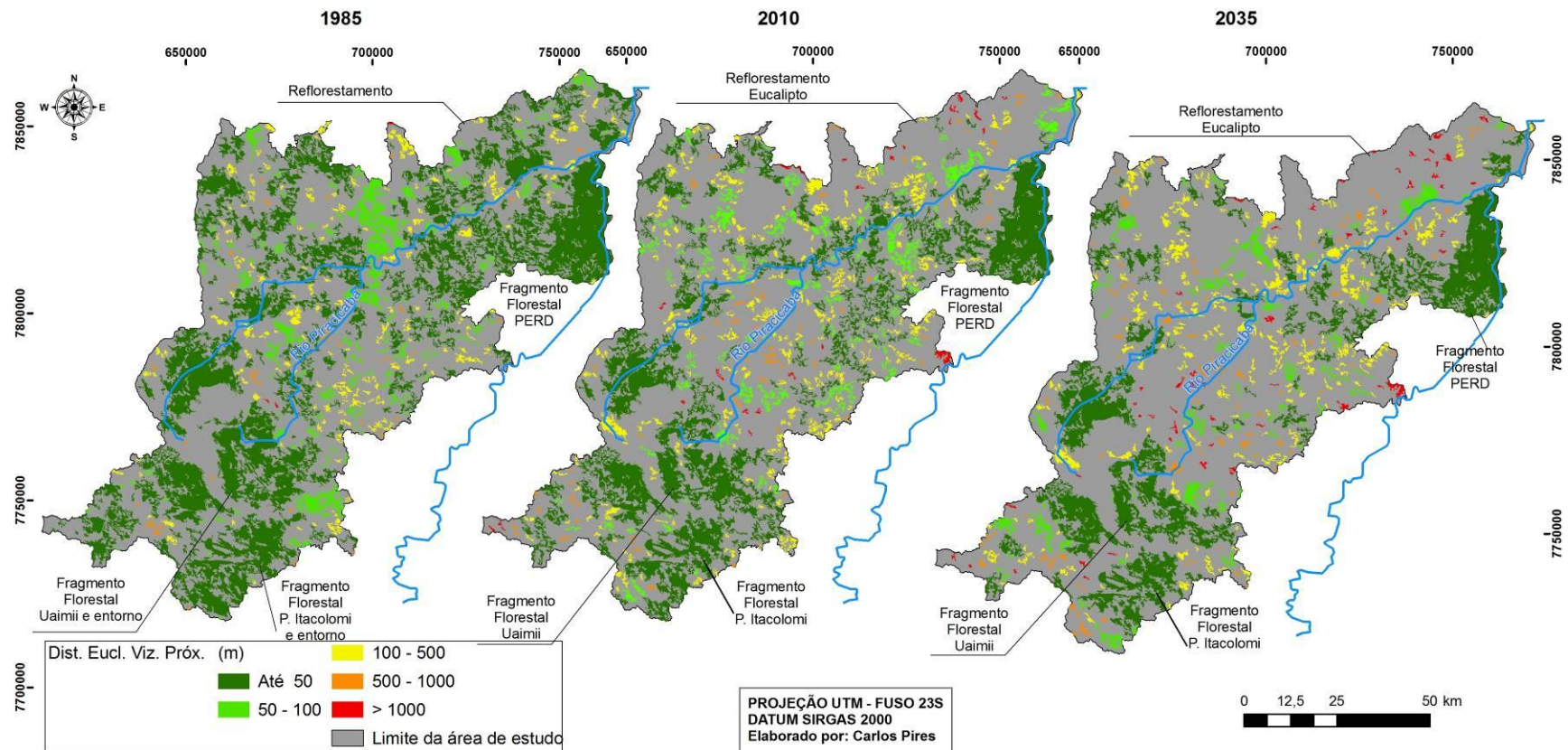


Figura 43 – Mapas de distâncias Euclidianas para o vizinho mais próximo para as áreas de Floresta: 1985, 2010 e 2035.

A classe de cobertura que menos sofreu alteração e, conseqüentemente, menor isolamento entre as manchas, foi a classe de Refúgio Ecológico Montano, conforme pode ser observado graficamente na Figura 44.

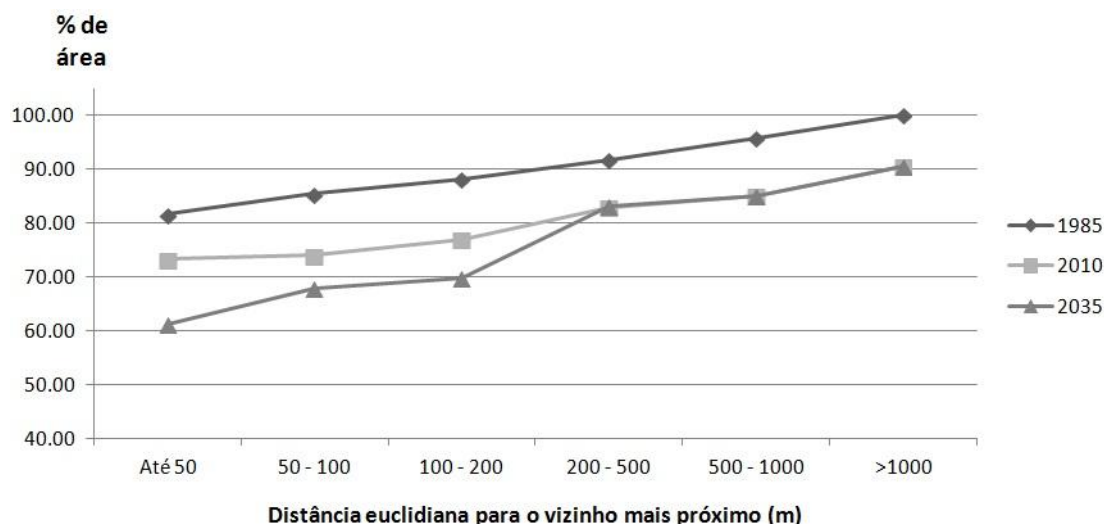


Figura 44 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Refúgio Ecológico Montano em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035.

Conforme Gráfico da Figura 44 a maior variação de área ao longo do tempo se dá nas manchas concentradas numa distância de até 50 m. Em 1985, mais de 80% das manchas estavam concentradas nessa faixa de distância, em 2010, esse número passou para pouco mais de 70% e para 2035 a tendência é que a área de Refúgio Ecológico Montano concentrada numa distância de até 50 m seja se 60%. Uma variação de 20% em relação a 1985. Nos intervalos de distancia a partir de 500 m a variação de concentração de área é menor. Cerca de 90% em 1985 e 85% em 2010 e 2035. Para manchas numa distância maior que 200 m em relação ao vizinho mais próximo, entre 2010 e 2035 a tendência simulada é que não haja variações de área significativas. Essa dinâmica está associada ao fato dessa classe estar localizada em terrenos de altitude e declividade elevadas. No mapa da Figura 45 é possível observar que com o passar do tempo, as manchas mais isoladas são suprimidos ou convertidos em outras classes.

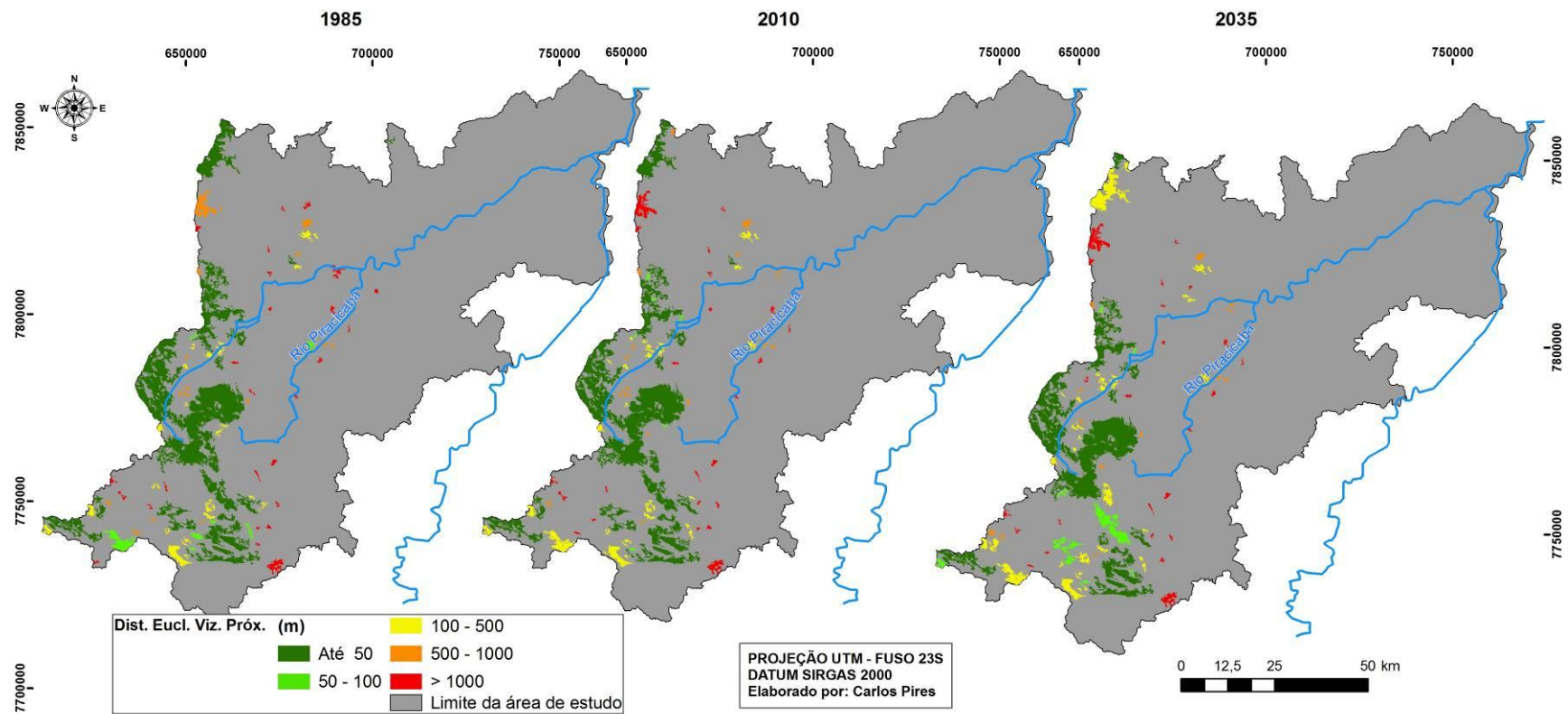


Figura 45 – Mapas de distâncias Euclidianas para o vizinho mais próximo para as áreas de Refúgio Herbáceo Montano: 1985, 2010 e 2035.

Em oposição à tendência observada nas classes de cobertura Floresta e Refúgio Ecológico Montano, a classe de Reflorestamento está diminuindo o grau de isolamento entre 1985 e 2010, e pelo resultado da simulação da cobertura da terra para 2035, essa tendência se mantém, tornando essa classe mais conectada. Isso pode ser observado no gráfico da Figura 46.

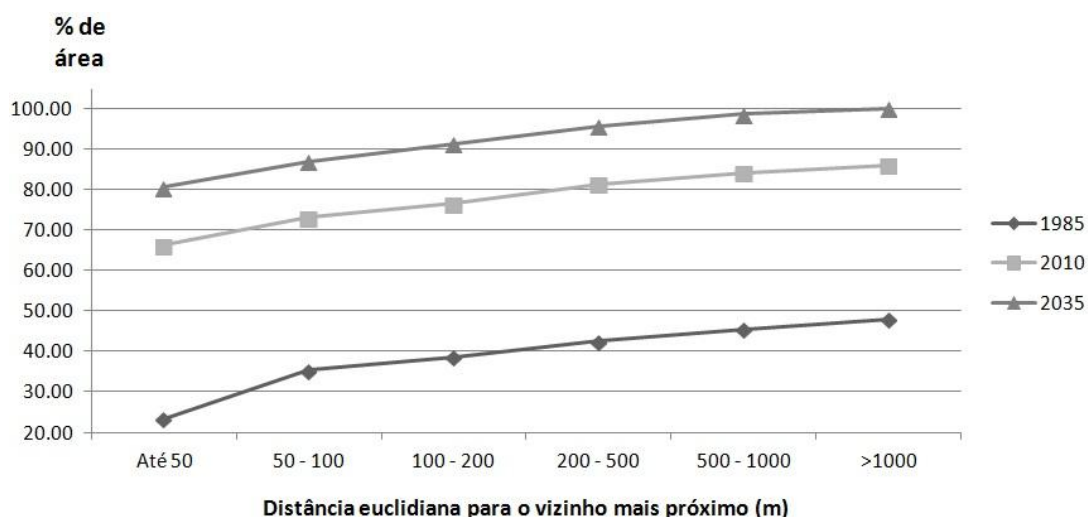


Figura 46 – Gráfico de distância Euclidiana para o vizinho mais próximo das áreas de Refúgio Ecológico Montano em relação ao percentual de área: 1985, 2010 e 2035.

No gráfico da Figura 45 é possível observar que há um aumento de área em todas as faixas de distância ao longo do tempo. Esse aumento é ainda mais significativo no percentual de manchas localizadas até 50 m de distância. Em 1985, cerca de 20% das manchas estavam até 50 m do vizinho mais próximo. Já em 2010, esse número passou para cerca de 65%, e a tendência é que o isolamento diminua ainda mais, passando para 80% da área até 50 m. Em relação a 2035 isso representa uma variação de 40 % para 1985 e de 15% para 2010.

Confirmando a tendência discutida ao longo do presente capítulo, a distância euclidiana para o vizinho mais próximo, mostra que ao longo dos anos, há uma expansão das áreas de Reflorestamento. Esse fenômeno, relacionado ao aumento da produção de carvão e celulose, faz com que seja formado um “corredor de reflorestamento”, diminuindo o grau de isolamento dessa classe. No mapa da Figura 47 é possível observar que com o passar do tempo, as manchas mais isoladas são agregadas.

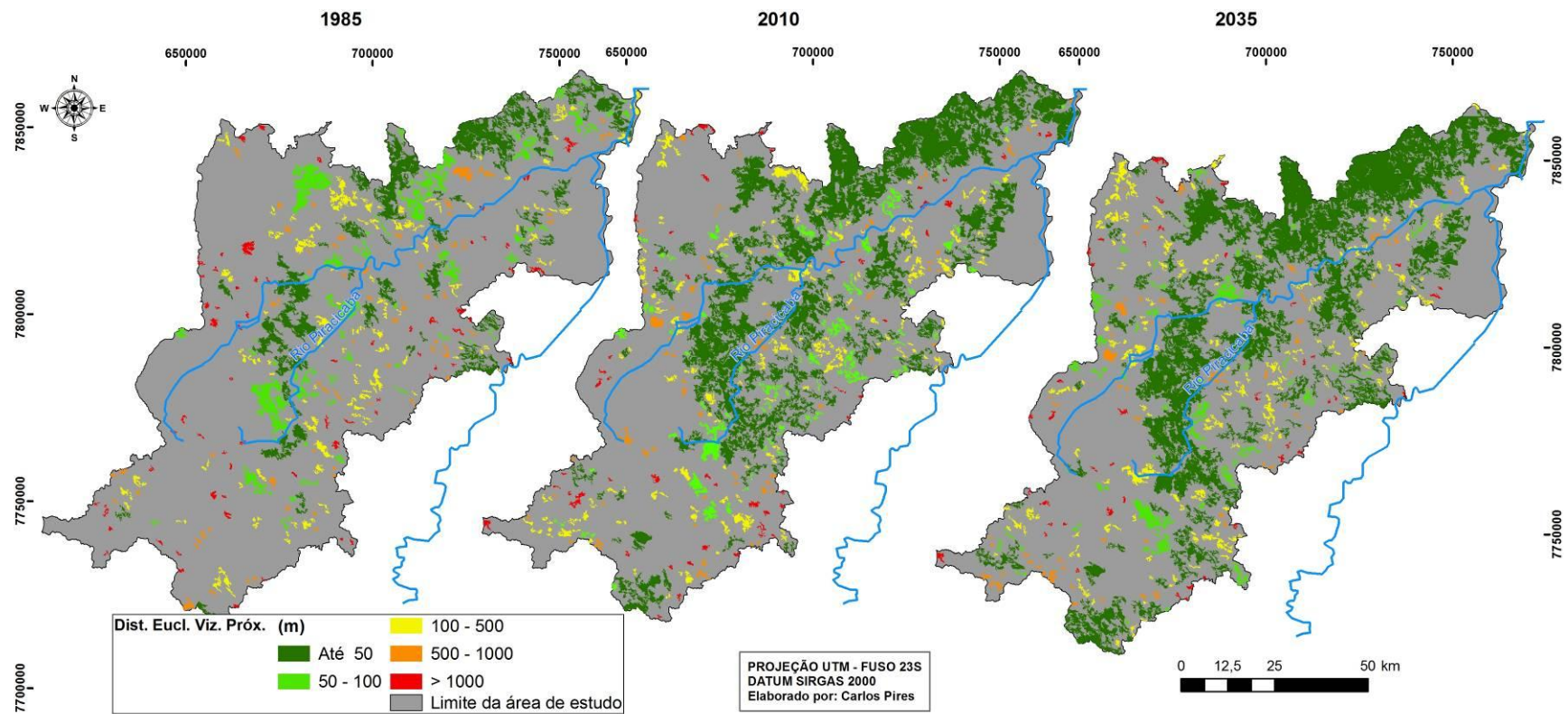


Figura 47 – Mapas de distâncias Euclidianas para o vizinho mais próximo para as áreas de Reflorestamento: 1985; 2010 e 2035.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvimento dessa pesquisa, com base nos objetivos propostos, foi possível entender como a expansão do reflorestamento com eucalipto influencia a estrutura da paisagem na área de estudo: os municípios da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba e da RMVA. Diante disso, o presente capítulo é dedicado à apresentação das conclusões obtidas ao longo do trabalho e algumas considerações e recomendações para futuros trabalhos sobre o tema.

Quanto à análise da dinâmica da cobertura da terra na área de estudo, realizada através de dados multi-temporais, foi possível observar que as principais mudanças são nas seguintes classes de cobertura: Reflorestamento com Eucalipto, FESM e Pastagem. Entre 1985 e 2010, houve diminuição das pastagens e FESM e aumento das áreas de Reflorestamento com Eucalipto. As áreas de Reflorestamento com Eucalipto foram as que mais cresceram nesse período de 25 anos. A expansão das áreas de Reflorestamento com Eucalipto ocorreu devido à vocação econômica da região associada ao estabelecimento e expansão das indústrias siderúrgica e de papel e celulose. De maneira geral, as transições se dão a partir da conversão de áreas de FESM em Pastagem: uma vez que uma área se torna pastagem, há evidências de que a próxima conversão é no sentido do Reflorestamento com Eucalipto.

Os resultados da simulação da cobertura da terra, por meio do modelo-LCM para um horizonte de 25 anos, representa uma simplificação da realidade com base nos pressupostos da modelagem construídos neste trabalho. Nesses pressupostos estão incluídas algumas limitações relativas ao processo de modelagem e da ferramenta utilizada, além da necessidade de abstrair alguns elementos para a formulação do cenário. Apesar disso, os resultados da simulação não são uma profecia, mas uma tendência baseada numa série de variáveis explanatórias. O cenário suposto e utilizado na simulação considerou que a demanda por eucaliptos continuará crescendo conforme observado entre 1985 e 2010. As variáveis explanatórias utilizadas no modelo não representam a totalidade das complexas relações que moldam o processo de alteração da cobertura da terra e da paisagem, são apenas uma pequena parcela delas. Diante dessas limitações, os resultados sobre a simulação (apresentadas no Capítulo 5, Seção 5.2.3),

embora lógicos e coerentes com a metodologia proposta, devem ser considerados com muita parcimônia uma vez que as relações físicas, bióticas e socioeconômicas que moldam a paisagem são complexas e dinâmicas.

A construção do sub-modelo de transição potencial mostrou que as variáveis explanatórias que melhor explicam as mudanças na área de estudo são: distância das áreas com eucalipto, distância das pastagens, distância de áreas urbanas e distância das áreas de mudança. A proximidade com as áreas urbanas, com áreas de pastagem bem como com as áreas plantadas de eucalipto indicam a proximidade de infraestrutura e o estabelecimento prévio de uma logística que favorece tanto a produção e escoamento do eucalipto quanto de outros produtos provenientes de atividades agropecuárias, portanto, indicam áreas propensas à mudanças. Com relação à proximidade das áreas de mudança, esse é um resultado que pode ser explicado segundo a primeira lei da Geografia que diz que “as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as coisas mais distantes” (Tobler 1970). Dessa forma, quanto mais próximo dessas áreas maior a possibilidade de ocorrer uma nova mudança.

A simulação da cobertura da terra para 2035 aponta para um cenário onde as principais coberturas da terra ainda serão as áreas de FESM, Pastagem e Reflorestamento com Eucalipto. Contudo, até 2035 a cobertura mais representativa é a de Reflorestamento com Eucalipto e não mais as áreas de FESM e Pastagem, como observado no período 1985-2010. Nessa simulação supomos que para que esse cenário se confirme é necessário que a demanda por eucalipto continue crescendo no mesmo ritmo observado entre 1985 e 2010.

A performance do modelo-LCM para simulação da cobertura da terra foi satisfatória, e o treinamento da MLPNN resultou numa acurácia de 94,28%. Contudo, existe uma variação da diferença entre a cobertura da terra simulada e a cobertura da terra mapeada a partir da imagem LANDSAT, em função do tamanho da área de análise. Como é difícil acertar exatamente para as áreas de mudança, qual *pixel* irá mudar e para qual classe, uma avaliação por células de diferentes tamanhos é mais recomendada, pois embora seja difícil acertar exatamente a mudança no *pixel*, é mais fácil acertar a mudança numa vizinhança de *pixels*. Assim, os resultados mostraram que nos tamanhos

de célula avaliados o acerto entre a cobertura mapeada e a simulada diminui juntamente com o tamanho da célula de análise, mas essa redução mostrou-se pequena, havendo um bom ajuste entre o dado simulado e o real. Parte desse ajuste se deve à escolha do ano do dado utilizado na calibração (2013), muito próximo do último ano utilizado para o cálculo da matriz de transição (2010), não apresentando grandes variações.

Em relação à análise de alteração da estrutura da paisagem, apoiada em métricas de paisagem o resultado mais expressivo é a diminuição do isolamento das áreas de reflorestamento e fragmentação das áreas de floresta. A tendência é que cada vez mais as grandes manchas florestais fiquem mais isoladas na paisagem, e cada vez mais restritos às unidades de conservação de proteção integral. Em contrapartida, as áreas de reflorestamento tendem a se expandir a partir de sua área atual para áreas adjacentes, formando grandes blocos de reflorestamento.

Embora a expansão das áreas de reflorestamento com eucalipto seja um assunto controverso, existe a possibilidade da demanda das usinas siderúrgicas, de papel e celulose continuarem crescendo. Dessa forma, tem-se um cenário de expansão das áreas de reflorestamento, uma vez que essa demanda não pode ser suprida pela vegetação nativa, devido a legislação em vigor e a fiscalização. Assim sendo, as áreas de reflorestamento passam a ter um papel importante na paisagem relacionado a conexão com as maiores manchas de floresta: tendo em vista que as áreas das manchas florestais estão diminuindo, afetando possivelmente o deslocamento da fauna impossibilitando a utilização de recursos presentes nos remanescentes florestais e, interferindo em aspectos relacionados a biodiversidade.

Vivemos num cenário econômico, onde é necessário conciliar a preservação ambiental com o modo de consumo. Essa tarefa não é simples e demanda planejamento, educação ambiental e vontade política. Através do planejamento da ocupação do espaço é possível minimizar os impactos ambientais e econômicos decorrentes da ocupação desordenada e exploração não sustentável dos recursos. Nesse aspecto, a modelagem pode ser considerada uma ferramenta no auxílio ao planejamento, uma vez que a simulação de cenários futuros permite prever como alguns fenômenos se comportam ao

longo do tempo. Dessa forma, através da modelagem os planejadores conseguem obter informações úteis à tomada de medidas econômicas e ambientalmente sustentáveis.

É preciso pesar os benefícios socioeconômicos e ambientais de monoculturas como os eucaliptos. Todo o processo produtivo dos reflorestamentos com eucalipto e as indústrias da região gera riqueza econômica e emprega pessoas na área de estudo. Ambientalmente, os reflorestamentos também possuem um papel na atenuação do efeito estufa relacionado ao sequestro de carbono, até que seja cortado. Porém, a diversidade encontrada nas áreas de florestas e suas funções ecológicas para a fauna e flora não podem ser substituídas pela monocultura de eucalipto, que representa um sistema mais simplificado e mais pobre do que o original. Assim, é preciso avaliar as consequências no longo prazo do contínuo aumento da demanda por eucaliptos, que pode alterar o equilíbrio da região.

Para amenizar esses problemas, é possível combinar as demandas sociais, ambientais e econômicas, a partir de um planejamento regional que coloque a paisagem e sua configuração espacial como um elemento central, buscando-se uma maior conectividade e oferta de habitats entre os remanescentes florestais, incluindo as áreas de eucalipto que podem funcionar como corredores reduzindo o isolamento dos fragmentos florestais.

Trabalhos de pesquisa futuros na área de estudo devem propor o monitoramento da presença de fauna nas áreas de reflorestamento, investigando se essas podem funcionar como abrigo e corredor entre os fragmentos florestais. Além disso, é preciso avaliar a influência das mudanças da cobertura da terra para os recursos hídricos, uma vez que o uso de fertilizantes e agrotóxicos ligados ao reflorestamento pode alterar a qualidade das águas. Nesse sentido, o uso combinado de modelos LUCC, com modelos hidrológicos, com modelos de qualidade das águas e ecologia da paisagem podem ser utilizados para um diagnóstico mais abrangente das consequências das mudanças da cobertura da terra para a conservação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, E. T. F.; SILVA, A. M.; SILVA, M. P.; RODRIGUES, T. M. D.; MOITA, G. F. Uso redes neurais multilayer perceptron (mlp) em sistema de bloqueio de websites baseado em conteúdo. **Mecânica Computacional**, v. 29, p. 9075–9090, 2010. Disponível em: <<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3654/3567>> . Acesso em: 2 mar. 2013.

AGUIAR, A.P. D. **Modelagem de mudança do uso da terra na Amazônia: explorando a heterogeneidade intrarregional**, 2006. 208 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

ALMEIDA, C. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO, W. L.; PANTUZZO, A. E. Simulating urban land use change through CA-based Modeling and Logistic Regression. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais ...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1687–1694. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.11.09.41/doc/14_058.pdf>. Acesso em: 11 maio 2013.

BAKER, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, v. 2, p. 111-133, 1989. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.3.3478&rep=rep1&type=pdf>> Acesso em: 1 jan. 2014.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (BNDES). **Impactos da privatização no setor siderúrgico**. Rio de Janeiro: AO2/GESIS, 2011. 14 p. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2013.

BARNSLEY, M. J.; MOLLER-JENSEN, L.; BARR, S. L. Inferring urban land use by spatial and structural pattern recognition. In: DONNAY, J.; BARNSLEY, M. J.; LONGLEY, P. A. (Eds). **Remote sensing and urban analysis**. London: Taylor & Francis, 2001. Cap. 7, p. 115–144.

BASTOS, A. **Simulação de uso do solo urbano utilizando uma abordagem baseada em sistemas multiagentes reativos**. 2007. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

BERRY, M. W.; FLAMM, R. O.; HAZEN, B. C.; MACLNTYRE, R. L. **The land-use change analysis system (LUCAS) for evaluating landscape management decisions**. Knoxville: University of Tennessee, 1994. 144 p.

_____; HAZEN, B. C.; MACLNTYRE, R. L.; FLAMM, R. O. Lucas: a system for modeling land-use change. **IEEE Computational Science & Engineering**, v. 3, n. 1, p. 24-35, 1996.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale: esquisse methodologique. **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, v. 39, n. 3, p.249-272, 1968.

BINDER, C.; BOUMANS, R. M.; CONSTANZA, R. Applying the Patuxent Landscape Unit Model to human dominated ecosystems: the case of agriculture. **Ecological Modelling**, v. 159, p. 161-177, 2003. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ecolmodel>. Acesso em: 10 dez. 2013.

BRITO, H. M. **Uma abordagem orientada a conhecimento para gestão de modelos científicos**. 2010. 133 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas e Computação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (UFRJ/COPPE), Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ct.ufrj.br/biblioteca/teses/?p=704>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

CÂMARA, G. S.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395 – 403, 1996.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford, 1987. 551 p.

CARNEIRO, T. G. S. **Nested-CA: a foundation for multiscale modeling of land use and land change**. 2006. 109 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006. (INPE -5522-TDI/519).

CASTELLA, J. C.; KAM, S. P.; QUANG, D. D.; VERBURG, P. H.; HOANH, C. T. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. **Land Use Policy**, v. 24, n. 3, p. 531–545, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837706000640>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

CELULOSE NIPO-BRASILEIRA S/A (CENIBRA). **Plano de manejo florestal: resumo público**. Belo Oriente: Celulose Nipo-Brasileira S.A., 2012. 138 p.

CHAVEZ JR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 2, p. 459–479, 1988. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425788900193>>. Acesso em: 23 maio 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1^a ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1999. 240 p.

CLARCK LAB. **The land change modeler for ecological sustainability**. Worcester, 2009. Catálogo. Disponível em: <<http://clarklabs.org/applications/upload/Land-Change-Modeler-IDRISI-Focus-Paper.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2013.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 37, n. 1, p. 35–46, 1991.

- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 136 p.
- COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1565–1596, May 2004.
- DI GREGORIO, A. **Land cover classification system (LCCS): version 2 – classification concepts and user manual**. Rome: FAO, 2005. 208 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/008/y7220e/y7220e00.htm>>. Acesso em: 5 mar. 2013.
- DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Technical Bulletin, n. 1468. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington DC, 1973. 327 p.
- EASTMAN, J. R. **IDRISI Taiga: guide to GIS and image processing**. Clarcks Lab, 2009. 342 p.
- ECOPLAN-LUME. **Plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão DO2**. Belo Horizonte: Consórcio ECOPLAN-LUME, 2010. 97 p. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/_docs/planobacia/PARH/PARH_Piracicaba.pdf>. Acesso em: 1 dez. 2012.
- FITZ, H. C.; DEBELLEVUE, E. B.; COSTANZA, R. Development of a general ecosystem model for a range of scales and ecosystems. **Ecological Modelling**. v. 88, p. 263–295, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380095001123>>. Acesso em: 7 maio 2013.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. CD-ROM. Escala: 1:650.000.
- FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape ecology**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 619 p.
- FUJACO, M. A. G.; LEITE, M. G. P.; MESSIAS, M. C. T. B. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. **Revista da Escola de Minas**, v. 63, n. 4, p. 695–701, out./dez. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0370-44672010000400016&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 maio 2013.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 2nd ed. Nova Jersey:: Prentice Hall, 2002. 793 p.
- GRIGIO, A. M. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental no município de Guamaré - RN: simulação de risco às atividades da indústria petrolífera**. 2003. 253 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2003. Disponível em: <http://bdtd.bczm.ufrn.br/tde_arquivos/11/TDE-2006-08-23T051432Z199/Publico/AlfredoMG.pdf>. Acesso em: 15 maio 2013.

GUAN, D.; GAO, W.; WATARI, K.; FUKAHORI, H. Land use change of kitakyushu based on landscape ecology and Markov model. **Journal of Geographical Sciences**, p. 455-468, 2008. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11442-008-0455-0#>>. Acesso em: 31 dez. 2013.

GUERRA, C. B. **Impactos ambientais na bacia do Rio Piracicaba**. Belo Horizonte: Diagramarte, 1993. 77 p.

HAYKIN, S. **Redes neurais**. 2nd Ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HURKMANS, R. T. W. L.; TERINK, W.; UIJLENHOET, R.; MOORS, E. J.; TROCH, P. A.; VERBURG, P. H. Effects of land use changes on streamflow generation in the Rhine basin. **Water Resources Research**, v. 45, n. W06405, p. 1–15, 2009. Disponível em:

<<http://web.hwr.arizona.edu/~surface/files/publications/2009HurkmansWRR45.pdf>>.

Acesso em: 4 maio 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 1980**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

_____. **Censo demográfico 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

_____. **Censo demográfico 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

_____. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

_____. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2013.

_____. **Produto interno bruto dos municípios 2012**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=46>. Acesso em 3 dez 2013.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DE MINAS GERAIS (IEF-MG). **Mapeamento da Cobertura Vegetal 2009**. ZEE-MG, 2009. Disponível em: <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/zee>>. Acesso em: 1 mar. 2013.

_____. **Shapefile unidades de conservação**. Belo Horizonte: ZEE-MG, 2011. Disponível em: <<http://geosisemanet.meioambiente.mg.gov.br/zee>>. Acesso em: 1 mar. 2013.

ISLAM, M. S.; AHMED, R. Land use change prediction in Dhaka City using GIS aided markov chain modeling. **Journal of Life and Earth Science**, v. 6, p. 81–89, 2011. Disponível em: <<http://banglajol.info.index.php/JLES>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

JAKEMAN, A.; HAMILTON, S.; RIZZOLI, A.; CHEN, S. H. Modelling and software as instruments for advancing sustainability. In: ____ **Environmental modelling, software and decision support: state of the art and new perspectives**. Holanda: Elsevier, 2008. cap. 1, p. 1–12. Disponível em:

<http://www.academia.edu/2767032/Chapter_One_Modelling_and_Software_as_Instruments_for_Advancing_Sustainability>. Acesso em: 22 mar. 2013

JOHNSON, S. J. **An evaluation of land change modeler for ArcGIS for the ecological analysis of landscape composition**. 2009. 116 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia). Southern Illinois University Carbondale, Illinois, 2009. Disponível em: <<http://opensiuc.lib.siu.edu/theses/464/>>. Acesso em: 13 maio 2013.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 424 p.

LEK, S.; DELACOSTE, M.; BARAN, P.; DIMOPOULOS, I.; LAUGA, J.; AULANIER, S. Application of neural networks to modelling non-linear relationships in ecology. **Ecological Modelling**. v. 90, p. 39-52. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380095001425>>. Acesso em: 9 maio 2013.

LIEBETRAU, A. **Measures of association**. Beverly Hills: Sage Publications, 1983. Disponível em: <Erro! A referência de hiperlink não é válida.<http://uregina.ca/~gingrich/ch11a.pdf>>. Acesso em: 26 dez. 2013.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3rd ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1994. 729 p.

LO, C. P.; YEUNG, A. K. W. **Concepts and techniques of geographic information systems**. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 492 p.

MACLNTYRE, R. L.; HAZEN, B. C.; BERRY, M. W. **The design of the land-use change analysis system (LUCAS): part I - graphical user interface**. Knoxville – Tennessee: University of Tennessee, 1994. 172 p. MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 2004. 340 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Shapefile biomas**. I3Geo, 2010. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2013.

MINAS GERAIS. Lei Complementar nº 51, de 30 de dezembro de 1998. Institui a Região Metropolitana do Vale do Aço, dispõe sobre sua organização e funções e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado, Poder Executivo**, 31 dez. 1998. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2148>>. Acesso em: 30 dez. 2013.

MOREIRA, E. G. **Dynamic coupling of multiscale land change models**. 2009. 94 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/teses/tese_eva.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2013.

NASCIMENTO, P. S. R. **Avaliação de técnicas de segmentação e classificação por regiões em imagens Landsat-TM visando o mapeamento de unidades de paisagem na Amazônia**. 1997. 120 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) –

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1997. (INPE-6391- TDI/607).

NAVEH, Z.; LIEBERMAN, A. S. **Landscape ecology, theory and application**. 2nd ed. New York: Springer Verlag, 1994. 360 p.

PAULA, J. A. (Coord.) **Biodiversidade, população e economia: uma região de Mata Atlântica**. Belo Horizonte: UFMG/CEDEPLAR, 1997. 671 p.

PIJANOWSKI, B. C.; SHELLITO, B.; PITHADIA, S.; ALEXANDRIDIS, K. Forecasting and assessing the impact of urban sprawl in coastal watersheds along eastern Lake Michigan. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 7, p. 271-285, 2002.

_____. Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 2, p. 197-215, 2005.

PIROLI, E. L.; DEMARCHI, J. C.; ISHIKAWA, D. K. Análise das mudanças no uso do solo da microbacia do córrego das Furnas, município de Ourinhos - SP, entre os anos de 1972 e 2007, e dos impactos sobre suas áreas de preservação permanente, apoiada em Geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 6.333–6.340. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0999.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

PRENZEL, B. Remote sensing-based quantification of land-cover and land-use change for planning. **Progress in planing**, v. 61, p. 281–299, 2004. Disponível em: <http://gisknowledge.net/topic/remote_sensing_and_dia/prenzel_pip_04.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2013.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 454 p.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 3.ed. New York: Springer-Verlag, 2006. 439 p.

RIBEIRO, M. C. **Modelos de simulação aplicados à conservação de paisagens fragmentadas da Mata Atlântica brasileira**. 2010. 277 p. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/disponiveis/41/41134/tde.../Ribeiro_2010.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2014.

ROCHA, J. B. O.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; SILVA, C. A.; CURI, N. Efeito da calagem na nutrição mineral e no crescimento inicial do eucalipto a campo em Latossolo húmico da Zona da Mata (MG). **Scientia Florestali**, v. 36, n. 80, p. 255-263, 2008. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr80/cap01.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2013.

RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinamica EGO: uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3089–3096.

ROSENFELD, G. H.; FITZPATRICK-LINS, K. A. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 52(2), p. 223-227, 1986. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/70014667>>. Acesso em: 25 fev. 2013.

SIRIKULCHAYANON, P.; SUN, W.; OYANA, T. J. Assessing the impact of the 2004 tsunami on mangroves using remote sensing and GIS techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 12, p. 3553–3576, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/01431160701646332>>. Acesso em: 14 maio 2013.

SOARES-FILHO, B. S. **Análise de paisagem: fragmentação e mudança**. Belo Horizonte: Departamento de Cartografia. Centro de Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências – UFMG, 1998. 90 p. (Apostila)

_____; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M. C. V.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. **Global Change Biology**, n. 10, p. 745–764, 2004.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; LENNEY, M. P.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, p. 230–244, 2001. Disponível em: <http://www.unc.edu/courses/2008spring/geog/577/001/www/Song01_RSE.pdf>. Acesso em: 3 maio 2013.

TANG, Z.; ENGEL, B. A.; PIJANOWSKI, B. C.; LIM, K. J. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. **Journal of Environmental Management**, v. 76, p. 35-45, 2005.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 46, n. 2, p. 234-240, 1970.

TRISURAT, Y.; ALKEMADE, R.; VERBURG, P. Projecting land-use change and its consequences for biodiversity in northern Thailand. **Environment Management**, v. 45, n. 8, p. 626–639, 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20131051>>. Acesso em: 14 maio 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.

TURNER, B. L. II; MEYER, B. L. Global land use and land cover change: an overview. In: _____. (Ed.). **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 3–10.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H. (Ed). **Quantitative methods in landscape ecology**. New York: Springer, 1991. 536 p.

UMBELINO, G.; BARBIERI, A. Uso de autômatos celulares em estudos de população, espaço e ambiente. In: Encontro Nacional de Estudos Populacionais, n. 17, 2010,

Caxambu-MG. **Anais...** Caxambu-MG: ABEP, 2010. p. 1–20. Disponível em: <http://www.abep.nepo.unicamp.br/encontro2010/docs_pdf/eixo_2/abep2010_2432.pdf>. Acesso em: 23 maio 2013.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens-fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat 5, na região do reservatório de Tucuruí-PA. **Acta Amazonica**, v.43, n.3, p. 487-493, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672004000300014>. Acesso em: 25 mar. 2013.

VERBUG, P. H.; VELDKAMP, W. S. A.; ESPALDON, R. L. V.; MASTURA, S. S. A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental Management**, v. 22, n. 3, p. 391–405, 2002. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12148073>>. Acesso em: 9 maio 2013.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L. O. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land-use and its effects. **Ecological Modelling**, v. 85, n. 2, p. 253-270, 1996. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304380094001510>>. Acesso em: 1 abr. 2013.

_____; VERBURG, P. H. Modelling land use change and environmental impact. **Journal of Environmental Management**, v. 72, n. 1–2, p. 1–3, 2004. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15246569>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

VOINOV, A.; COSTANZA, R.; WAINGER, L.; BAUMAS, R.; VILLA, F.; MAXWELL, T.; VOINOV, H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. **Environmental Modelling and Software**, v. 14, p. 473–491, 1999. Disponível em: <http://www.uvm.edu/giee/pubpdfs/Voinov_2007a_Water_Resources.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2013.

_____; CONSTANZA, R.; FITZ, C.; MAXWELL, T. Patuxent landscape model: 2.model development nutrients, plants and detritus. **Water Resources**, v. 34, n. 3, p. 268-276, 2007.

A APÊNDICE A – ENTREVISTAS COM MORADORES DA ÁREA DE ESTUDO

A.1 MORADOR 1

Morador 1: comerciante, proprietário de uma pequena mercearia no Distrito de Cocais das Estrelas.

Entrevistador: *Qual a relação do povoado com a CENIBRA?*

Morador 1: *“Esse povo aqui tudo tem relação com a CENIBRA. Todo mundo presta serviço para a CENIBRA, o que não trabalha é aposentado.*

Entrevistador: *Vocês estão adaptados à essa quantidade de eucalipto na região?*

Morador 1: *E, isso ai pra nós é normal.*

Entrevistador: *Tem muitos anos que o Senhor mora aqui?*

Morador 1: *Eu tenho 12 anos que moro aqui, mas tem gente que já está aqui há mais de quarenta anos. Nessa região aqui já é a terceira planta, mais pra trás já é a quarta.*

Entrevistador: *Então esses eucaliptos estão ai há muito tempo?*

Morador 1: *Tem. Esses eucaliptos tão ai há mais de 40 anos, aqueles alto lá não... Já deve ter mais de uns 15 anos. Eles vão tirando umas e plantando as outras – o pau quebra. Agora de fazendeiro não cresce não, mas de CENIBRA com três anos já tá grande. É as mudas né. Tem muito eucalipto em frente.*

A.2 MORADOR 2

Moradora 2: comerciante, proprietário de um pequeno comércio em São Domingos do Prata.

Entrevistador: *Tem muitos anos que a Senhora mora por aqui?*

Morador 2: *Tem. Há 27 anos que eu moro aqui.*

Entrevistador: *De lá p/ cá a Senhora notou muita diferença na paisagem?*

Morador 2: *Agora que não ta podendo desmatar,né. Igual essa mata aqui: o dono trabalha na USIMINAS em Ipatinga. Ele não deixa ninguém tirar uma árvore daí.*

Entrevistador: *Mas tem eucalipto no meio?*

Morador 2: *Tem não. Ali é só mata mesmo. Antigamente o pessoal tirava madeira, mas agora não pode não.*

Entrevistador: *Mas no entorno, de maneira geral, pelo que a Senhora conhece da região, acha que mudou alguma coisa?*

Morador 2: *A melhorou, né? As casas tão melhor. Diminuiu as cortas de mata também. Agora é proibido. O IBAMA correu aí, fechou tudo.*

Entrevistador: *E o pessoal daqui, vive mais do que?*

Morador 2: *Aqui é agropecuária, leite.*

Entrevistador: *Tem algum laticínio na região?*

Morador 2: *Aí no São Domingos do Prata. A gente tem um resfriado em casa, aí vem o caminhão tanque, ontem pegô, hoje não.*

Entrevistador: *Como que é o plantio de eucalipto aqui?*

Morador 2: *Tem bastante. Aqui para cá, mesmo aqui, já é CENIBRA. Já comprou várias propriedades. Mas no mais aqui, quem tem leite não planta muito eucalipto não. Preserva mais é o pasto.*

Entrevistador: *E isso mudou?*

Morador 2: *Não. Continua. Mas aqui é pastagem mesmo. Pessoal vive disso, né? De leite.*

Entrevistador: *Pessoal fabrica muito queijo caseiro?*

Morador 2: *Não. Aqui só resfria o leite mesmo, para o laticínio Mucuri.*

A.3 MORADOR 3

Morador 3: proprietário de uma pequena propriedade rural em Alvinópolis.

Entrevistador: *Há quanto tempo o Senhor mora na região?*

Morador 3: *Fui nascido e criado aqui.*

Entrevistador: *Estamos estudando a paisagem da região, já que o Senhor nasceu aqui, o Senhor acha que ocorreram muitas mudanças na região?*

Morador 3: *Ah sei lá.... Muitas coisas que eles fizeram e tudo que vão acabando com a natureza, é esse plantio de eucalipto. Ele puxa água. Acaba com a água. Meus irmãos tudo plantô, é muito pela mata por aí a fora. Mas no que me pertence eu não quis. Porque sem água nos não vivemos, num é? É uma coisa muito necessária para todo mundo, ?*

Entrevistador: *E o Senhor sabe se essa madeira que é retirada daqui é para carvão?*

Morador 3: *É para carvão, e serve também para engradamento da casa.*

Entrevistador: *Esse eucalipto, o Senhor sabe há mais ou menos quantos anos está sendo plantado na região?*

Morador 3: *Ah menino, já tem de uns 15 anos para cá, o pessoal, muitos fazendeiros plantô. Mas eu mesmo não.*

Entrevistador: *Mas há uns 30 anos atrás já tinha?*

Morador 3: *Não existia esse tipo de coisa não. Depois a GERDAU entrou, e aí foi nós proprietários, cada um assinou o contrato com eles. Ai você planta eucalipto com eles, e tem que vender o carvão necessariamente para eles mesmos.*

Entrevistador: *Mas então a companhia não compra eucalipto?*

Morador 3: *Não. Ela já compra carvão já pronto. Ai tem que fazer o contrato com eles.*

Entrevistador: *E o senhor o que faz?*

Morador 3: *Uma coisa que eu faço mesmo aqui é requeijão. Você gosta?*

B APÊNDICE B – MATRIZES DE ERRO DE CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DA TERRA

B.1 Matriz de erros da classificação das imagens para mapeamento de cobertura da terra para 1985

%	Urb	Nuv	Aflo	Pas	Reflo	Cam	FES M	Min	Ara	S Exp	Água	Total (%)	Erro de Inclusão (%)
Urb	1,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,08	0
Nuv	0,00	5,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,1	0
Aflo	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,48	0
Pas	0,12	0,00	0,00	19,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,18	0,62
Reflo	0,00	0,00	0,00	0,00	8,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,92	0
Cam	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,83	0
FESM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	39,99	0,00	0,00	0,00	0,00	40,07	0,19
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,19	0,00	0,00	0,00	1,19	0
Ara	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,88	0,00	0,00	6,88	0
S Exp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,51	0
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,74	2,74	0
	1,2	5,1	4,48	19,06	9	9,83	39,99	1,19	6,88	0,51	2,74	99,78	-
	10	0	0	0	0,88	0	0	0	0	0	0	-	-

Urb – Urbano
Nuv – Nuvem
Aflo – Afloramento
Pas – Pastagem
Min – Mineração

Cam - Vegetação Campestre Natural
Reflo – Reflorestamento com Eucalipto
FESM – Floresta Estacional Semidecidual Submontana
Ara – Solo Arado para Plantio de Eucalipto
S Exp – Solo Exposto

B.2 Matriz de erros da classificação das imagens para mapeamento de cobertura da terra para 2010

%	Urb	Nuv	Aflo	Pas	Reflo	Cam	FESM	Min	Ara	S Exp	Água	Total (%)	Erro de Inclusão (%)
Urb	2,92		0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,18	2,83
Nuv	0,00	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,87	0,00
Aflo	0,00	0,00	3,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	3,78	11,90
Pas	0,00	0,00	0,00	17,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,47	0,00	12,12	7,75
Reflo	0,00	0,00	0,00	0,00	9,39	0,00	1,53	0,00	0,60	0,00	0,00	13,44	15,84
Cam	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	2,11	32,22
FESM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,93	0,00	0,00	0,00	0,00	33,93	0
Min	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	3,26	0,40	0,00	0,00	4	18,5
Ara	0,00	0,00	0,00	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	9,14	1,34	0,00	12,53	27,05
S Exp	0,00	0,00	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,61	62,29
Água	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,43	6,43	0
Total	2,92	1,87	3,97	19,23	9,39	1,43	36,48	3,26	11,06	2,04	6,43	89,11	-
Erro de omissão	0,00	0,00	16,12	10,66	0,00	0,00	6,99	0,00	17,35	88,72	0,00	-	-

Urb – Urbano
Nuv – Nuvem
Aflo – Afloramento
Pas – Pastagem
Min – Mineração

Cam - Vegetação Campestre Natural
Reflo – Reflorestamento com Eucalipto
FESM – Floresta Estacional Semidecidual Submontana
Ara – Solo Arado para Plantio de Eucalipto
S Exp – Solo Exposto