



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14657-TDI/1213

**MAPEAMENTO DE VEGETAÇÃO DO ESTADO DE MINAS
GERAIS UTILIZANDO DADOS MODIS**

Samuel Martins da Costa Coura

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Yosio Edemir Shimabukuro e Dra. Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 02 de outubro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

Publicado por:

esta página é responsabilidade do SID

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**Solicita-se intercâmbio
We ask for exchange**

Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14657-TDI/1213

**MAPEAMENTO DE VEGETAÇÃO DO ESTADO DE MINAS
GERAIS UTILIZANDO DADOS MODIS**

Samuel Martins da Costa Coura

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Yosio Edemir Shimabukuro e Dra. Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 02 de outubro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

528.711.7

Coura, S. M. C.

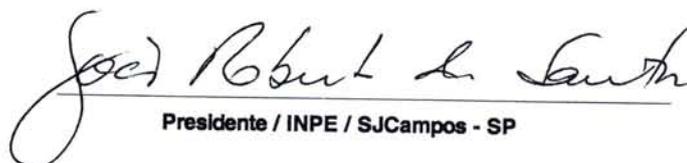
Mapeamento de vegetação do estado de Minas Gerais
utilizando dados *MODIS* / Samuel Martins da Costa Coura. –
São José dos Campos: INPE, 2006.

129p. ; (INPE-14610-TDI/1190)

1.MODIS. 2.Vegetação. 3.Minas Gerais (Estado).
Mapeamento. 5.Restauração 6.Sensoriamento remoto.
I.Título.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. João Roberto dos Santos


Presidente / INPE / SJC Campos - SP

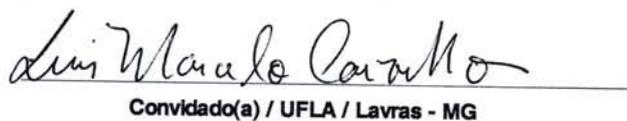
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Luis Marcelo Tavares de Carvalho


Convidado(a) / UFLA / Lavras - MG

Aluno (a): **Samuel Martins da Costa Coura**

São José dos Campos, 02 de outubro de 2006

“The highest wisdom has but one science – the science of the whole – the science explaining the whole creation and man’s place in it”.

Leo Tolstoy (1828-1910)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador pesquisador Dr. Yosio Edemir Shimabukuro; amizade, paciência, credibilidade, conhecimento passado, orientação e apoio na realização deste trabalho.

A minha co-orientadora pesquisadora Dra. Leila Maria Garcia Fonseca, pelos conhecimentos transmitidos, auxílio e constante incentivo.

Ao Professor Dr. Luís Marcelo Tavares Carvalho, pela amizade e introdução ao sensoriamento remoto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro de dois anos de bolsa de mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações e recursos para trabalho em campo.

À Sra. Maria Etelvina Renó pela constante amizade e irrestrito apoio na execução de todas as etapas deste trabalho. E também agradeço à Srta. Angelucci e à Sra. Vera pelo pleno suporte.

Aos Professores Drs. Corina da Costa Freitas, Antônio Roberto Formaggio, Flávio Jorge Ponzoni, Antônio Carlos Neves Epiphânio, Elizabeth Caria Moraes, Bernardo F. T. Rudorff, Victor Celso de Carvalho, João Roberto dos Santos, Márcio de Morisson Valeriano, Mauricio Alves Moreira, Tereza Florenzano, Camilo Renó, Dalton de Morisson Valeriano, Evelyn Márcia Moraes de Leão Novo, Lênio Soares Galvão, Nelson Jesus Ferreira, Gilberto Câmara e Antônio Miguel Monteiro pelas disciplinas ministradas, as quais foram de suma relevância.

Aos amigos (as). André de Lima, André Maia, Avelino N. da Silva, Félix Carrielo, Liana Anderson, Natalia de Almeida Crusco, Michelle Picoli, Marco Aurélio Barros, Antônio Correia, Mírcea Claro e Eduardo Arraut pela amizade, crescimento mútuo e bons momentos compartilhados.

Agradeço em especial ao Rodrigo Alexandre Sbravatti Piromal, Vanessa Canavesi, Marcos W. Dias de Freitas e Veraldo Liesenberg pelas idéias, apoio, amizade, confiança e colaboração no desenvolvimento da dissertação.

Aos amigos Vantier Veronezi Bagli (INPE) e Gustavo H. D Tonoli (UFLA) pela convivência gratificante.

A meus pais pelo constante e irrestrito apoio.

Aos amigos Luciano Colares Dutra e Silmara Maria Magnabosco (Veracel).

RESUMO

O uso de imagens de satélite de resolução espacial moderada e resolução temporal quase diária é uma opção viável para o monitoramento da vegetação e de sua dinâmica, seja ela natural ou cultivada. O Estado de Minas Gerais, devido à sua variedade de biomas e fitofisionomias, foi escolhida área de estudo para esta dissertação. Os objetivos do presente trabalho foram: a) analisar a dinâmica espectral da vegetação; b) avaliar a técnica de restauração de imagens sobre os dados MODIS c) avaliar a acurácia da classificação em função de pontos amostrais coletados em campo; e d) comparar os resultados obtidos com mapas prévios de vegetação desenvolvidos pelo IEF/UFLA. A bordo das plataformas Terra e Aqua, do sensor *MODerate Imaging Spectroradiometer* (MODIS), fornece em especial o produto MOD13 (índices de vegetação - composição de 16 dias, quatro bandas espectrais com 250m de resolução espacial). Com este produto foi organizada uma série temporal para o ano de 2004. Nos resultados obtidos, observou-se que: o comportamento sazonal das fitofisionomias foi diferenciado ao longo do ano indicando influência da sazonalidade. Além disso, a aplicação das técnicas de restauração das imagens MOD13 proporcionou uma melhoria na resolução espacial dessas imagens, alterando a variância e preservando as médias dos dados. A validação dos mapas gerados com base no conjunto de pontos coletados em campo, apresentou índice kappa de 0,73 para mapa oriundo das imagens MOD13 e 0,84 no mapa de referência. A partir da metodologia aplicada, os resultados obtidos permitiram concluir que os dados do sensor MODIS podem ser usados no monitoramento espectral da vegetação a nível regional, e para o mapeamento efetivo das classes de uso do solo no Estado de Minas Gerais.

VEGETATION MAPPING OF MINAS GERAIS STATE USING MODIS DATA

ABSTRACT

The use of moderate spatial resolution and almost temporal daily resolution satellite images is a viable option to monitor natural or cultivated vegetation and its dynamics. The State of Minas Gerais in Brazil, due to its diverse biomes and fisionomies was selected as the study area for dissertation. The aims of the present work were: (a) to analyze the vegetation spectral dynamics; (b) to evaluate the image restoration technique applied to MODIS data; (c) to evaluate the classification's accuracy based on the field data; and (d) to compare the obtained results with the reference map generated by IEF/UFLA. The MODERate Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor on board of Terra and Aqua platforms provides the MOD13A1 product (Vegetation Index in 16 days composition with four spectral bands with 250m spatial resolution). With this MODIS product, it was organized a dataset for 2004. In the obtained results, it was observed that: vegetation seasonal behaviors were differentiated alongo the year, indicating possible influence of seasonality. In addition the restoration techniques applied on MOD13 images improved the spatial resolution, modifying the variance and preserving the mean values of the data. The validation of the generated maps, based on data collected during field work, presented a kappa index of 0.73 for the map derived from MODIS images and 0.84 for the reference map. From the applied methodology, the obtained results allowed to conclude that MODIS sensor data can be used for continuous vegetation monitoring in region level, and for effective land use classing mapping in Minas Gerais State.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivos.....	27
1.2 Objetivos específicos.....	27
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 Interação da vegetação com a radiação eletromagnética.....	29
2.2 Características gerais do sensor MODIS (Aqua / Terra).....	33
2.3 Índices de Vegetação.....	39
2.4 Análise por Componentes Principais.....	42
2.5 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).....	44
2.6 Restauração de Imagens Digitais.....	47
2.7 Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.....	51
2.7.1 Segmentação de Imagens.....	51
2.7.2 Classificação de Imagens de Digitais.....	52
ÁREA DE ESTUDO	55
3.1 Área de Estudo	55
3.2 Características Gerais	56
3.2.1 Relevo.....	56
3.2.2 Clima	60
3.3 Zoneamento Morfoclimático e Processos Morfogenéticos Atuantes no Modelado.....	61
3.3.1 Modelado dos Campos Cerrados.....	61
3.3.2 Os processos Atuantes nos Campos de Altitude	62
3.3.3 Os Modelados das Florestas Semidecíduas e Caatingas	63
3.4 A Flora presente no Estado de Minas Gerais	64
3.4.1 O Cerrado	65
3.4.2 Floresta Estacional Semidecídua.....	72
3.4.3 Floresta Estacional Decídua	72
3.4.4 Floresta Ombrófila (Mata Atlântica).....	74
MATERIAIS E MÉTODOS	77
4.1 Classificação e Mapeamento da Cobertura Vegetal.....	77
4.2 Pré – processamento dos dados MODIS	82
4.2.1 Confecção do Banco de Dados.....	83
4.2.2 Montagem dos Mosaicos e das Imagens Fração	83
4.3 Seleção de Imagens MODIS Multitemporais para Classificação.....	85
4.4 Restauração das Imagens e Reamostragem.....	89
4.5 Análise por Componentes Principais.....	90
4.6 Modelo Linear de Mistura Espectral	91
4.7 Segmentação das imagens	93
4.8 Aplicação dos Classificadores	95
4.9 Dados de Campo e Validação.....	99

RESULTADOS E DISCUSSÃO	101
5.1 Comportamento Sazonal das Fitofisionomias	101
5.2 Restauração de Imagens	104
5.3 Transformação por Componentes Principais.....	108
5.4 Mapeamento das fitofisionomias.....	111
CONCLUSÕES	139
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Representação esquemática de parte do espectro eletromagnético.	29
2.2 – Representação esquemática da interação da radiação eletromagnética com diferentes alvos.	30
2.3 – Comportamento espectral característico de solo, vegetação e água.	32
2.4 – Imageamento efetuado pelo sensor MODIS.	35
2.5 – Mosaico de imagens MODIS / Terra de agosto de 2004, referentes à área de estudo.	37
2.6 – Imagem NDVI do mês de julho de 2004, do sensor MODIS / Terra referente à área de estudo.	42
2.7 – Imagem resultante da ACP, PC1(R)PC2(G)PC3(B), referente ao mês de março 2004 da plataforma Aqua.	44
2.8 – Disposição de Campo de Visada do Sensor (GIFOV) de diferentes sensores remotos sobre uma mesma cena, gerando imagens com diferentes misturas espectrais.	45
2.9 – Imagem fração vegetação MODIS / Terra referente ao mês de março de 2004. ...	46
2.10 – Representação do padrão da Função de Espalhamento Pontual.	48
2.11 – Representações de imageamento formador de <i>pixels</i> em dois diferentes ângulos de aquisição.	49
2.12 – Detalhamento de um reservatório baseado na imagem MODIS original indicada pela letra (a) na resolução espacial de 250m e (b) imagem restaurada na resolução espacial de 125m. Detalhes das bordas e melhorias das feições são indicadas por setas.	50
3.1 – Imagem MODIS da plataforma Aqua do mês de maio de 2004 do Estado de Minas Gerais.	55
3.2 – Cotas altimétricas obtidas através dos dados SRTM para o Estado de Minas Gerais.	57
3.3 – Biomas presentes no Estado de Minas Gerais.	64
3.4 – Composição R(V), G(IVP), B(IVM) do mês de março (letra a) e do mês de Setembro (letra b). O bioma Caatinga é indicado por um círculo.	66
3.5 – Perfis espectrais para quatro fitofisionomias nas letras a e b, respectivamente, correspondendo aos meses de março e setembro.	67
3.6 – Representação ilustrativa da estrutura de uma área contendo Cerrado Denso.	69
3.7 – Área representativa à fitofisionomia Cerrado Típico.	69
3.8 – Área predominante da fitofisionomia Cerrado Ralo.	70
3.9 – Área representativa da fitofisionomia Campo.	70
3.10 – Área representativa da fitofisionomia Campos Rupestres.	71
3.11 – Perfil de fitofisionomias do bioma Cerrado. 1- Cerrado Denso 2- Cerrado Típico 3- Cerrado Ralo 4- Campos.	71
3.12 – Representação da distribuição espacial da Floresta Estacional Semidecídua.	72
3.13 – Área representativa de Floresta Decídua.	73
3.14 – Sobrevôo de uma área representativa do bioma Floresta Ombrófila.	75

4.1 – Identificação dos quatro <i>tiles</i> do sensor MODIS que cobrem o Estado de Minas Gerais.....	80
4.2 – Identificação das órbitas-pontos que cobrem o Estado de Minas Gerais.	80
4.3 – Fluxograma de atividades desenvolvidas nesse estudo.	82
4.4 – Distribuição espacial dos tiles MODIS no globo terrestre.	84
4.5 – <i>Endemembers</i> de três distintos alvos (solo, vegetação e sombra) selecionados em uma das datas.....	85
4.6 – Classificação do Estado de Minas Gerais, por Landsat.....	87
4.7 – Imagem fração sombra referente ao mês de agosto plataforma Aqua em uma área correspondente à parte da região sul da área de estudo.	92
4.8 – Imagem fração solo referente ao mês de agosto plataforma Aqua correspondente à parte da região sudoeste da área de estudo.	93
4.9 – Ilustração do proceso de segmentação na região norte do Estado de Minas Gerais a partir da imagem de setembro a bordo da plataforma Terra a partir do produto NDVI (Limar 8 e Área 10).	94
4.10 – Ilustração do proceso de segmentação na região leste do Estado de Minas Gerais a partir da imagem de setembro a bordo da plataforma Terra a partir do produto NDVI (Limar 8 e Área 15).	94
4.11 – Classificação realizada utilizando K-medias para o Estado de Minas Gerais usando a imagem de março da plataforma Terra utilizando (a) 5 temas e (b) 9 temas, e 10 interações para ambos mapas.....	96
4.12 – Mosaicos do sensor MODIS referentes à plataforma Terra do mês setembro, submetidos a diferentes número de classes (a) quatro, (b) cinco, e (c) seis, no processo não supervisionado de classificação chamado Histograma.	97
4.13 – Recorte da região sul do Estado de Minas Gerais ilustrando a distribuição espacial da fitofisionomia Floresta Ombrófila. Na primeira Figura (letra a) está ilustrada o mapa de referencia e na segunda Figura (letra b) a classificação por histograma para a mesma fitofisionomias. A indicação das áreas representativas desta fitofisionomias é feita por setas.	98
4.14 – Fluxograma de atividades realizadas para a validação do mapa de vegetação obtido a partir da classificação da vegetação do Estado de Minas Gerais pelos dados MODIS e o mapa de referência.....	100
5.1 – Variação sazonal do índice de vegetação NDVI para nove fitofisionomias das 13 classes em análise em cinco dos seis meses investigados.	102
5.2 – Perfis espectrais de quatro classes de vegetação para quatro bandas espectrais do sensor MODIS nos meses de março (a) e setembro (b), respectivamente.	103
5.3 – Classificação de imagens MODIS pelo K-médias considerando os dados com resolução espacial de (a) 250 m, e (b) 125m. Uma imagem do sensor Landsat para a mesma área de estudo adquirida em 15 de junho de 2004 é mostrada em (c)...	105
5.4 – Teste <i>t</i> -Student aplicado para o conjunto de 300 <i>pixels</i> coletados para a fitofisionomias Floresta semidecídua considerando as bandas espectrais do: a) Vermelho, b) IVP, c) Azul, e d) IVM.....	108
5.5 – Ilustração do mapeamento realizado pelo IEF/UFLA utilizando dados do sensor TM e ETM+ a bordo das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a), respectivamente, e o gerado através deste estudo fazendo uso dos dados multitemporais do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua (b).	112

5.6 – Trajetos percorridos em campo no mês de outubro de 2005 onde pontos de GPS foram tomados e uma caracterização geral do ponto visitado foi realizada.....	114
5.7 – Mapeamento da classe Água nominal a partir de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	117
5.8 – Mapeamento da fitofisionomias Cerrado no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	119
5.9 – Mapeamento da fitofisionomias Campo, Campos Rupestres e Cerrado ralo no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	121
5.10 Mapeamento da fitofisionomias Cerrado Típico no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	123
5.11 Mapeamento das Classes Reflorestamento para as culturas Eucalipto e Pinus no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	125
5.12 – Mapeamento das fitofisionomias Floresta Estacional Decídua, Floresta Semidecídua e Floresta Ombrófila no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	128
5.13– Mapeamento da classe Áreas Urbanizadas no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	129
5.14 – Seleção de seis retângulos contendo distintas áreas mapeadas para a discussão dos resultados do mapeamento das classes consideradas neste estudo.	130
5.15 – Mapeamento da porção sul do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	131
5.16 – Mapeamento da porção sudoeste do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais MODIS (b).....	133
5.17 – Mapeamento da porção central do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	134
5.18 – Mapeamento da porção nordeste do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	136
5.19 – Mapeamento da porção norte do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).....	137

5.20 – Mapeamento da porção sudoeste do Est do de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b). 138

LISTA DE TABELAS

4.1 – Características espectrais, espaciais e temporais dos sensores MODIS, TM e AVHRR.....	81
4.2 – Seleção das melhores datas para realizar a classificação, segundo o número de imagens definidas a serem utilizadas, a partir dos dados NDVI. Em negrito destacam-se as datas selecionadas entre os dados.	88
5.1 – Valores médios de reflectância para a classe Floresta Semidecídua.	106
5.2 – Valores médios de reflectância para a classe Eucalipto.	106
5.3 – Valores Médios de reflectância para a classe Pinus.	106
5.4 – Auto-vetores e auto-valores resultantes do uso de principais componentes com valores de reflectância de 4 bandas espectrais. Os resultados são apresentados para: (a) jan/Terra, (b) fev/Aqua, (c) mar/Terra, (d) ago/Aqua, (e) set/Aqua e (f) set/Terra.	110
5.5 – Comparativo entre as as áreas mapeadas entre o mapa de referência fornecido pelo IEF/UFLA e as áreas mapeadas utilizando os dados multitemporais dos dados MODIS.....	113
5.6 – Matriz de confusão considerando os pontos coletados em campo no mês de outubro de 2004 sobre o mapeamento gerado pelo IEF/UFLA.....	114
5.7 – Matriz de confusão considerando os pontos coletados em campo no mês de outubro de 2004 sobre o mapeamento gerado utilizando os dados multitemporais do sensor MODIS.....	115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A caracterização e o mapeamento da vegetação do território brasileiro de forma integrada foi iniciada em 1974 com o Projeto RADAM e, posteriormente, denominada RADAMBRASIL, quando foi feito o levantamento dos recursos naturais (geológicos, pedológicos, geomorfológicos, vegetação e potencial do uso da terra) dos Estados brasileiros. Através do uso de radares e levantamentos em campo, os pesquisadores mapearam o território brasileiro de norte a sul.

No entanto, a ocupação urbana, a expansão da fronteira agrícola, a exploração dos recursos naturais mudaram a paisagem de forma significativa tanto na sua composição florística quanto na sua estrutura. As técnicas de sensoriamento remoto juntamente com as análises de informações espaciais em ambientes de sistemas de informações geográficas tornaram possíveis a análise e o monitoramento multi-temporal e espacial das mudanças ocorridas na superfície terrestre (DeFries, 2002).

A crescente necessidade de informações confiáveis acerca da vegetação remanescente de biomas brasileiros como o Cerrado e a Mata Atlântica, considerados segundo Myers et al. (2000) como os únicos “hotspots” brasileiros, os tornam imprescindíveis ao sensoriamento remoto como perspectiva de fontes significativas de informações. Nesse contexto, insere-se o Estado de Minas Gerais que possui uma diversidade de fitofisionomias dos biomas Cerrado e Mata Atlântica.

Algumas ferramentas importantes para se detectar e mapear regiões da superfície terrestre são os produtos do sensoriamento remoto obtidos por plataformas orbitais e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto orbital tornou-se uma importante fonte de informações para monitorar os recursos naturais da Terra. Isso se tornou possível devido à capacidade de obtenção de

dados sobre extensas áreas, facilitando assim a compreensão dos processos que ocorrem nestas mesmas áreas amostradas.

A identificação, classificação e o monitoramento dos diferentes biomas são atividades relevantes por várias razões, especialmente porque constituem uma informação essencial para o estudo dos ciclos geoquímicos globais e do impacto resultante das atividades antrópicas (Zhang et al., 2003). Diante da necessidade do monitoramento regional e/ou global para uma melhor compreensão do seu papel nas atuais mudanças climáticas, novos sensores têm sido propostos, desenvolvidos e lançados para se obter dados com uma melhor qualidade temporal, espacial, espectral e radiométrica (NASA, 2000).

A comunidade científica tem utilizado amplamente os dados de sensores a bordo dos satélites Landsat (desde 1972), SPOT (*Systeme Probatoire d'Observation de la Terra*) (1986), RADARSAT (1996) e do CBERS (1999) (*China Brazil Earth Resources Satellite*) para o estudo da vegetação em diferentes níveis e escalas.

No mapeamento / classificação da vegetação global, continental e regional a comunidade científica de usuários do sensoriamento remoto tem utilizado intensamente os dados fornecidos por satélites meteorológicos, em particular do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), presente nos satélites da série NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*), com o primeiro lançado em 1981.

Com o lançamento da plataforma Terra em 1999, e ,posteriormente, o da plataforma Aqua em maio de 2002, ambos portando o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) dentre outros, se confirmou uma tendência dos estudos regionais e globais.

Nesse contexto, o mapeamento da cobertura vegetal mostra-se de extrema importância, pois, existe um esforço por parte da comunidade científica em melhorar a acurácia destes estudos (Hansen et al., 2002). Já que estes trabalhos visam compreender as mudanças devido a fatores naturais e antrópicos (Zhang et al., 2003) ou oferecer subsídios para uma maior eficiência nas elaborações de planos de manejo dos recursos

naturais e de delimitação de áreas prioritárias para a conservação (Biodiversitas, 2005), ou, ainda, aprofundar estudos que envolvem tópicos sobre mudanças globais (Justice et al., 2002), modelagens de ciclos biogeoquímicos e estimativas de emissão de carbono (DeFries et al., 2002), dentre outros.

Esta dissertação de mestrado tem por base a hipótese de que os dados do sensor MODIS permitem realizar a classificação da cobertura vegetal a nível regional devido a suas características de cunho espacial, temporal, espectral e radiométrica.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar a classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais utilizando dados multitemporais do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos podem ser citados:

- Analisar a técnica de restauração de imagens aplicada às imagens MODIS na classificação das imagens selecionadas;
- Produzir um mapa da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais;
- Avaliar a classificação gerada pelos produtos MODIS utilizando o mapa de referência produzido pelo Instituto Estadual de Florestas – IEF/ MG e Universidade Federal de Lavras – UFLA / MG;
- Avaliar a acurácia / exatidão da classificação em função dos pontos amostrais referentes às diferentes classes mapeadas;
- Gerar um banco de dados atualizado do Estado de Minas Gerais.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordadas, de forma sucinta, as teorias relacionadas com os temas enfocados neste trabalho: comportamento espectral da vegetação, introdução sobre o sensor MODIS e seus produtos como os índices de vegetação, e por fim as técnicas de processamento de imagens utilizadas no desenvolvimento deste trabalho (análise por componentes principais, modelo linear de mistura espectral, restauração de imagens digitais, segmentação e classificação de imagens de satélite).

2.1 Interação da Vegetação com a Radiação Eletromagnética

O Sol é a fonte de energia para os sistemas sensores passivos, fornecendo energia (radiação eletromagnética) para diferentes regiões do espectro eletromagnético (Jensen, 2002). (Figura 2.1).

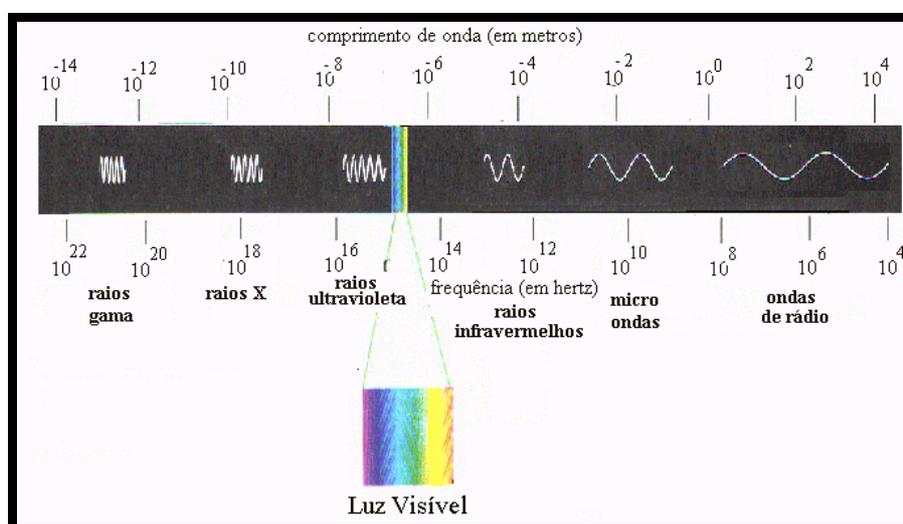


FIGURA 2. 1 – Representação esquemática de parte do espectro eletromagnético.

Fonte: educar.sc.usp.br/optica/luz.htm.

Antes de alcançar a superfície da Terra, parte da radiação solar interage com partículas suspensas na atmosfera e com moléculas de gases. Esta interação é descrita através de dois processos: absorção e espalhamento (Jensen, 2000). A radiação solar que chega à

superfície da Terra (radiação global), ao atingir a vegetação, interage com esta e resulta em três frações. Uma parte desta radiação (aproximadamente 50% do total que chega até a planta) é absorvida pelos pigmentos contidos nas folhas participando na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), alterando assim as suas estruturas moleculares, e acelerando reações, como a foto-oxidação das xantofilas.

Outra parte da fração da energia refletida interage novamente com os constituintes da atmosfera. A energia resultante desta interação que chega ao campo de visada do sensor, é detectada e convertida em valor numérico o qual é transmitido para estações de recebimento na Terra para posteriores processamentos (Schowengerdt, 1997). Finalmente, uma terceira parte sofre o processo de transmissão, através das camadas de folhas que compõem a copa e daqueles que constituem a folha, como cutícula, o parênquima lacunoso e o paliçádico (Moreira, 2003). Na Figura 2.2 pode-se observar o processo de interação sensor-alvo-atmosfera com alvos distintos na composição da cena.

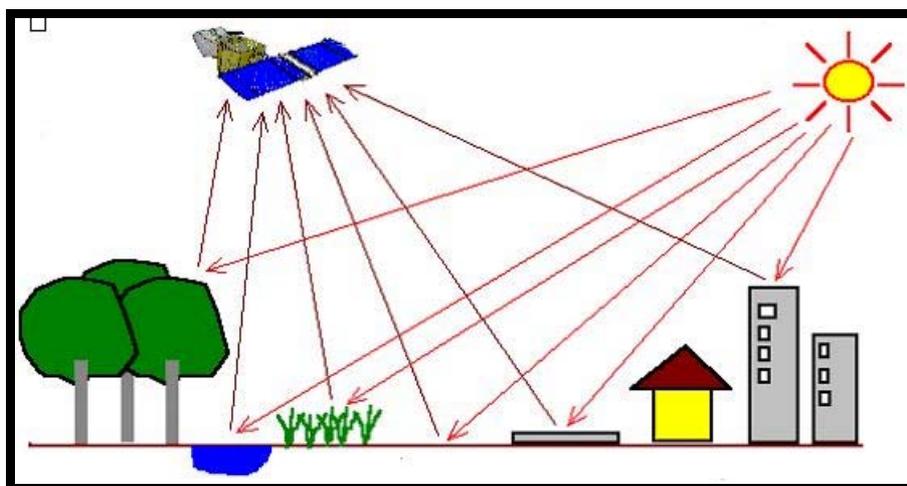


FIGURA 2.2 – Representação esquemática da interação da radiação eletromagnética com diferentes alvos.

As diferentes formas de vegetação, representadas por diferentes fitofisionomias e graus de sazonalidade e de antropismo, têm comportamentos espectrais diferentes na absorção, transmissão e reflexão das ondas do espectro eletromagnético. Para entender porque a vegetação reflete mais em certos comprimentos de onda, primeiro, é necessário considerar as propriedades de reflectância de uma folha individual. A folha é constituída de uma estrutura fibrosa de matéria orgânica, dentro da qual há pigmentos, e células

contendo água e ar. Cada um destes três elementos: pigmentos, estrutura fisiológica e conteúdo de água possui um efeito diferenciado nas propriedades de reflectância, absorvância e transmitância das folhas verdes (Curran, 1986).

A cobertura vegetal sadia tem, respectivamente, na região de comprimento de ondas no visível e no infravermelho próximo (IVP), uma alta interação com a Radiação Eletromagnética (REM). A região do visível (0,4 a 0,7 μ m) é a parte do espectro eletromagnético utilizada pelas plantas para a fotossíntese. Isso explica a forte absorção de energia nesses comprimentos de onda, e por consequência a baixa reflectância e transmitância, concentradas, respectivamente, nas regiões do azul e do vermelho.

A energia, na região do verde, é absorvida pelas plantas em menor quantidade do que nas regiões do azul e do vermelho, fazendo com que as folhas reflitam um pouco mais do que estas últimas as que dão a aparência verde às folhas (Thiam e Eastman, 1999; Verbyla, 1995). A alta absorção nestes comprimentos de onda é devido as duas bandas de absorção da clorofila (azul e vermelho) e o pico de reflectância nesta região ocorre aproximadamente em 0,54 μ m, que é a região espectral do verde.

Baseado na Lei de Kirchoff, Hoffer (1978) relatou que as folhas das plantas refletem, absorvem e transmitem a radiação incidente. Estas relações são em função do comprimento de onda (λ) e são mostradas na Equação 2.1. Esta equação mostra o balanço de energia:

$$I_{\lambda} = R_{\lambda} + A_{\lambda} + T_{\lambda} \quad (2.1)$$

onde:

I é a energia incidente;

R, a fração de energia refletida;

A, a fração energia absorvida;

T, a fração de energia transmitida respectivamente; e

λ refere-se ao comprimento em específico que está sendo considerado.

No infravermelho próximo (0.7–1.1 μm) há um aumento significativo da reflectância da vegetação quando comparamos com a região visível do espectro eletromagnético. Na região do IVP, a vegetação verde é caracterizada, respectivamente, pela alta reflectância, alta transmitância e baixa absorptância. Entretanto, essas quantidades podem variar dependendo do tipo de vegetação em análise (Hoffer, 1978). Na Figura 2.3 pode-se visualizar o comportamento espectral característico dos alvos: solo, vegetação e água.

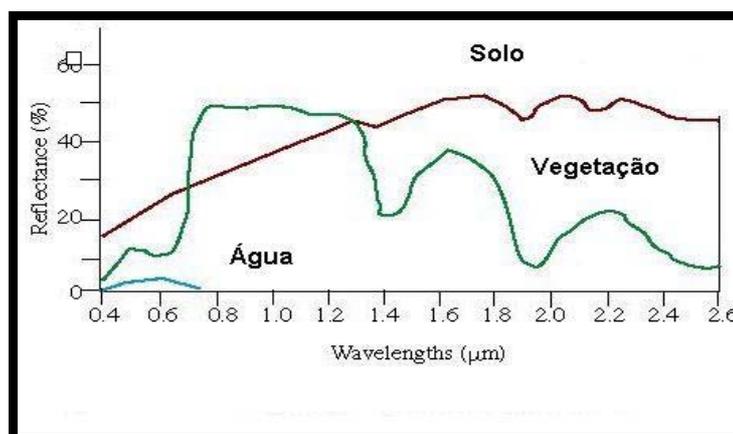


FIGURA 2.3 – Comportamento espectral característico de solo, vegetação e água.
Fonte: Adaptado de Curran (1986).

A REM na região do infravermelho próximo (0.7–1.0 μm) não é utilizada pela fotossíntese, sendo a estrutura interna das folhas a responsável pela alta reflectância nesta região, conforme pode-se observar na Figura 2.3 (Thiam e Eastman, 1999). A curva de transmitância e reflectância de uma folha são similares e apresentam a mesma magnitude. Isso ocorre porque tanto a reflectância como a transmitância são devidas ao espalhamento da luz pelas estruturas internas da folha (Kumar, 1972).

A reflectância no infravermelho próximo poderá ser influenciada pelas variações na forma e na orientação das folhas das plantas e pela quantidade de ar existente dentro da célula de cada folha. As variações dos índices de reflectância no infravermelho próximo são mais úteis do que os índices de reflectância no visível para distinguir tipos florestais como coníferas e folhosas (Verbyla, 1995).

As reflectâncias das folhas nas faces dorsal e ventral podem ser diferentes dependendo do comprimento de onda analisado. Para a região do visível, por exemplo, a face dorsal é mais refletiva pela presença do mesófilo esponjoso. A face ventral aparece mais “escura” pela alta absorção da luz visível pelos pigmentos fotossintetizantes presentes em maior quantidade nessa face. Na região do infravermelho próximo não há diferenças significativas na reflectância das duas faces, segundo estudos desenvolvidos por Ponzoni (2001).

Moreira (2003) relata que além dos fatores morfológicos: densidade da cobertura vegetal; distribuição horizontal e vertical das folhas; e ângulo de inserção foliar, diversos fatores fisiológicos influenciam na resposta espectral das plantas. Dentre os fisiológicos podem ser citados: a idade da planta; o *déficit* hídrico; o tipo e a espessura das folhas; e a deficiência de nutrientes, dentre outros. De acordo com a senescência das plantas, sua concentração de pigmentos ,em especial a clorofila, diminui, resultando conseqüentemente em uma maior reflectância nas regiões do visível e infravermelho próximo, respectivamente.

2.2 Características Gerais do Sensor MODIS (Aqua / Terra)

Durante as últimas décadas, houve um aumento no interesse em compreender os fatores que determinam as mudanças climáticas. Esse interesse foi gerado, em parte, devido às evidências de que as alterações antrópicas estivessem relacionadas, acarretando com isso, aquecimento global, e conseqüentemente um aumento no nível médio dos oceanos, além da redução da biodiversidade, dentre outros fatores que podem ser correlatos a eventos extremos que têm ocorrido com relativa periodicidade (Latorre et al, 2003).

Instituições como a NASA (*National Aeronautics Space Administration*), juntamente com outras de cunho científico atuantes em outros países, inclusive o Brasil, criaram um empreendimento científico, o ESE (*Earth Science Enterprise*). O objetivo geral deste empreendimento é aumentar o conhecimento acerca de todos os sistemas naturais e das suas interações, como as medidas objetivas identificadas no painel de mudanças globais

que primam pela redução de incertezas e a eficácia na predição do clima identificada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

O empreendimento ESE compreende quatro partes: a primeira é uma série de sensores EOS – (*Earth Observing System*); a segunda de sensores de menores dimensões o ESSP (*Earth System Science Pathfinder*); a terceira um programa interdisciplinar e interinstitucional de pesquisa e intercâmbio científico; e por último um sistema de armazenamento, de processamento e de distribuição dos dados científicos – EOSDIS (*EOS Data and Information System*).

O Sistema de Observação da Terra (EOS) tem por objetivo prover dados por vinte anos que permitirão distinguir as anomalias térmicas curtas, das oscilações climáticas interanuais e interdecadais e das mudanças oriundas das atividades antrópicas. Para alcançar os objetivos das medidas, os dados do programa EOS serão coletados sobre um amplo intervalo do espectro eletromagnético, em diferentes resoluções espaciais e com uma variedade de estratégias de observação, além de disponibilizar para a comunidade científica internacional, produtos gerados a partir destes dados.

Com estes dados, o EOS pretende estudar as formações vegetais em uma escala global, buscando um maior entendimento das suas inter-relações nos ciclos biogeoquímicos e climáticos e a sua atuação no globo terrestre como um sistema único e integrado. Para que isso seja possível, faz-se necessário o conhecimento da distribuição espacial dos biomas e dos diferentes ecossistemas que o compõem (Kaufman et al., 1998). Estudos têm demonstrado que os constituintes atmosféricos (nuvens, gases e aerossóis) afetam profundamente os oceanos e a superfície terrestre, os quais, por sua vez acabam por afetar a atmosfera. Essas relações de natureza cíclica e altamente interdependente devem ser estudadas considerando a Terra com um ecossistema integrado.

Assim, a comunidade científica liderada pela NASA voltou-se para a construção de modelos de dinâmica (atmosférica, oceânica e terrestre) da Terra tentando com isso, prever, com a devida antecedência, as possíveis alterações nos ecossistemas e suas prováveis conseqüências no globo. No entanto, na modelagem das dinâmicas globais é

necessário uma gama de informações que devem ser coletadas diariamente por um longo período de tempo, de modo a representar as regiões da superfície terrestre, oceanos e atmosfera. Dessa forma, foram desenvolvidos novos instrumentos para a coleta destes dados, tendo como exemplo, o próprio sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (NASA, 2002), cujos dados são objeto dessa investigação. O sensor MODIS encontra-se a bordo de duas plataformas: a Terra, lançada em Dezembro de 1999 e o Aqua, lançada em maio de 2002. Na Figura 2.4 encontra-se uma renderização do imageamento realizado pelo sensor MODIS sobre uma determinada órbita que compreende uma faixa em que se inclui a costa leste da América do Norte e a costa leste da América do Sul.

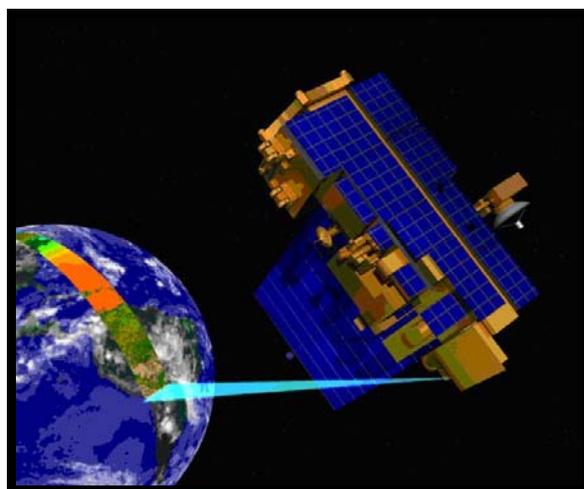


FIGURA 2.4 – Imageamento efetuado pelo sensor MODIS.
Fonte: NASA (2000).

O sensor MODIS é um radiômetro-imageador com duas coberturas diárias em resoluções espaciais de 250, 500 e 1000m. Possui 36 bandas espectrais que se estendem do visível ao infravermelho termal. As primeiras sete bandas foram planejadas para o sensoriamento remoto dos continentes, com resolução de 250m: banda 1 no vermelho (620-670 nm) e banda 2 no infravermelho próximo (841-876 nm) e de 500m: bandas 3 a 7 (450-479; 545-565, 1230-1250, 1628-1652, 2105-2155nm, respectivamente).

As plataformas Terra (EOS AM-1) e Aqua (EOS PM-1) fornecem dados ao programa *Earth Science Enterprise* (ESE) da NASA. A Tabela 2.1 apresenta algumas

características básicas do sensor MODIS. A plataforma Terra passa pelo Equador aproximadamente às 10h30AM enquanto que a Aqua às 01h30PM. A resolução temporal das duas plataformas representa uma grande vantagem, tendo duas passagens diárias, possibilitando uma frequência de amostragem significativa, ou seja, ideal para estudos em que há necessidade de coleta de dados diária. Em alguns casos excepcionais, o imageamento não é diário na linha do Equador se considerarmos apenas um sensor. Por outro lado, o sinergismo da utilização de seus dados garante um imageamento contínuo e diário nestas áreas.

TABELA 2.1 - Especificações Técnicas do Sensor MODIS.

ÓRBITA	705 km, sol síncrona, polar descendente.
FAIXA ESPECTRAL	0,4 μ m – 14,4 μ m
COBERTURA ESPACIAL	$\pm 55^\circ$; 2330 km em fileira (“scans” contínuos em nadir no equador).
RESOLUÇÃO ESPACIAL NO NADIR	250 m (2 bandas), 500m (5 bandas), 1000 m (29 bandas).
PRECISÃO RADIOMÉTRICA	5% absoluto, < 3 μ m; 1% absoluto, > 3 μ m; 2% de reflectância.
REPETIÇÃO DE COBERTURA	Diária ao norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°.
QUANTIZAÇÃO	12 bits.
TAXA DE DADOS	6,2 Mbps (média), 10,8 Mbps (dia) e 2,5 Mbps (noite).
POTÊNCIA	162,5 W (média para uma órbita) e 168,5 W (pico).

Fonte: Adaptada de Anderson et al. (2003).

Na Figura 2.5 é mostrado o resultado final do mosaico de imagens do produto MOD13 produzidas pelo sensor MODIS plataforma Terra, referente à primeira quinzena do mês de agosto de 2004. Outras informações complementares do sensor e das imagens necessárias para o mosaico dos dados do sensor MODIS sobre o Estado de Minas Gerais, serão abordadas mais adiante.

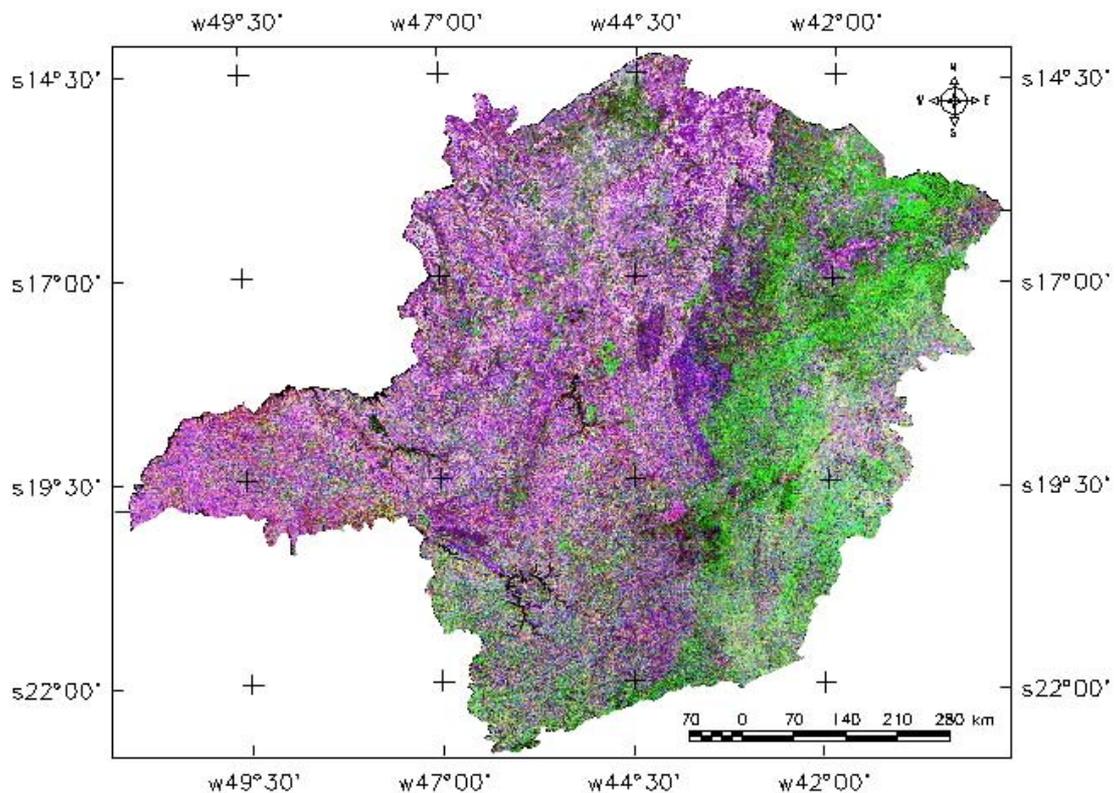


FIGURA 2.5 – Mosaico de imagens MODIS / Terra de agosto de 2004, referentes à área de estudo.

Segundo Anderson et al. (2003), as prioridades científicas da EOS (*Earth Observing System*) são prover observações globais e entendimento científico de:

- avaliar mudanças na cobertura de uso do solo e a produtividade global, incluindo tendências e modelos em escala regional, biodiversidade e produtividade primária global;
- prever o clima de forma sazonal e interanual, melhorando cálculos do tempo e clima;
- mapear a extensão geográfica de anomalias climáticas;
- caracterizar e prever desastres naturais, incluindo a caracterização de desastres e redução de riscos, como queimadas, vulcanismos, inundações e estiagens;
- estudar a variabilidade climática a longo prazo, auxiliando os cientistas a identificar os mecanismos e fatores que determinam as variações climáticas, incluindo os impactos das alterações humanas; e

- estudar o ozônio atmosférico, auxiliando cientistas a detectar mudanças e suas causas e conseqüências.

A importante aplicação da informação precisa sobre a cobertura global da superfície está na inferência de parâmetros, que a influenciam, tanto nos processos biofísicos, quanto nas trocas de energia entre a atmosfera e a superfície terrestre (Townshend *et al.*, 1991). Estes parâmetros têm por finalidade identificar tipos de cobertura terrestre para a parametrização através das informações espectrais, temporais, espaciais e direcionais contidas nos dados fornecidos pelos diferentes sensores, citando como exemplo, o próprio MODIS.

Nesse sentido, o objetivo dos produtos gerados pelo sistema MODIS são, basicamente, quantificar e detectar as mudanças da cobertura terrestre, e nos processos naturais e antrópicos, auxiliando assim, nos diversos modelos climáticos regionais e globais existentes (Strahler *et al.*, 1999).

Os produtos MODIS voltados para as aplicações terrestres (*MODLAND*) têm como objetivo principal a produção operacional de produtos de sensoriamento remoto terrestre. A continuidade no fornecimento de dados está assegurada para a comunidade científica durante um período mínimo de 20 anos. Estes dados garantem ainda a continuidade e melhorias dos dados coletados pelos sistemas anteriores (e.g. AVHRR).

Neste trabalho, para alcançar os objetivos propostos e já abordados anteriormente foram utilizadas imagens multitemporais de um produto do sensor MODIS, conhecido como MOD13 (Índices de Vegetação MODIS). O algoritmo de geração do produto índice de vegetação (MOD13) é baseado nos dados de reflectância da superfície (MOD09) e a composição temporária destes dados geram um produto cujo período de imageamento são de 16 dias. Este produto é fornecido nas resoluções de 250, 500 m ou 1 km (Vermote *et al.*, 2002). O MOD09 corresponde aos dados de reflectância diária de superfície, e é computado a partir dos níveis de radiância 1 A, nas bandas de 1 a 7 do sensor, destinadas aos estudos da superfície terrestre.

Quanto à precisão geométrica, logo após o lançamento, o sensor MODIS apresentava uma precisão de geolocalização de 1700 metros, e com o ajuste inicial dos algoritmos em maio de 2000, esta precisão passou para 150 m. Em dezembro de 2000, com mais alguns ajustes a acurácia de geolocalização atingiu 50 m, conforme havia sido, inicialmente, previsto pelo projeto (GSFC, 2000). Os procedimentos de correção atmosférica foram criados a partir de um modelo desenvolvido por Vermote e Vermeulen (1999), e corrigem efeitos de gases atmosféricos, aerossóis e nuvens *cirrus* de pequenas espessuras.

O algoritmo de correção atmosférica, utiliza a banda 26 (1360 – 1390 nm) para detecção de nuvens *cirrus*, dados de vapor de água do produto MOD-05, aerossóis derivados do produto MOD-04, e ozônio a partir do produto MOD-07, além de dados de BRDF (*Bidirecional Reflectance Distribution Function*) do produto MOD-43. Este produto é empregado na geração de diversos outros derivados, tais como Índices de Vegetação (MOD-13), BRDF (MOD-43), FPAR (*Fraction of Photosynthetically Active Radiation*) / LAI (*Leaf Area Index* - (MOD-15), Anomalias Termiais (MOD-14) e Neve / Gelo (MOD-10).

2.3 Índices de Vegetação

O desenvolvimento de relações funcionais entre as características da vegetação e os dados coletados remotamente tem sido meta de muitos profissionais dos setores agrícola e florestal. Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e combinada em vários índices de vegetação através da utilização de duas ou mais bandas espectrais. Os mais comumente empregados utilizam a informação contida nas reflectâncias de dosséis referentes a regiões do vermelho e do infravermelho próximo as quais são combinadas sob a forma de razões (Ponzoni, 2001).

O índice de vegetação resulta da combinação da medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação em algumas bandas espectrais do espectro-eletromagnético, que guardam uma certa relação com a quantidade e o Estado da vegetação. O uso da razão

radiância do infravermelho / radiância do vermelho para estimar a biomassa e o índice de área foliar (IAF) foi primeiramente utilizado para estimar o IAF de florestas tropicais. Neste primeiro estudo, envolvendo medidas de radiação eletromagnética refletida e / ou emitidas, tais medidas foram feitas no interior do dossel. Jordan (1969), citado por Ponzoni (2001), apresentou o índice da razão da vegetação (RVI) por uma razão simples entre as reflectâncias do infravermelho próximo e vermelho:

$$RVI = \frac{\rho_{IVP}}{\rho_{Vermelho}} \quad (2.2)$$

onde:

ρ_{IVP} é a reflectância do infravermelho próximo; e

ρ_V é a reflectância no vermelho.

Logo depois, Rouse et al. (1973), citado por Santos (1988), propôs o uso da diferença normalizada para o monitoramento da vegetação.

Os produtos MODIS de índices de vegetação (MOD13) fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação global, para monitorar a atividade fotossintética da vegetação em suporte à detecção de mudanças, e às interpretações biofísicas e fenológicas. O MOD 13 possui dois índices de vegetação, o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), utilizado neste estudo, e o índice de vegetação melhorado (EVI), que são produzidos globalmente nas resoluções espaciais de 250m, 500m e 1km, e conforme mencionado anteriormente, no período de 16 dias. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar, a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete e Justice, 1999).

Dada as características dos dados MODIS (largura da faixa de imageamento, alta resolução temporal e resolução espacial moderada) Anderson *et al.* (2003) relatam que as imagens índices de vegetação, obtidas dos dados MODIS (MOD13) têm como objetivo fornecer dados consistentes para comparações temporais e espaciais das condições da vegetação, em nível global. Em outras palavras, o objetivo principal deste

produto é monitorar a atividade fotossintética da vegetação visando detectar mudanças no vigor vegetativo e associar estas mudanças às condições biofísicas e fenológicas das mesmas.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é uma relação entre medidas espectrais (reflectância - ρ) de duas bandas espectrais, a do infravermelho próximo (800-1100nm) e a do vermelho (600-700nm), e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, comumente observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre o intervalo de -1 e 1 . Este índice pode ser obtido através da utilização da Equação 2.3:

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{Vermelho})}{(\rho_{IVP} + \rho_{Vermelho})} \quad (2.3)$$

onde novamente:

ρ_{IVP} é a reflectância do infravermelho próximo; e

ρ_V é a reflectância no vermelho.

Uma peculiaridade atribuída ao NDVI é a rápida saturação, o que o torna insensível ao aumento da biomassa vegetal a partir de determinado estágio de desenvolvimento (Moreira, 2001). Na Figura 2.6, encontra-se uma imagem NDVI referente ao mês de julho /2004 do sensor MODIS plataforma Terra.

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de melhorar o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e da redução das influências atmosféricas. Segundo Justice et al.(1998)

$$EVI = G \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{Vermelho})}{(L + \rho_{IVP} + C_1 \times \rho_{Vermelho} - C_2 \times \rho_{Azul})} \quad (2.4)$$

onde:

ρ_{IVP} é a reflectância do infravermelho próximo;

$\rho_{Vermelho}$, é a reflectância no vermelho;

ρ_{Azul} , é a reflectância no azul;

G, é o fator de ganho do solo, cujo valor é 2,5;

L, é fator de ajuste para o solo, cujo valor é 1; e

C1 e C2, são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera, cujos valores são 6 e 7,5, respectivamente.

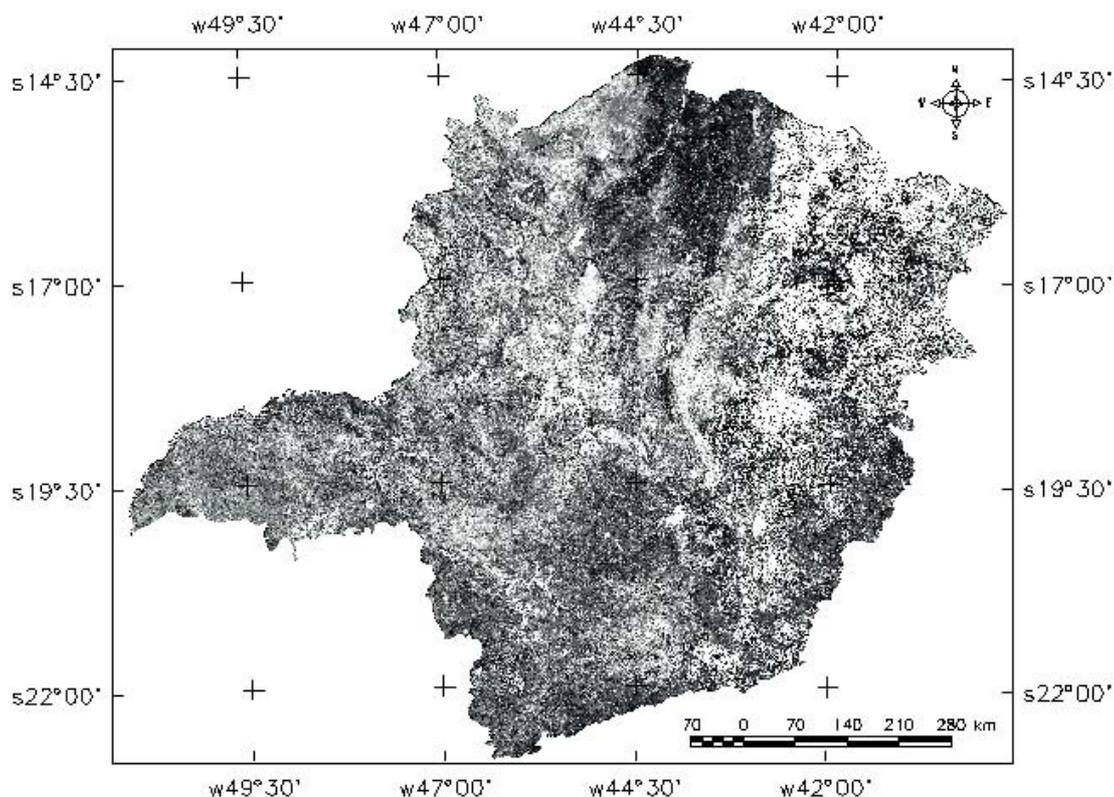


FIGURA 2.6 – Imagem NDVI do mês de julho de 2004, do sensor MODIS / Terra referente à área de estudo.

2.4 Análise por Componentes Principais

A Análise por Componentes Principais (ACP), também chamada de Transformação por Principais Componentes ou Transformação de Karhunen-Loeve, é uma das funções do processamento de imagens mais robusta na manipulação de dados multitemporais (Crosta, 1992). As informações presentes nos canais (bandas) de uma imagem multiespectral são freqüentemente correlacionadas, resultando em redundância de

informação e dificultando a total apreensão da informação presente nos dados remotamente situados (Mather, 1999). Assim, a análise das bandas espectrais individuais pode ser ineficiente devido à informação redundante presente em cada uma dessas bandas (Gonzalez e Woods, 1992).

A Análise por Componente Principal usa uma transformação linear de dados multiespectrais para transladar e rotacionar os dados para um novo sistema de coordenadas, que remove a correlação entre os eixos. Esta correlação advém do efeito de sombras resultantes da topografia, da sobreposição das janelas espectrais entre bandas adjacentes e do próprio comportamento espectral dos objetos, além outros fatores.

Esta transformação tem como base a rotação do espaço de atributos na direção do auto vetor, vetor de maior comprimento na combinação de atributos estudados, sobrepostas ao centróide da mesma com o intuito de aumentar a ortogonalidade do conjunto de atributos. Esta rotação promove o alinhamento dos autovetores, proporcionando a união das informações de maior correlação nos primeiros componentes (Mather, 1999). A Figura 2.7 apresenta um exemplo de uma das imagens resultantes da aplicação da técnica de componentes principais.

Dá origem a um novo conjunto de imagens cujas bandas individuais apresentam informações não-disponíveis em outras bandas. A ACP reduz a dimensionalidade dos dados, mas por outro lado, informações significativas de alguma das bandas podem não ter sido mapeadas para os primeiros componentes gerados pela transformação (Schowengerdt, 1997).

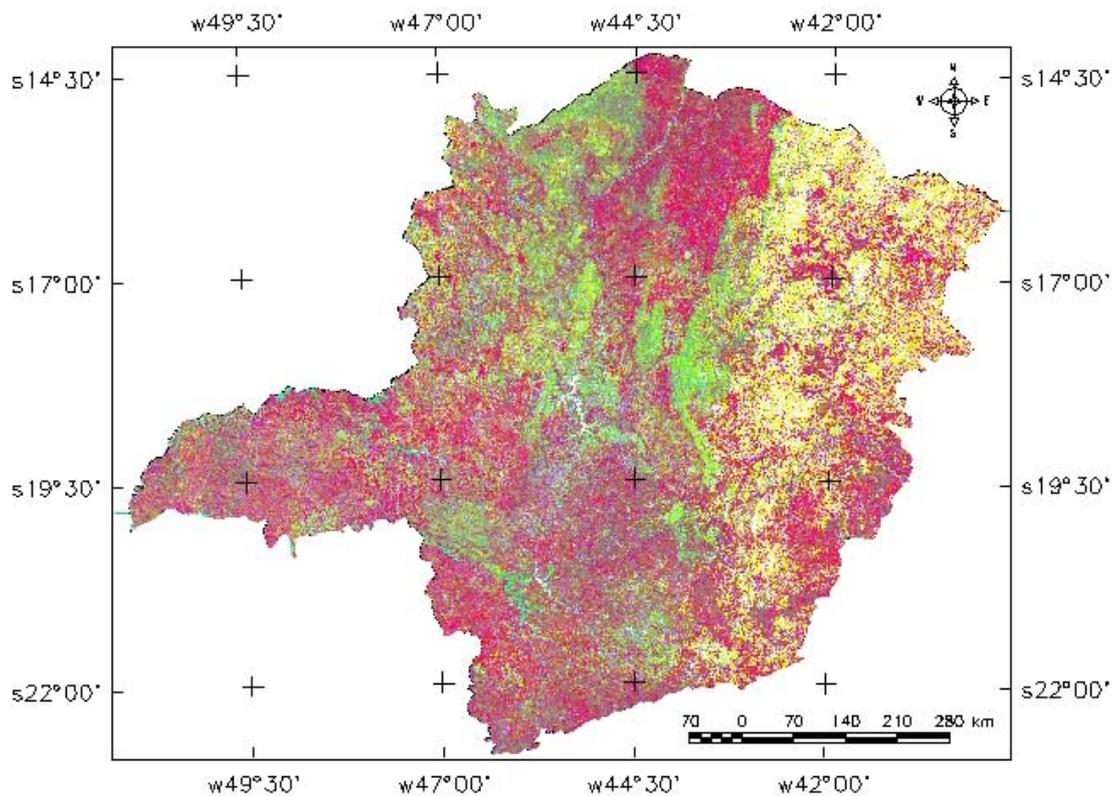


FIGURA 2.7 – Imagem resultante da ACP, PC1(R)PC2(G)PC3(B), referente ao mês de março 2004 da plataforma Aqua.

2.5 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)

A porção da radiação eletromagnética (REM) que chega à superfície terrestre interage com os alvos e uma fração retorna sofrendo processos de absorção e espalhamento durante sua travessia na atmosfera. Esta fração da REM que é registrada é a integração da radiância de todos os objetos que estão contidos no campo de visada do sensor ou *Ground Instantaneous Field of View* (GIFOV) do detector.

O processo de mistura espectral ocorre, quando, mais de um alvo em questão é responsável pela resposta espectral do *pixel* no sistema imageador. Este fenômeno é muito comum em imagens de baixa e média resolução espacial, devido ao tamanho da área imageada e seus *pixels*, sendo pouco provável a localização de um *pixel* puro. Na Figura 2.8 pode-se observar o processo de mistura espectral. Nota-se que à medida que a resolução espacial aumenta também cresce o percentual de mistura dentro do *pixel*.

A idéia do modelo linear de mistura espectral (MLME) consiste em estimar a proporção de cada tipo de cobertura do terreno em cada elemento de imagem (*pixel*) da cena em questão. Para tanto, o MLME fundamenta-se no pressuposto de que a resposta espectral de um *pixel*, numa banda qualquer (bandas 1, 2,...,m) é a combinação linear dos diversos materiais contidos na superfície. Portanto, para qualquer imagem (multiespectral ou hiperspectral), conhecendo-se as respostas espectrais dos componentes, as proporções destes podem ser estimadas de forma individual por meio da geração de imagens fração (Shimabukuro e Smith, 1991).

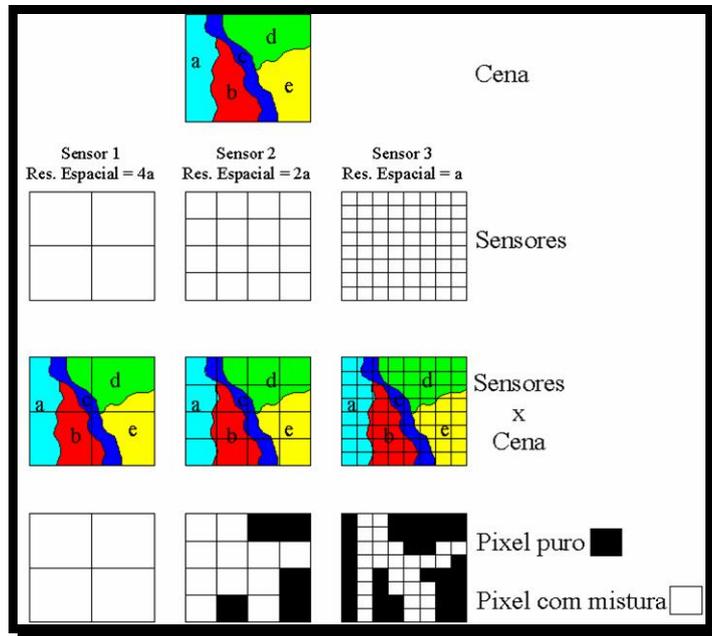


FIGURA 2.8 – Disposição de Campo de Visada do Sensor (GIFOV) de diferentes sensores remotos sobre uma mesma cena, gerando imagens com diferentes misturas espectrais.

Fonte: Piromal (2006).

O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a \times vege_i + b \times solo_i + c \times \acute{a}gua_i + e_i \quad (2.5)$$

onde:

r_i é a resposta do *pixel* na banda i ;

a é a proporção de vegetação;

b é a proporção de solo;

c é a proporção de sombra ou água;

$vege_i$ é a resposta espectral do componente vegetação na banda i ;

$solo_i$ é a resposta espectral do componente solo na banda i ;

$água_i$ é a resposta espectral do componente sombra ou água na banda i ;

e_i é o erro na banda i ; e o índice i são as bandas do sensor (Shimabukuro et al.1998).

Diversos autores já aplicaram a técnica do MLME para estudos com diferentes abordagens: mapeamento e/ou classificação da cobertura vegetal (Rodriguez Yi, 2000; Pastor, 2002; Ferreira, 2003; Anderson, 2004, e 2005a); detecção de queimadas Carreiras et al. (2002); estimativa de parâmetros de dosséis (Meliá et al., 2000; Hu et. al 2004); modelagem de reflectância (Piromal, 2006) e detecção de áreas desmatadas (Anderson et al., 2005b). A Figura 2.9 representa uma imagem da vegetação resultante da aplicação do MLME a última abordagem citada.

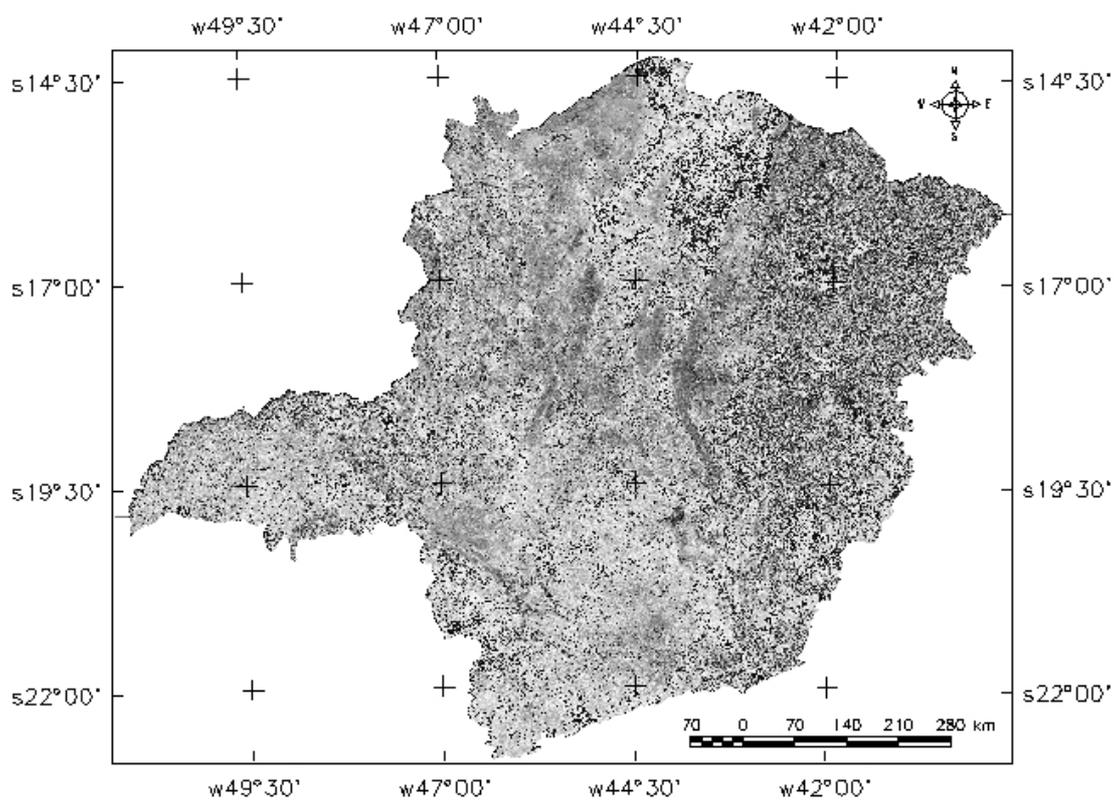


FIGURA 2.9 – Imagem fração vegetação MODIS / Terra referente ao mês de março de 2004.

2.6 Restauração de Imagens Digitais

Em sensoriamento remoto, é importante melhorar a resolução espacial e radiométrica das imagens. Por isso uma boa aproximação da imagem original sobre uma grade mais fina torna-se necessária em várias aplicações. Na reamostragem de imagens, técnicas de interpolação como a do Vizinho mais Próximo, a Bilinear e a Convolução Cúbica são, geralmente, utilizadas. É interessante a combinação dos processos de restauração e interpolação para gerar imagens com melhor resolução espacial efetiva sobre uma grade mais fina que a imagem original (Fonseca, 1988).

Uma imagem de sensor orbital está sujeita a uma série de processos que acarretam na degradação do sinal amostrado. Tais degradações variam em natureza, podendo ser agrupados em duas classes distintas Colwell (1983): distorções radiométricas e geométricas. As distorções radiométricas são caracterizadas, principalmente, pelo borramento de detalhes, presença de ruído aleatório, ruído de transmissão, sombreamento, mudanças na radiância do terreno devido ao ângulo de visada, listras e machas na imagem, amplitude de resposta não linear e perda de linhas/colunas (Fonseca, 1988; Colwell, 1983).

As distorções radiométricas e geométricas nas imagens são causadas, principalmente, pelo efeito de filtragem passa-baixa do sensor (limitação por difração óptica, tamanho dos detectores, amostragem não-ideal e transientes nos componentes eletrônicos), efeitos de espalhamento na atmosfera, variações nos ganhos dos detectores, perturbações na plataforma e condições de imageamento (rotação e esfericidade da Terra).

As degradações na imagem diminuem a precisão da informação extraída e, portanto, reduzem a utilidade dos dados. É de interesse do sensoriamento remoto melhorar qualidade das imagens para atender a suas várias aplicações. Para tanto, antes que os dados sejam utilizados, é necessário que eles passem por uma etapa de pré-processamento.

Dentre as técnicas de correção radiométrica, geralmente, se inclui a restauração radiométrica de imagens. Esta técnica destina-se a corrigir a degradação inserida pelo sensor, que atua como um filtro passa-baixa. A ótica, os detectores e a eletrônica do sistema têm importante contribuição na degradação espacial do sistema. Por isso, a resolução efetiva é, geralmente, menor do que a resolução nominal do sistema, por não levar em conta as imperfeições do sensor. No entanto, por meio do processo de restauração radiométrica pode-se melhorar, até certo ponto, a resolução espacial das imagens geradas pelos sistemas imageadores (Fonseca, 1988).

Supondo-se que o sensor pode ser descrito como um sistema linear, sua resposta espacial é completamente caracterizada pela sua resposta impulsiva, ou em termos ópticos, pela Função de Espalhamento Pontual ou PSF (*Point Spread Function*). A PSF descreve a saída do sistema para uma fonte pontual no plano objeto, ou seja, ela pode ser vista como a responsividade espacial de um sensor (Schowengerdt, 1997). A Figura 2.10 mostra um exemplo de Função de Espalhamento Pontual (PSF), que caracteriza o processo de borramento da imagem.

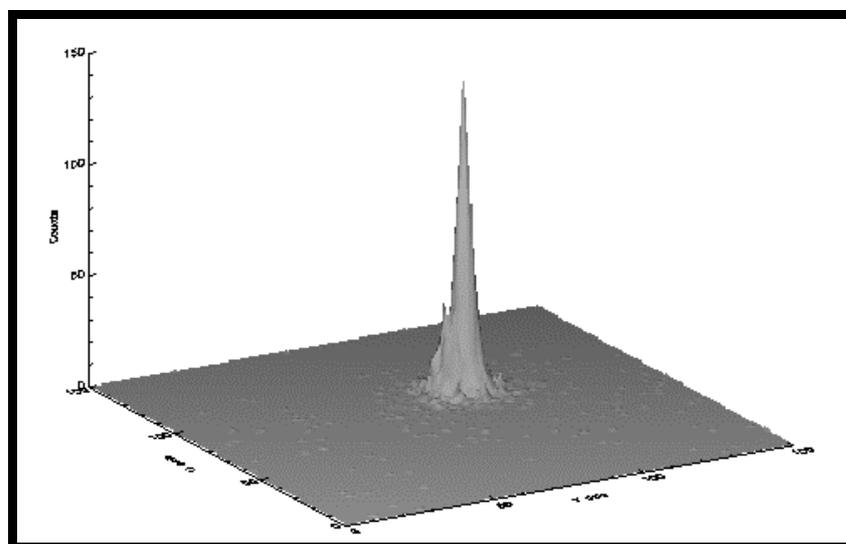


FIGURA 2.10 – Representação do padrão da Função de Espalhamento Pontual.

A restauração é um processo que tenta recuperar ou reconstruir uma imagem que tenha sido degradada, a partir do conhecimento *a priori* do fenômeno de degradação. As técnicas são então orientadas no sentido de modelar a degradação e aplicar o processo

inverso a fim de recuperar a imagem original. A compreensão do processo de restauração demanda conhecimento acerca dos processos de formação de uma imagem.

Um sistema imageador orbital registra a radiância que deixa a superfície, após sua interação com a atmosfera terrestre, conhecida como radiância no topo da atmosfera. Essa radiação é coletada através de um sistema óptico, e filtrada em diferentes intervalos de comprimentos de onda, ou bandas. Cada banda é coletada por um conjunto específico de detectores.

Durante o processo de aquisição, cada detector mede a radiância originada por uma superfície, que corresponde à projeção da área deste elemento detector, na superfície terrestre. Esta área é conhecida como IFOV (*Instantaneous Field of View*), e é expressa na forma angular ou em área de superfície imageada. A Figura 2.11 mostra uma representação do IFOV em duas posições diferentes: nadir e oblíquo. Na posição em oblíquo, nota-se o deslocamento lateral nas dimensões do *pixel* gerado, a medida que afasta-se da normal (perpendicular).

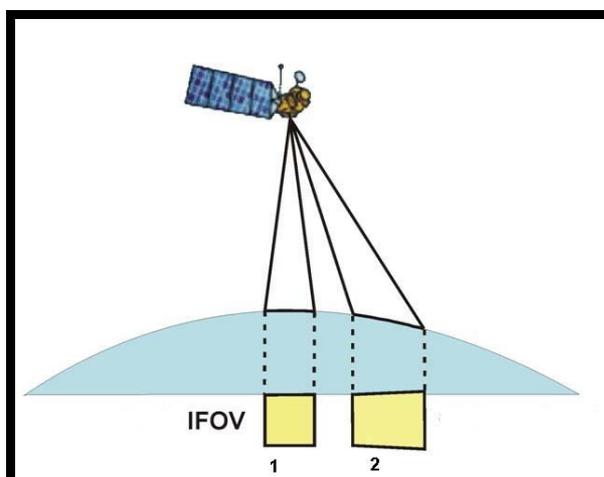


FIGURA 2.11 – Representações de imageamento formador de *pixels* em dois diferentes ângulos de aquisição.

De acordo com os conceitos apresentados, cada valor de Nível de Cinza (NC) do *pixel* da imagem representa a quantificação, em uma escala de valores, da radiância originada em um ponto na superfície cuja área é determinada pelo IFOV do sensor. Quanto maior o IFOV, maior é a perda de detalhes da cena representada na imagem digital.

Uma forma de medir o desempenho do sensor, quanto a resolução espacial, é através do parâmetro EIFOV (Effective Instantaneous Field of View). Ele é medido a partir da PSF ou Função de Transferência de Modulação (FTM), que é a transformada de Fourier da PSF. Valores tradicionais deste parâmetro giram em torno de 1,5 IFOV. Ou seja, no caso do sensor TM que possui IFOV de 30 metros, o EIFOV deve estar em torno de 45 metros. O objetivo da restauração é melhorar a resolução efetiva do sensor e assim realçar as feições nas imagens, principalmente, nas regiões com feições lineares (ruas, estradas, pistas de aeroporto, áreas urbanas, etc). É importante distinguir as diferenças entre restauração e realce de imagens.

Na Figura 2.12, pode-se encontrar exemplos de imagens MODIS em sua resolução espacial original (250m) e restaurada (125m), onde se observa detalhes nas bordas antes e após processo de restauração, indicadas com setas.

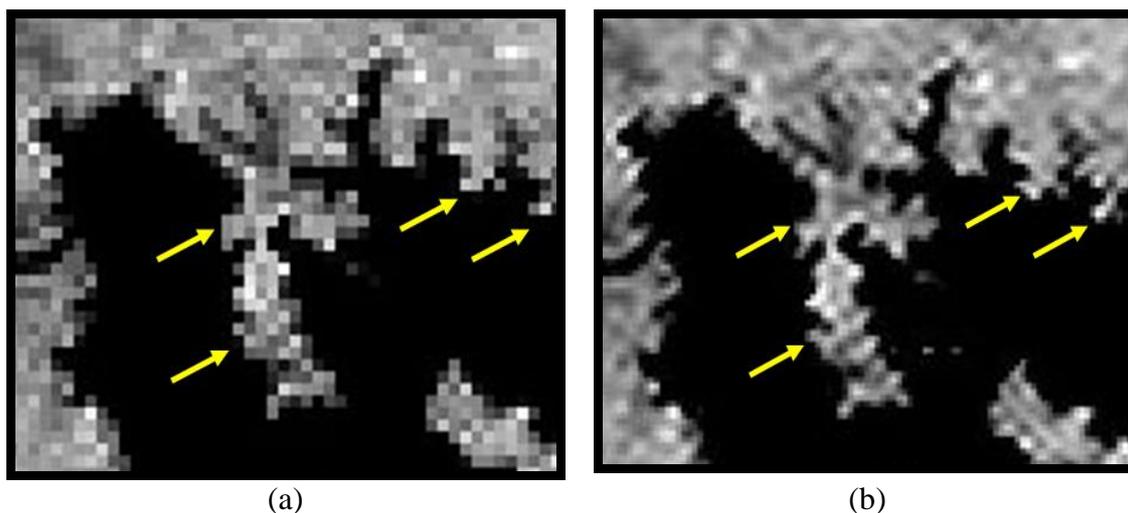


FIGURA 2.12 – Detalhamento de um reservatório baseado na imagem MODIS original indicada pela letra (a) na resolução espacial de 250m e (b) imagem restaurada na resolução espacial de 125m. Detalhes das bordas e melhorias das feições são indicadas por setas.

Segundo Boggione (2003) é impossível projetar um filtro de restauração ideal. O que se faz é projetar um filtro mais proximal do ideal. Portanto, o processo de restauração pode ser visto como um projeto de um filtro espacial que atenda aos requisitos de filtragem ideal, no domínio do espaço ou da frequência, considerando as limitações da implementação prática. A importância de se usar um modelo de degradação linear e

invariante no espaço é de que a concepção do processo de restauração de imagens em termos de um filtro espacial linear é possível e desejável.

2.7 Processamento Digital de Imagens

As imagens geradas pelos sensores remotos são constituídas por um conjunto de elementos de cena (*pixels*) dispostos na forma de matriz. Cada elemento poder ser localizado dentro de um sistema de referenciamento do tipo linha e coluna. Cada *pixel* possui um valor associado (Nível de Cinza) que representa a intensidade de energia eletromagnética proveniente de um elemento de resolução do terreno (Mather, 1999).

Entende-se por Processamento Digital de Imagens a manipulação de uma imagem por um *software*, de modo que na entrada e saída do processo se tenha imagens diferenciadas em algum aspecto em questão. O objetivo principal é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, gerando, inclusive, produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

2.7.1 Segmentação de Imagens

A classificação por *pixel* é o procedimento convencional mais utilizado para análise digital de imagens. Constitui um processo de análise de *pixels* de forma isolada. Essa abordagem implica na análise pontual ser baseada unicamente em atributos espectrais. Para superar essas limitações, propõe-se o uso do processo de segmentação de imagem, anterior à fase de classificação, onde são extraídos os objetos relevantes para a aplicação desejada (Schowengerdt, 1997).

No processo de segmentação, a imagem é dividida em regiões que devem corresponder às áreas de interesse de aplicação. Entende-se por regiões, um conjunto de *pixels* contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade espectral.

Para se efetuar a segmentação de imagens por crescimento de regiões (implementado no SPRING) é necessário se estabelecer dois limiares: 1) limiar de similaridade – o qual corresponde à distância Euclidiana entre as médias de duas regiões e 2) limiar de área –

que se refere a área mínima a ser considerada como uma região, baseado no número de *pixels*.

Maiores detalhes sobre o processo de segmentação de imagens pode ser encontrado em (Schowengerdt, 1997) e Mather (1999).

2.7.2 Classificação de Imagens de Digitais

Quando o avanço da tecnologia e uso dos satélites permitiram ao homem visualizar a Terra a partir do Cosmos, foi um grande impacto e uma verdadeira revolução na forma de percepção do Planeta: passou-se a ter consciência da sua unidade, e de que a natureza tornara-se um bem escasso. (Becker, 2004).

Duas questões geográficas de suma relevância merecem ser destacadas: a questão da alteração da percepção humana com o avanço da tecnologia e a questão das escalas. O uso de produtos de sensoriamento remoto permitiu um grande incremento na qualidade bem como na quantidade de informações sobre recursos naturais. Nesse contexto, a classificação de imagens de satélites possui um papel crucial.

Os classificadores podem ser divididos em dois tipos: classificadores *pixel a pixel* e classificadores por região. O processo de classificação de imagens multiespectrais associa cada *pixel* da imagem ou cada região a um tema que descreve um objeto real (vegetação, água, solo etc.).

Os classificadores *pixel a pixel* utilizam, apenas, a informação espectral isoladamente de cada *pixel*, para encontrar regiões homogêneas. Esses classificadores podem ainda ser separados em métodos estatísticos (que utilizam regras da teoria de probabilidade) e determinísticos (que não o fazem). Os classificadores por regiões utilizam, além da informação espectral de cada *pixel*, a informação espacial que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos (Anderson, 2004).

Quanto ao tipo de treinamento, o processo de classificação pode ser supervisionado ou não supervisionado. Na classificação supervisionada, as amostras representativas para cada uma das classes presentes na imagem são adquiridas pelo próprio usuário. Na

classificação não-supervisionada, cada *pixel* ou região da imagem é associado a uma classe sem que o usuário tenha um conhecimento prévio do número ou mesmo identificação das diferentes classes presentes na imagem.

Neste trabalho, dois classificadores por regiões (Histograma e Isosseg) e um classificador *pixel a pixel* (K-médias) são usados. O classificador por histograma é um algoritmo de *clustering*, que não utiliza a distância euclidiana entre as médias das regiões e computa a diferença entre os histogramas das regiões. O cálculo da distância entre duas regiões é feito através da raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre dois histogramas (Schowengerdt, 1997).

O classificador supervisionado MAXVER-ICM (*Iterated Conditional Modes*) além de associar classes baseado em pontos individuais da imagem, leva em consideração a dependência espacial da classificação. Inicialmente, a imagem é classificada pelo algoritmo MAXVER (Máxima Verossimilhança) que atribui classes aos *pixels* respeitando os valores dos níveis digitais em duas curvas *gaussianas*. Em seguida, a informação contextual da imagem é valorizada, ou seja, a classe atribuída depende tanto do valor observado nesse *pixel* quanto das classes atribuídas aos seus vizinhos. Este processo é finalizado quando o percentual de mudança, ou seja, o percentual de *pixels* reclassificados, definido pelo usuário, é atendido.

O classificador de Battacharia é um classificador por regiões. A medida de Battacharia é usada para medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais. Ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais. Descrições detalhadas dos métodos de classificação de imagens podem ser encontradas em Crosta (1992), Mather (1999) e Schowengerdt (1997).

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 Área de Estudo

A Figura 3.1 apresenta a área de estudo dentro do contexto nacional e regional. O Estado de Minas Gerais abrange uma área de 588.384 km² o que corresponde a um percentual médio de 7% do território brasileiro (FJP, 1999).

Apresenta uma grande diversidade de tipos vegetacionais e passa por uma elevada taxa de conversão da cobertura do solo para fins econômicos (agricultura, pecuária, mineração etc.) Assim, devido a essas características únicas e à necessidade de trabalhos que descrevam a sua cobertura vegetal de forma sinóptica e contínua, o Estado de Minas Gerais é uma área interessante para a pesquisa.

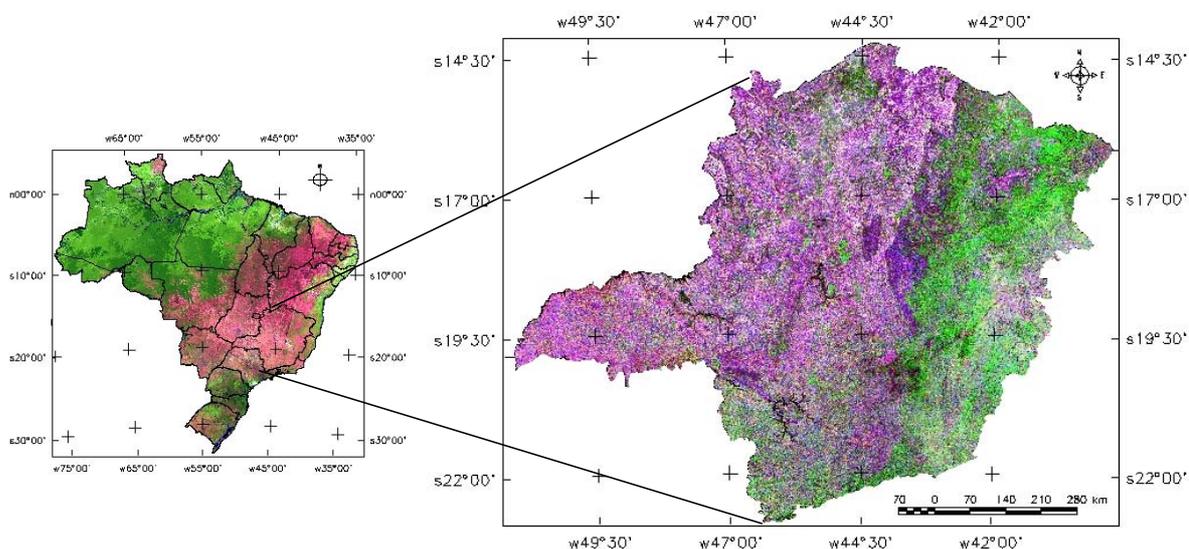


FIGURA 3.1 – Imagem MODIS da plataforma Aqua do mês de maio de 2004 do Estado de Minas Gerais.

A vasta superfície, o clima, o relevo e os recursos hídricos do Estado propiciam o aparecimento de uma cobertura vegetal extremamente rica e diversa, agrupada em três grandes biomas: a Mata Atlântica, o Cerrado e a Caatinga, com suas inúmeras formações fitoecológicas, responsáveis por uma grande diversidade de paisagens.

O processo de ocupação verificado no Estado, aliado a uma política pouco racional de desenvolvimento, tem provocado uma crescente extinção de sua diversidade biológica. Ao longo de sua história, Minas Gerais sofreu um intenso processo de exploração de seus ecossistemas naturais mais representativos, a Mata Atlântica e o Cerrado. A introdução da cultura do café provocou o primeiro grande impacto sobre os ecossistemas nativos. Em seguida, a presença do minério de ferro, associada à disponibilidade energética representada pelas florestas nativas, favoreceu a implantação da indústria siderúrgica (Fundação Biodiversitas, 2004).

3.2 Características Gerais

3.2.1 Relevo

O relevo do Estado de Minas Gerais difere do de outras regiões do país pela diversidade de quadros morfológicos, resultantes da tectônica de arqueamento, falhamentos e fraturamento que afetaram o escudo brasileiro a partir do Mesozóico. No Sudoeste do Estado estão os arqueamentos máximos e falhamentos, originando monumentais escarpas próximas aos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo (Moreira, 1977). Na Figura 3.2 pode-se visualizar o fatiamento da altimetria da área de estudo, obtidas a partir de dados do sensor SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), tais dados podem ser gratuitamente obtidos no seguinte endereço eletrônico: <http://edc.usgs.gov/products/elevation.html> .

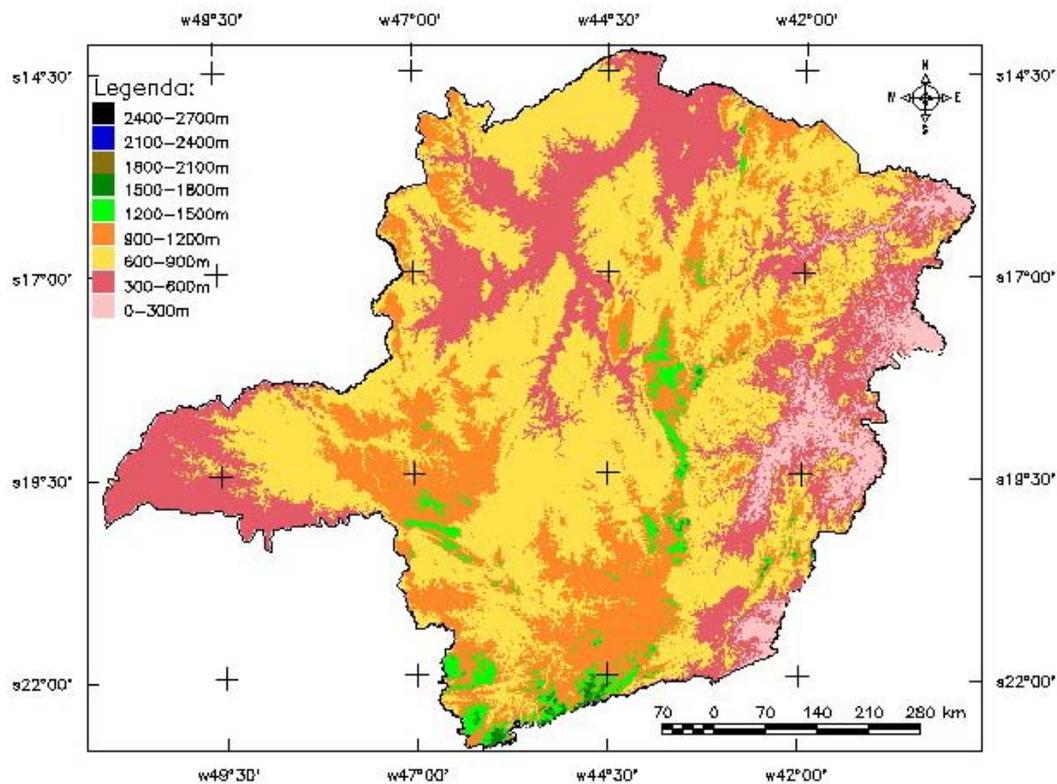


FIGURA 3.2 – Cotas altimétricas obtidas através dos dados SRTM para o Estado de Minas Gerais.

No modelado das diversas unidades estruturais houve a forte ação do fator erosão, atuante no Pré e Pós-Cretáceo. A partir do Quaternário, o relevo de Minas Gerais foi modelado por processos morfogenéticos ligados a sucessões ou alternâncias de períodos úmidos e secos, capazes de criar condições que nos permitem identificar e caracterizar as formas resultantes como possuidoras de uma certa unidade paleogeográfica recente. Nesses modelados, a permanência de condições úmidas favoreceu os processos da meteorização química, responsáveis pela elaboração de espessos mantos de regolito, pelo desenvolvimento de solos vermelhos e amarelos, latossólicos e podzolizados, sobre os quais se instalou a vegetação (RADAMBRASIL, 1983). Os grandes domínios morfoestruturais do Estado são:

- 1) A Serra da Mantiqueira - Em conjunto, forma o segundo degrau do planalto brasileiro. Sua extensão tem sido dada como englobando a área que vai do

planalto de Caldas até Caparaó. Caracteriza-se por uma imponente escarpa voltada para o Vale do Paraíba, cujos desníveis excedem a 2.000 metros.

- 2) O Planalto do Sul de Minas - Para o interior, após transpor-se a Serra da Mantiqueira, encontramos o Planalto do Sul de Minas ou a superfície do alto Rio Grande que se alonga para o norte até as cabeceiras do Rio São Francisco e continua na direção oeste, onde é recoberto pelos sedimentos da Bacia do Paraná. Na área de Poços de Caldas ergue-se o maciço alcalino de 1.500 a 2.000 metros, Moreira (1977) definiu como um domo formado de rochas eruptivas. A presença de cristas quartzíticas nas proximidades do Rio Grande determina o aparecimento de um relevo movimentado, onde há uma série de alinhamentos que dão origem a importantes acidentes estruturais de direção SW- NE. Outras, porém, estendem-se em sentido oposto, para noroeste, diminuindo de altitude em áreas próximas da cidade de Nepomuceno.
- 3) Os Planaltos Cristalinos Rebaixados - Os planaltos cristalinos rebaixados estão localizados entre a alta superfície do Itatiaia e o maciço do Caparaó. Esta área é definida, geomorfologicamente, como região deprimida das dobras de fundo, de direção aproximada leste-oeste, cujos abaulamentos máximos ocorrem na escarpa da Mantiqueira e no maciço do Caparaó. Próximo à cidade de Santos Dumont há um escarpamento marcando a passagem entre os planaltos mais rebaixados ao leste e os que se elevam no oeste. O trecho mais rebaixado desta área é a “Zona da Mata” de Minas Gerais. Onde o relevo apresenta-se ondulado, aparecendo com frequência o nível de 350-400 m ao sul desta área, enquanto alguns níveis elevados chegam a 800-900 m de altitude.
- 4) As Altas Superfícies Modeladas em Rochas Proterozóicas – Ao norte de Ouro Preto, além da superfície de 800-1000 m que faz a divisa entre as bacias dos rios Grande e Doce, eleva-se a Serra de Ouro Branco, onde está o ponto de partida da alta superfície conhecida como Espinhaço. Essa unidade geomorfológica constitui uma superfície elevada que se alonga para o norte, com altitudes que chegam a ultrapassar 1.200 metros, compreendendo uma faixa que varia entre 50

a 100km de largura por 1000km de extensão, servindo como divisor de águas entre as Bacias do São Francisco e os rios que drenam diretamente para o Atlântico. Os limites do Espinhaço, propriamente ditos, abrangem a área montanhosa que vai do sul de Belo Horizonte, seguindo em direção norte, até Diamantina. A topografia apresenta-se bastante acidentada; os abruptos dominam esta área e são explicados, na maior parte das vezes, por erosão diferencial, pois os estudos realizados demonstram que não existe grande número de falhas na zona (Moreira, 1977).

- 5) A Depressão Periférica – A bacia Mesozóica do Paraná ocupa extensa área dentro da Região Sudeste, estendendo-se desde o Triângulo Mineiro, no trecho compreendido entre os rios Paranaíba e Grande, até o oeste do Estado de São Paulo, onde constitui o Planalto Ocidental Paulista. Os horizontes de basalto estão bem recobertos por sedimentos no Triângulo Mineiro, porém são expostos localmente ou ao longo dos grandes cursos formadores do Rio Paraná. No Triângulo, as regiões de Cerrado outrora expressivas, localizadas nos chapadões, foram substituídas por lavouras de soja e milho.

- 6) A Região do São Francisco – Compreende dois aspectos distintos: a área do alto São Francisco, que se estende até as serras da Canastra, Babilônia e Vertentes, e a depressão propriamente, longa e estreita. O Rio São Francisco no seu alto curso atravessa regiões relativamente planas e baixas, com 500 m de altitude média, ligeiramente inclinadas para o norte e formadas por arenitos, ardósias e calcários. Ao lado dessas formações Paleozóicas está o Espinhaço, constituído pelas formações Proterozóica. Uma das características fundamentais da hidrografia da área é o fato de os rios serem, na sua maioria, perenes. Apesar da irregularidade das chuvas, o arenito funciona como reservatório, compensando assim a irregularidade do clima. Nas encostas do norte do Espírito Santo e Minas Gerais de relevos mais suaves, os rios têm suas nascentes interiorizadas nas terras elevadas, constituídas por rochas Proterozóicas, como o Rio Doce e o Rio Jequitinhonha (Moreira, 1977).

3.2.2 Clima

A Região Sudeste de Minas enquadra-se, quase totalmente, na zona tropical quente e úmida, submetida a forte radiação solar. Sua topografia acidentada favorece a concentração das precipitações nas áreas mais expostas à incidência constante de alíseos de E e SE que penetram do litoral para o interior. Esses fatores, e mais a intervenção das frentes polares, explicam a grande diversidade de clima no estado, onde o regime térmico, aliado à intensidade de chuvas e à variação da umidade, origina a existência de quatro domínios climáticos nítidos: o quente; o sub-quente; o mesotérmico brando e o mesotérmico médio (Nimer, 1977).

Para a melhor compreensão dos processos climáticos dessa região, torna-se necessário um prévio conhecimento de seus diversos fatores, alguns de ordem estática e outros de natureza dinâmica. Todos atuam, simultaneamente, em constante interação.

Os fatores estáticos estão relacionados primeiramente a dois fatos que devem ser destacados: a posição latitudinal e a posição na borda ocidental do Oceano Atlântico. Isso explica, porque a região é submetida a forte radiação solar, uma vez que a intensidade desse fenômeno depende essencialmente da altura do sol sobre o horizonte, ou seja, do ângulo de incidência dos raios solares. Sendo tanto mais intensa quanto menor o ângulo de incidência. Outro fator estático relevante é que a topografia de Minas Gerais é bem acidentada. Com alturas médias variando entre 500 e 1200 m, entre estas aparecem vales amplos e muitos rebaixados como o São Francisco, Jequitinhonha e Doce (Nimer, 1979).

O conhecimento das influências dos fatores estáticos ou geográficos que atuam sobre o clima de determinada região, por mais completo que seja, não é suficiente para a compreensão de seu clima. Este não pode ser compreendido e analisado sem o estudo do mecanismo atmosférico, objeto de pesquisa da Meteorologia Sinótica.

3.3 Zoneamento Morfoclimático e Processos Morfogenéticos Atuantes no Modelado

Em Minas Gerais desenvolvem-se modelados de aspectos variados em função da diversidade dos relevos e condições climáticas tropicais. Estes vão desde as mais características, marcadas pela alternância de uma estação seca e de uma estação chuvosa, às condições transicionais, que podem compreender contrastes pouco marcados entre os dois aspectos de um período úmido e um período seco e, ainda, estação seca prolongada e acentuada.

As variações de umidade surgem na região como elemento importante na diversificação das grandes paisagens vegetais. Este aspecto pode estar relacionado no intervalo que vai das florestas higrófilas às caatingas. As temperaturas adquirem importância no aparecimento de aspectos subtropicais, como por exemplo, a presença da araucária em florestas subtropicais e em campos de altitude.

Recobrando os maciços cristalinos, em suas escarpas desenvolvem-se um modelado de região tropical de florestas, com características de um extenso domínio morfoclimático. Para o interior, seus limites são interrompidos pela passagem do domínio cristalino para a Depressão Paleozóica. Passa-se das formações florestais para os campos limpos e campos cerrados adaptados às topografias aplainadas, às estruturas geológicas permeáveis e repartição de chuvas ditadas por um ritmo tropical de um período seco de inverno e chuvas de verão.

Em áreas localizadas ao norte do Estado, nas depressões abrigadas do Rio Jequitinhonha, do Rio Verde e do Rio São Francisco, surgem as Florestas Semidecíduas e Decíduas (Caatingas), nas quais os processos de desagregação mecânica e escoamento superficial ganham ênfase.

3.3.1 Modelado dos Campos Cerrados

As formas onduladas e colinosas dos modelados das rochas cristalinas sob florestas cedem lugar, no interior, às extensas superfícies regulares ou apenas suavemente

onduladas. Estas são recobertas pelos campos cerrados e campos limpos, que se desenvolvem nos quartzitos do Espinhaço, e nos sedimentos das bacias dos rios das Velhas e São Francisco e Depressão Periférica (Nimer, 1979).

Enquanto o domínio do Cerrado, localizado na porção centro-ocidental, ocupa cerca de 57% da extensão territorial do Estado, o domínio da Mata Atlântica, localizado na porção oriental, perfaz mais de 41% da área do Estado. O domínio da Caatinga, restrito ao norte do Estado, ocupa menos de 2% do território mineiro. A paisagem caracteriza-se por Cerrado de sul a oeste, por região de Campos Rupestres ao centro e por Mata Atlântica a leste, exibindo, no entanto, fases de transição de difícil caracterização, ou de manchas inclusas em outras formas de vegetação. As comunidades hidromórficas, como as veredas e os campos de várzeas, aparecem em menor escala, incluídos nos biomas anteriormente citados (Fundação Biodiversitas, 2004).

Ao longo do processo de ocupação de Minas Gerais, amplas áreas de vegetação do Cerrado foram substituídas por culturas agrícolas e florestais ou transformadas para a implantação de atividades agropecuárias. A construção de Brasília estimulou a instalação de uma extensa malha viária ao longo de regiões ocupadas por esse tipo de vegetação. O potencial de reservas de minério de ferro foi outro aspecto que fez com que a vegetação nativa fosse explorada como fonte de matéria-prima para carvoarias que abastecem o parque siderúrgico mineiro, em contínua expansão.

Como consequência, as áreas de Cerrado ao sul da rodovia BR-040 (Rio-Brasília) ficaram restritas a remanescentes muito fragmentados e esparsos. A cobertura vegetal desse bioma reduziu-se de maneira drástica, sobrevivendo apenas no norte de Minas Gerais, particularmente nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha.

3.3.2 Os Processos Atuantes nos Campos de Altitude

Os Campos Rupestres aparecem como formações bem individualizadas, geralmente em altitudes superiores a 900m, de distribuição descontínua. Nos relevos de altitudes maiores do que 1.500m, nas altas superfícies modeladas em rochas arqueozóicas e proterozóicas, as florestas e os campos cerrados vão progressivamente diminuindo de

porte, até serem substituídos pelas bromeliáceas, musgos, líquens e gramíneas que, aos poucos, vão ganhando desenvolvimento sobre os solos rasos e úmidos. Como exemplo, podem ser citados o maciço do Itatiaia ou sobre solos profundos de decomposição de rochas cristalinas da Serra da Bocaina do alto Rio Grande e do alto maciço do Caparaó. Os climas extratropicais, com médias anuais compreendidas entre 18° e 20° C, período invernal de temperaturas inferiores a 15°C. Com dias em que as temperaturas mínimas atingem 0°C e também a ocorrência de geadas (RADAMBRASIL, 1983).

No Sul de Minas Gerais as rochas da série de Minas aparecem como formas residuais em altitudes que vão de 1.100 a 1.700 metros, nas serras de Aiuroca, Ibitipoca, Turvo, São Tomé. Nelas, as vertentes mais abrigadas da umidade procedente de leste / sudeste são recobertas por uma formação vegetal de pequeno porte, em geral arbustos onde aparecem elementos que entram na composição florística dos campos. A rocha aflora com frequência nas vertentes mais escarpadas, que, quando fraturadas, são atacadas pela decomposição química que passa a atuar ao longo das linhas de fragilidade através da vegetação pioneira nelas colonizada.

Nas altas superfícies da Região Central de Minas Gerais, os modelados de campos são encontrados, quase sempre, associados aos quartzitos, enquanto que o aparecimento de formações como os gnaisses, granitos e xistos argilosos permitem o desenvolvimento de formações florestais (RADAMBRASIL, 1983).

3.3.3 Os Modelados das Florestas Semidecíduas e Caatingas

As comunidades arbóreas das encostas voltadas para o sul e sudeste do Estado tornam-se decíduas, com características cada vez mais marcadas, à medida que se interiorizam, atingindo o Rio Doce e, mais ainda nos Vales do Araçuaí e Jequitinhonha, onde seu carácter é acentuadamente xerófilo, de Caatingas. Ocorrem também nas depressões abrigadas dos relevos da Serra Geral, no norte de Minas Gerais, nas áreas dos municípios de Porteirinha, Espinosa e Monte Azul.

Refletindo as condições climáticas de temperaturas mais elevadas, estação chuvosa de mais ou menos 1000 mm, concentrada em até 5 meses do ano, e uma estação seca

rigorosa, as Caatingas e Florestas Semidecíduas marcam no sudeste, as transições para os modelados semi-áridos situados mais ao norte da região, de características tipicamente nordestinas (Moreira e Camelier, 1977).

3.4 A Flora presente no Estado de Minas Gerais

As diferentes formas de relevo em Minas Gerais, somadas às especificidades de solo e clima, propiciaram paisagens muito variadas, recobertas por vegetações características, adaptadas a cada um dos inúmeros ambientes particulares inseridos no domínio de três biomas brasileiros: o Cerrado, a Mata Atlântica e a Caatinga. É possível, assim, entender a ocorrência de vegetações distintas em ambientes semelhantes do ponto de vista topográfico e climático, mas com características locais particulares (Martins, 2000). Na Figura 3.3 pode-se observar os principais biomas presentes no Estado de Minas Gerais.

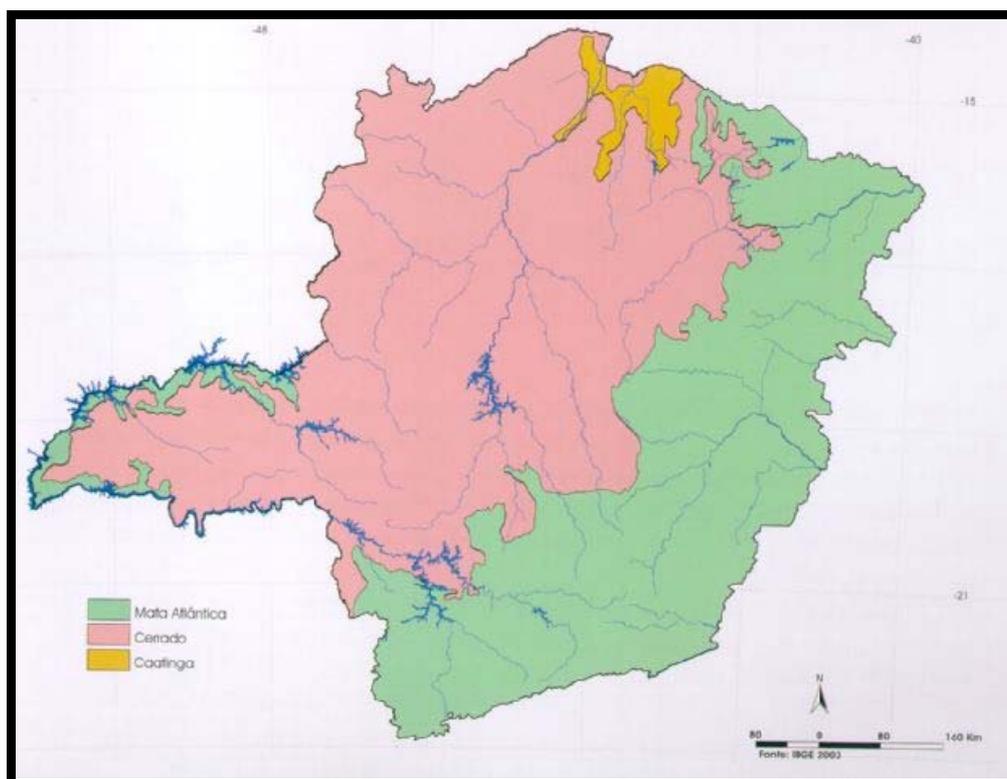
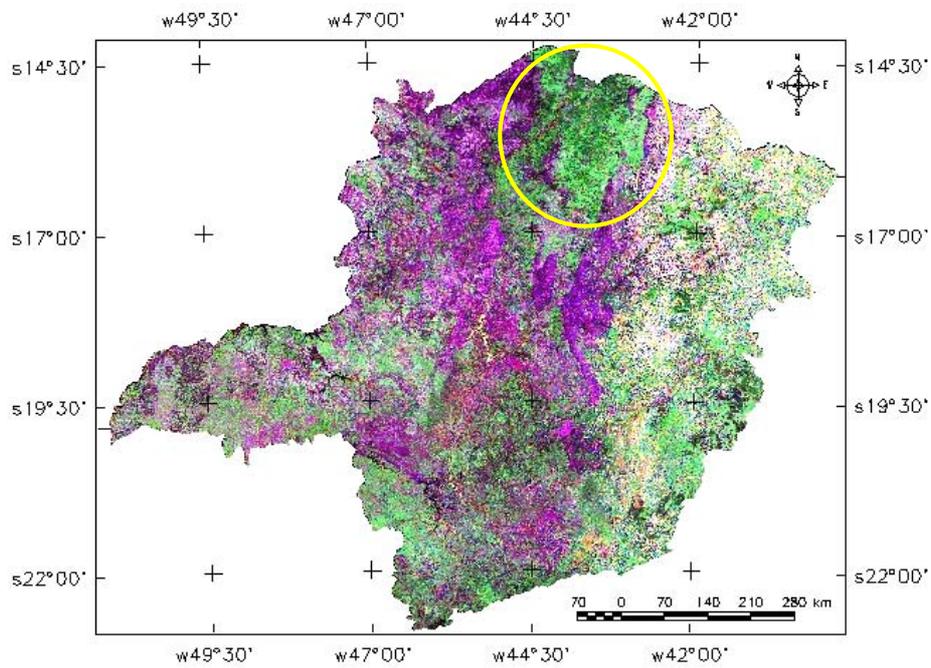


FIGURA 3.3 – Biomas presentes no Estado de Minas Gerais.
Fonte: Biodiversitas (2005).

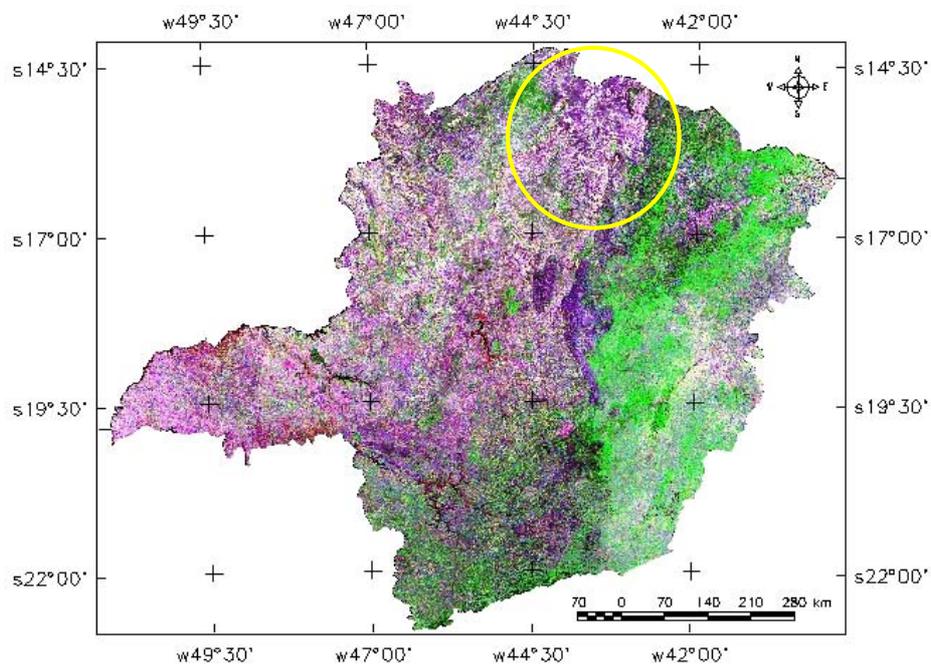
3.4.1 O Cerrado

O Cerrado caracteriza-se pela presença de invernos secos e verões chuvosos, um clima classificado como Aw de Köppen (tropical chuvoso). Possui média anual de precipitação da ordem de 1.500 mm, variando de 750 a 2.000mm. As chuvas são praticamente concentradas de outubro a março (estação chuvosa), e a temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C.

O mecanismo geral determina uma marcha estacional de precipitação semelhante em toda a região, criando assim uma tendência de uniformidade pluviométrica: há uma estação seca e outra chuvosa (Ribeiro e Walter, 1998). Na Figura 3.4 pode-se visualizar dois mosaicos MODIS referentes a área de estudo, onde percebe-se nítido contraste entre os biomas Caatinga e Cerrado, respectivamente, na estação seca e na chuvosa. Nesta Figura, a composição de mosaicos para os meses de março e setembro é apresentada nas Figuras 3.4a e 3.4b, respectivamente. Para facilitar o entedimento das feições do bioma Caatinga na porção norte da área de estudo, um círculo de cor amarela foi inserido.



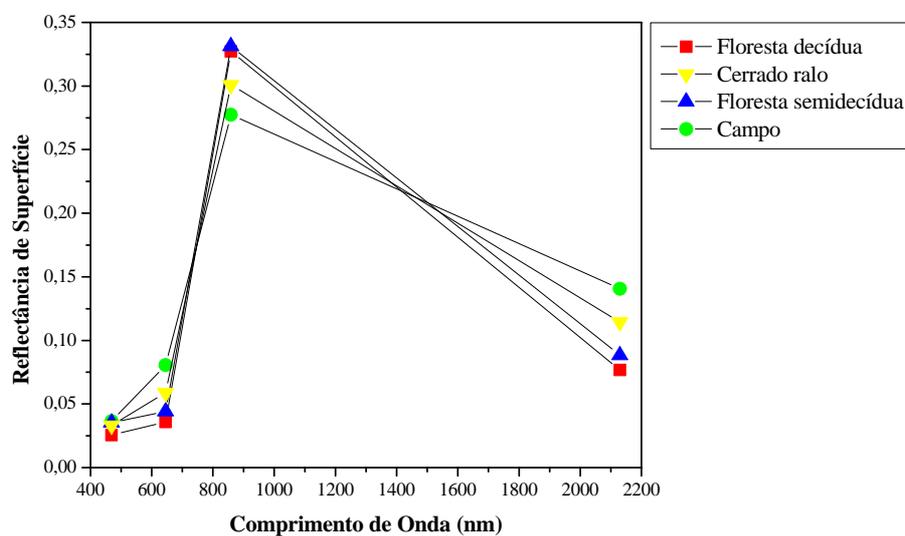
(a)



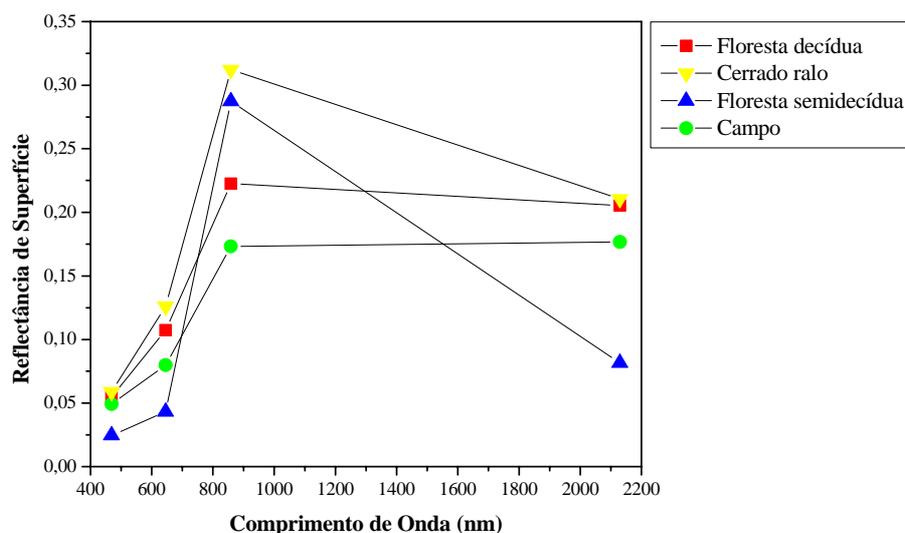
(b)

FIGURA 3.4 – Composição R(V), G(IVP), B(IVM) do mês de março (letra a) e do mês de Setembro (letra b). O bioma Caatinga é indicado por um círculo.

De forma complementar, os perfis espectrais representativos de quatro fitofisionomias são apresentadas nas Figuras 3.5a e 3.5b, respectivamente, e questões relativas ao seu comportamento sazonal serão discutidas mais adiante com mais propriedade.



(a)



(b)

FIGURA 3.5 – Perfis espectrais para quatro fitofisionomias nas letras a e b, respectivamente, correspondendo aos meses de março e setembro.

De acordo com os mosaicos apresentados nas Figuras 3.4a e 3.4b, observa-se uma dinâmica sazonal, que pode ser observada nos perfis espectrais das quatro fitofisionomias das Figuras 3.5a e 3.5b em função do comprimento de onda de quatro bandas espectrais, ou seja, azul e vermelho (absorção em função dos constituintes fotossintéticos, e.g. clorofila), infravermelho próximo (espalhamento devido a estrutura interna das folhas do dossel) e

infravermelho médio (absorção devido a umidade das folhas presentes no dossel). Conforme mencionado anteriormente, maiores detalhes destas questões sazonais serão abordadas mais adiante.

Localizado basicamente no Planalto Central do Brasil, o Cerrado, é o segundo maior bioma do país em área, apenas superado pela Floresta Amazônica em termos de área de abrangência. Trata-se de um complexo vegetacional que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas da América tropical, África e Austrália (Rizzini, 1997).

A vegetação do bioma Cerrado apresenta fisionomias que englobam formações florestais, savânicas e campestres. Em sentido fisionômico, *floresta* representa áreas com predominância de espécies arbóreas, onde há formação de dossel, contínuo ou descontínuo. O termo *savana* refere-se a áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato gramíneo, sem a formação de um dossel contínuo. Já o termo *campo* designa áreas com domínio de espécies herbáceas e algumas arbustivas, faltando árvores na paisagem. Em termos espaciais as savanas tropicais estão em uma zona de transição entre as zonas de floresta úmida e o deserto. Tem sua estrutura fisionômica condicionada pelo gradiente climático, com aumento da densidade de árvores à medida que os índices pluviométricos aumentam (Bourlière e Hadley., 1970) citado por Santos (1988).

Utilizando como referência o trabalho desenvolvido pela UFLA (Scolforo e Carvalho, 2006), o Manual Técnico da Vegetação do IBGE (1992) e o Projeto RADAMBRASIL (1983), as fitofisionomias consideradas para o Estado de Minas Gerais podem ser subdivididas nas seguintes categorias:

- Cerrado Denso: Formação com uma fitosionomia típica e característica, restrita das áreas areníticas lixiviadas com solos profundos, ocorrendo em clima tropical eminentemente estacional. Apresenta um dossel predominantemente contínuo e cobertura arbórea que pode oscilar de 50 a 90%. A altura média do estrato arbóreo varia de 8 a 15 metros, proporcionando condições de luminosidade que favorecem a formação de estratos arbustivo e herbáceo diferenciados. Na Figura 3.6 observa-se a foto de um fragmento da fitofisionomia em discussão.



FIGURA 3.6 – Representação ilustrativa da estrutura de uma área contendo Cerrado Denso.

- Cerrado Típico: De formação natural que se caracteriza por apresentar uma fisionomia nanofanerofítica rala e outra hemcriptofítica graminóide, contínua sujeita ao fogo anual. Caracteriza-se pela presença de árvores baixas, inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas. Na época chuvosa os estratos subarbustivo e herbáceo tornam-se exuberantes devido ao seu rápido crescimento. A foto de um fragmento do Cerrado Típico encontra-se ilustrado na Figura 3.7.



FIGURA 3.7 – Área representativa à fitofisionomia Cerrado Típico.

- Cerrado Ralo: Constituído por um estrato campestre (graminóide), natural ou antropizada. Quando natural, tem posição geográfica delimitada pelas áreas encharcadas das depressões, onde o tapete graminóide está sob cobertura arbórea esparsa constituída por uma ou poucas espécies. Na Figura 3.8 encontra-se a fotografia de uma área contendo como forma predominante a fitofisionomia Cerrado Ralo.



FIGURA 3.8 – Área predominante da fitofisionomia Cerrado Ralo.

- Campo: Formação campestre entremeada de plantas lenhosas de pequeno porte, mas sem cobertura arbórea a não ser em áreas de mata de galeria (mata ciliar). Na Figura 3.9, abaixo se encontra ilustrado a fitofisionomia Campo.



FIGURA 3.9 – Área representativa da fitofisionomia Campo.

- Campos Rupestres: É constituído por um típico fitofisionômico predominantemente arbustivo, com a presença eventual de arvoretas. Abrange um complexo de vegetação que agrupa paisagens em microrelevo com espécies típicas, ocupando trechos de afloramentos rochosos. A sua distribuição natural está associada a serras e a altitudes superiores a 900m e a determinadas formações geológicas, em particular a solos litólicos ou a frestas de afloramentos. O seu hábitat sofre real carência de água durante vários meses, já que época seca não há reservas edáficas mobilizáveis. As partes aéreas dos arbustos dessecam-se maciçamente durante a estação seca, resurgindo as bases lenhosas e perenes comumente subterrâneas, ao voltarem as chuvas. A Figura 3.10 ilustra uma área contendo Campos Rupestres.

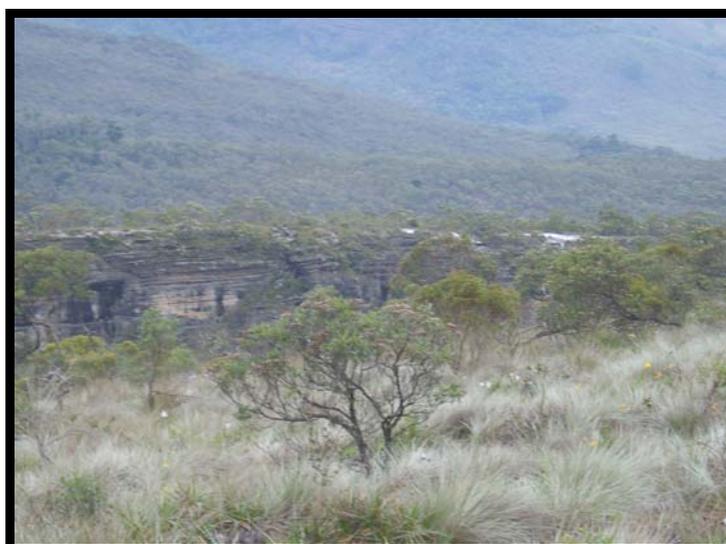


FIGURA 3.10 – Área representativa da fitofisionomia Campos Rupestres.

Para facilitar o entedimento da distribuição espacial das fitofisionomias abordadas, a Figura 3.11 mostra o perfil esquemático das diferentes fisionomias do bioma Cerrado.

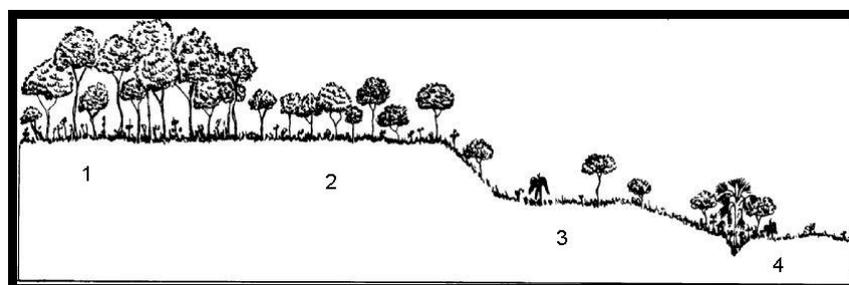


FIGURA 3.11 – Perfil de fitofisionomias do bioma Cerrado. 1- Cerrado Denso 2- Cerrado Típico 3- Cerrado Ralo 4- Campos.
Fonte: RADAMBRASIL (1984).

3.4.2 Floresta Estacional Semidecídua

Entende-se por Floresta Estacional Semidecídua uma formação florestal presa ao clima de duas estações, ou seja, uma chuvosa e outra seca, ou com acentuada variação térmica, e com estacionalidade foliar dos elementos arbóreos dominantes, os quais têm adaptação à deficiência hídrica ou à queda de temperatura nos meses mais frios. É constituída por fanerófitos com gemas foliares protegidas da seca por escamas (catáfilos ou pêlos), tendo folhas adultas esclerófilas ou membranáceas decíduais. A percentagem das árvores caducifólias no conjunto florestal deve situar-se entre 20 e 50% (RADAMBRASIL, 1982).

As Florestas Estacionais Semidecíduais (chamada agora em diante de Floresta Semidecídua) estão localizadas principalmente nas Regiões Sul / Sudeste do Estado de Minas Gerais e concentram-se em fragmentos dispersos ao longo de toda esta região (Carvalho, 2001). Na Figura 3.12, encontra-se uma fotografia ilustrando a fitofisionomia Floresta Semidecídua.

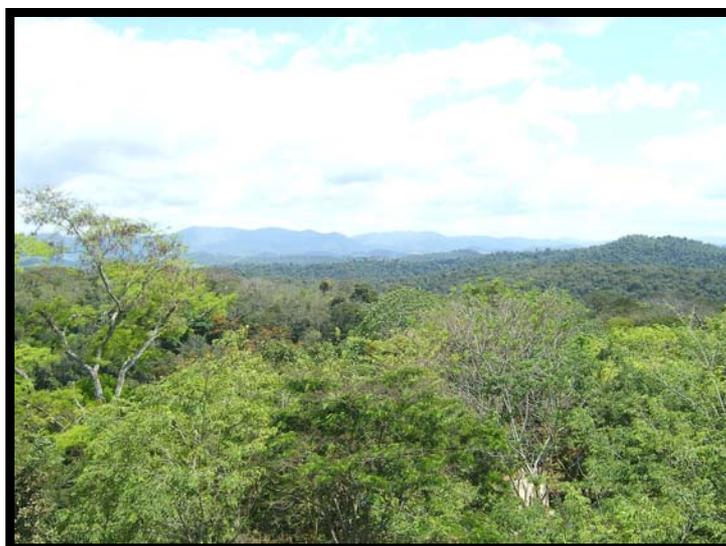


FIGURA 3.12 – Representação da distribuição espacial da Floresta Estacional Semidecídua.

3.4.3 Floresta Estacional Decídua

Este tipo de vegetação é caracterizado por duas estações climáticas bem demarcadas, uma chuvosa seguida de longo período biologicamente seco. Ocorre na forma de

disjunções florestais, apresentando o estrato dominante macro ou mesofanerofítico predominantemente caducifólio, com mais de 50% dos indivíduos despídos de folhagem no período desfavorável (RADAMBRASIL, 1982).

Assim, esta classe de formação é semelhante à anterior diferindo-se, apenas, em relação ao total de queda de folhas durante o período desfavorável. Este tipo fisionômico ocupa 2,89 % do total da área de estudo (AMDA, 2005). A Floresta Estacional Decidual (Floresta Decídua) é um tipo de formação vegetal com características bem definidas: árvores baixas e arbustos que, em geral, perdem as folhas na estação das secas (espécies caducifólias), além de muitas cactáceas.

Trata-se de um complexo vegetacional que reveste aproximadamente 844.000 Km², considerando as áreas marginais presentes nos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo, pode-se admitir uma área provável de 1 milhão de km² (ISA, 2005). Na Figura 3.13 abaixo se encontra área representativa do bioma Floresta Estacional Decidual.



FIGURA 3.13 – Área representativa de Floresta Decídua.

Rizzini (1997) afirma que as Florestas Estacionais Deciduais apresentam três estratos: arbóreo (8 a 12 metros), arbustivo (2 a 5 metros) e o herbáceo (abaixo de 2 metros). Contraditoriamente, a flora dos sertões é constituída por espécies com longa história de adaptação ao calor e à seca, é incapaz de reestruturar-se naturalmente se máquinas

forem usadas para alterar o solo. A degradação é, portanto, quase irreversível neste bioma.

Apesar da aparência pobre e árida, a Caatinga se revela como um ecossistema complexo, apresentando em alguns trechos uma mata rala ou mais arbustiva, e em outros trechos o solo aparece quase descoberto, possuindo arbustos isolados (Rizzini, 1997).

O aspecto geral da vegetação, na seca, é de uma mata espinhosa e agreste. Algumas poucas espécies da caatinga não perdem as folhas na época da seca. Ao caírem as primeiras chuvas no fim do ano, a caatinga perde seu aspecto rude e torna-se rapidamente verde e florida. Além de cactáceas, como *Cereus* (mandacaru e facheiro) e *Pilocereu* (xiquexique), a Caatinga também apresenta muitas leguminosas (mimosa, acácia, emburana, etc.)

3.4.4 Floresta Ombrófila (Mata Atlântica)

A expressão “Mata Atlântica”, semelhantemente à Floresta Amazônica, designa um complexo vegetacional que, embora dominado pela floresta pluvial montana, engloba vários tipos díspares. Na área de mapeamento, os ambientes de Floresta Ombrófila Densa apresentam chuvas bem distribuídas com médias anuais em torno de 1.500 mm, havendo estações sem seca ou mesmo com grande disponibilidade de umidade. Enquanto a floresta hileiana é de planície, a atlântica é de altitude. Esta se localiza sobre imensa cadeia montanhosa litorânea, que corre, ao longo do Oceano Atlântico. Sua área principal ou central reside nas grandes serras do mar e da Mantiqueira, e abarca os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia. Nas serras ela ascende até 1.500-1.700 m, na sua forma típica (Rizzini, 1997).

O principal motivo para a gravidade do quadro atual da Mata Atlântica é o desmatamento e o processo de fragmentação dos remanescentes florestais – e a conseqüente perda de habitat. O monitoramento realizado pela Fundação SOS Mata Atlântica, em parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Instituto Sócioambiental (ISA), mostrou que, entre 1990 e 1995, mais de 1 milhão de

hectares de florestas foram destruídos em nove Estados nas Regiões Sul, Sudeste e Centro – Oeste, que concentram aproximadamente 90% do que resta da Mata Atlântica no Brasil. Na Figura 3.14 pode-se visualizar área representativa do bioma Floresta Ombrófila no sul do Estado de Minas Gerais. A Mata Atlântica mineira hoje se encontra reduzida a poucos fragmentos, localizados principalmente na porção leste do Estado de Minas Gerais, tendo como principal reserva o Parque Estadual do Rio Doce (AMDA, 2005).



FIGURA 3.14 – Sobrevôo de uma área representativa do bioma Floresta Ombrófila.

De forma complementar, também foram considerados na análise dos resultados e para fins de mapeamento, além das fitofisionomias mencionadas anteriormente, as classes de reflorestamento, que se desmembram em plantios comerciais de duas espécies, o *Pinus* spp. (Pinus) e o *Eucalyptus* spp. (Eucalipto), predominantemente. Ambas as culturas representam relevante importância econômica para o Estado, em especial para as indústrias siderúrgicas, e as ligadas ao beneficiamento de madeira e produção de papel e celulose. Áreas compreendidas por rios, lagos e reservatórios também foram considerados para uma classe específica determinada como água. Por fim, áreas urbanizadas, compreendendo cidades de pequeno, médio e grande porte também foram consideradas em uma classe chamada áreas urbanizadas. Todas as demais áreas

compreendidas por atividades agrícolas, pecuária e solo exposto foram consideradas para uma classe intitulada outros.

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se descritos as metodologias e os materiais utilizados para a classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais. Esta pesquisa propõe o uso de imagens multitemporais do sensor MODIS para classificação e mapeamento das diferentes formações vegetais da área de estudo.

4.1 Classificação e Mapeamento da Cobertura Vegetal

O monitoramento da superfície terrestre em escala regional ou mesmo global é de suma relevância em diversas áreas de pesquisa, sendo algumas de suas aplicações: a observação de pontos de queimadas e desmatamento, monitoramento das safras agrícolas, controle e alerta de pontos de desastres naturais (granizo, geada e enchentes), observação de áreas de estiagem ou alagadas, dentre outras.

O acompanhamento das formações vegetais está incluído em diversos acordos internacionais, como por exemplo, o protocolo de Kioto (IGBP, 1998). Segundo os autores Rosenqvist et al. (1999 e 2003) citados por Liesenberg (2005a), este protocolo traz ao sensoriamento remoto uma série de oportunidades de atuação no intuito de fiscalizar os países no cumprimento de vários artigos propostos no acordo, o qual prevê: a estimativa do estoque de carbono resultante das atividades antrópicas nas mudanças dos padrões de uso do solo e das atividades florestais (Artigo 3). O monitoramento dos sumidouros de carbono, resultantes das diferentes ações que podem ser feitas com a cobertura vegetal, ou seja, florestamento / reflorestamento e desflorestamento (Artigos 6 e 17). Observações sistemáticas e o desenvolvimento de arquivos de dados para reduzir as incertezas relatadas para o sistema climático também são necessários (Artigo 10).

As implicações legais e econômicas de como contabilizar reservas de carbono em confiança e acurácia, com as quais, informações de uso da terra são providas, clamam por trabalhos dentro de um contexto operacional, que podem ser providos por dados temporais da superfície terrestre fornecidos por sensores remotos em nível orbital.

As imagens de satélites proporcionam uma visão sinóptica e multitemporal de extensas áreas da superfície terrestre. Registram os ambientes e suas transformações, destacam os impactos causados por fenômenos naturais e pela ação do homem por meio do seu uso e ocupação do espaço. Os ambientes construídos ou transformados pela ação do homem ocupam a maior parte dos continentes. O aspecto multitemporal dessas imagens permite acompanhar as transformações do espaço ao longo do tempo (Florenzano, 2002).

Mapas globais e regionais da cobertura da terra são necessários para auxiliar as pesquisas em sistemas terrestres, como modelagem de ecossistemas, monitoramento de queimadas, entre outros. Para atender a crescente necessidade de espacializar as comunidades vegetais, para sua posterior utilização em modelos climáticos e em entendimento dos impactos antrópicos e / ou naturais no globo terrestre sobre seu comportamento dinâmico, dados de sensoriamento remoto orbital têm sido usados.

A utilização de sensores com melhores resoluções temporais, espaciais, espectrais e radiométricas, podem melhorar a precisão destes mapeamentos, aumentando a confiança de classificação das diversas formações vegetais. Com respeito ao mapeamento das formações vegetais globais algumas iniciativas podem ser enumeradas. DeFries e Townshend (1994) criaram um mapa com resolução de um por um grau e, mais recentemente um mapa com células de 8 km, usando dados do AVHRR (DeFries, 2002). Hansen et al. (2000) produziram um novo mapa com resolução espacial de 1 km, a partir dos dados AVHRR, por meio do uso de classificadores por árvores de decisão. Estratégias similares foram propostas por Friedl et al. (2000ab) para geração de mapas globais, usando para tanto dados do sensor MODIS.

Desde o início dos anos 80, dados de sensores com menor resolução espacial são utilizados para o monitoramento global, como por exemplo, a série de satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Inicialmente, o objetivo principal

dos satélites NOAA era a previsão das condições do tempo e outros propósitos meteorológicos. Após a implementação de uma nova geração de satélites dotados dos sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) ocorreu uma grande motivação aos estudos da dinâmica do clima global e mapeamentos da superfície oceânica e da vegetação terrestre, principalmente devido à possibilidade de gerar as imagens índice de vegetação (Jensen, 2000).

A utilização do sensor AVHRR apresentava diversas vantagens sobre outros dados de sensoriamento remoto para o monitoramento ecológico e biofísico de grandes áreas, dentre elas a maior frequência de cobertura e economia. Para algumas aplicações o dado era utilizado sozinho, mas para outros (ex: estimativa de áreas e caracterização biofísica), eles eram utilizados em conjunto com outras informações, tais como satélites de resolução espacial maior, dados meteorológicos e de campo (Parkinson e Greenstone, 2000). Com isso, pesquisas fundamentadas no uso de dados de sensores com essas características foram crescendo em diversas áreas de sensoriamento remoto.

As características do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) são originárias de diversos outros sensores. Sendo o MODIS uma continuidade da obtenção dos dados adquiridos durante muitos anos pelo sensor AVHRR a bordo dos satélites da série NOAA. Para o imageamento terrestre, o modelo do sensor MODIS combinou tanto características do sensor AVHRR, quanto do Landsat-TM (*Thematic Mapper*), em que foram adicionadas bandas espectrais no infravermelho médio, além de fornecer dados nas resoluções espaciais de 250m, 500m e 1km (Huete et al., 1997). A área de estudo desta pesquisa de mestrado, corresponde ao mosaico de quatro *tiles* MODIS, cuja abrangência espacial é mostrada na Figura 4.1.

Já para cobrir a mesma extensão territorial são necessárias 35 imagens TM do satélite Landsat. Como a resolução temporal é de 16 dias, contra duas vezes ao dia do sensor MODIS (considerando as plataformas Terra e Aqua), um maior período de imageamento para a área em questão é necessária. A diferença de imageamento entre diferentes órbitas-pontos adjacentes pode apresentar diferenças espectrais em função da sazonalidade, ângulo solar zenital, como também do próprio alvo pela dinâmica de uso

e ocupação dos solos. Para efeitos de comparação, a Figura 4.2 mostra as diferentes órbitas-pontos da série de sensores a bordo do satélite Landsat.

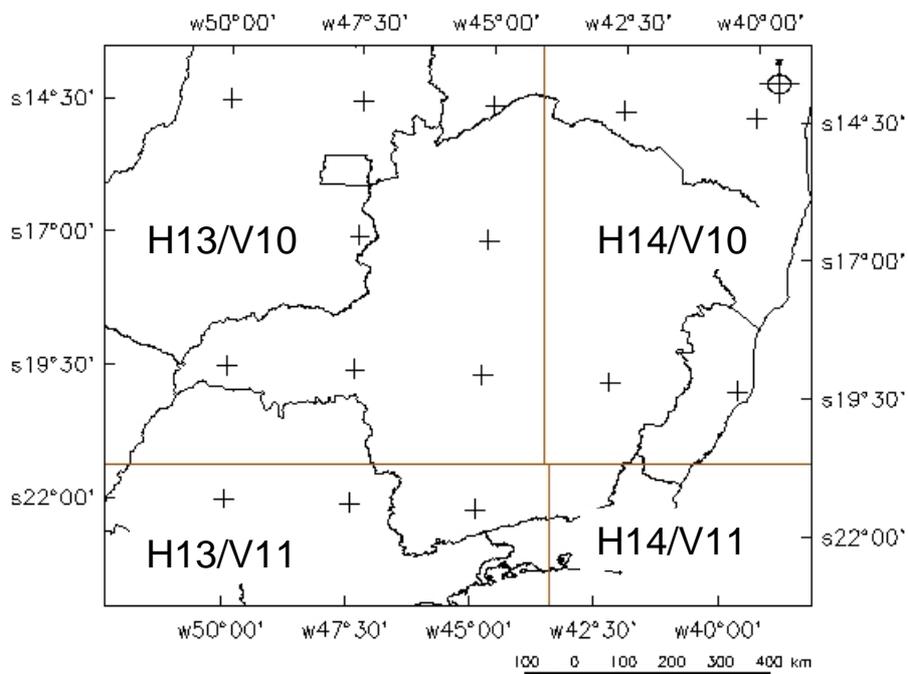


FIGURA 4.1 – Identificação dos quatro *tiles* do sensor MODIS que cobrem o Estado de Minas Gerais.

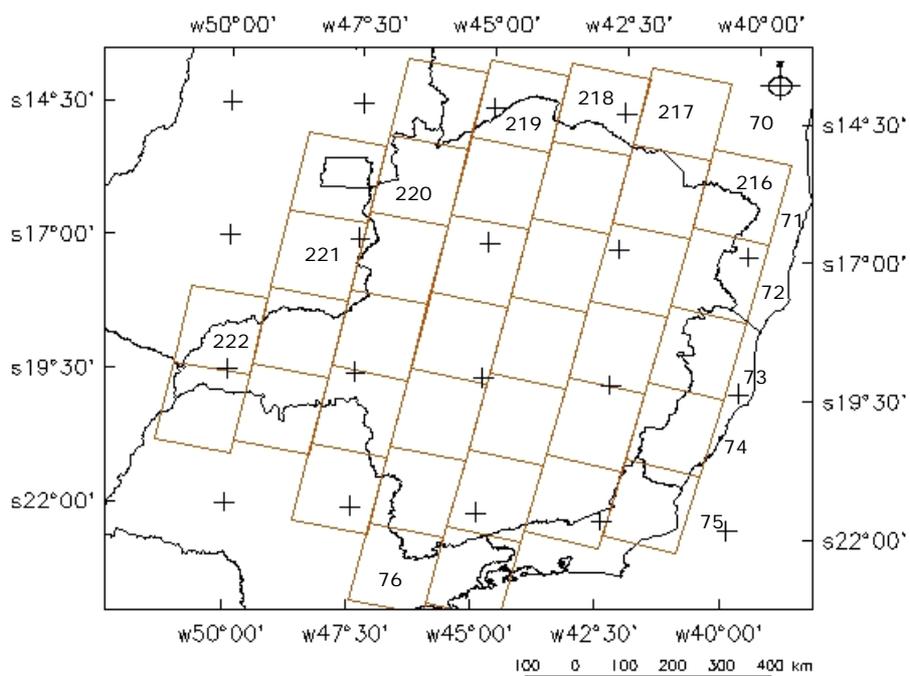


FIGURA 4.2 – Identificação das órbitas-pontos que cobrem o Estado de Minas Gerais.

Na Tabela 4.1, observam-se algumas características espectrais, espaciais e temporais dos sensores TM, AVHRR e MODIS, respectivamente. Como pode ser observado, apesar da resolução espacial do sensor TM ser superior aos dados gerados pelo sensor MODIS, o mesmo apresenta uma banda adicional na região do infravermelho próximo e ainda menores intervalos espectrais nas diferentes bandas espectrais. Em comparação com os dados do sensor AVHRR, o sensor MODIS possui quatro bandas espectrais adicionais e possui uma vantagem adicional da aquisição de dados em determinadas bandas espectrais nas resoluções espaciais de 250m, e 500m, respectivamente.

TABELA 4.1 – Características espectrais, espaciais e temporais dos sensores MODIS, TM e AVHRR.

BANDA /SENSOR	NOAA-AVHRR	LANDSAT-TM	MODIS
Azul	-	0,45-0,52 μm	0,459-0,479 μm
Verde	-	0,52-0,60 μm	0,545-0,565 μm
Vermelho	0,55-0,68 μm	0,63-0,69 μm	0,620-0,670 μm
Infravermelho próximo	0,73 -1,10 μm	0,76-0,90 μm	0,841-0,876 μm
Infravermelho médio	3,55-3,93 μm	1,55-1,75 μm	1,230-1,250 μm
Infravermelho médio	-	2,08-2,35 μm	1,628-1,652 μm
Infravermelho médio	-	-	2,105-2,155 μm
Tamanho de pixel (Nadir)	1 km	30 m	250 m / 500 m e
Resolução Temporal	diário	16 dias	1000 m diário

Fonte: Adaptada de Huete *et al.* (1997).

O fluxograma de atividades desenvolvido neste trabalho para a confecção do Mapa de Vegetação é mostrado na Figura 4.3. Nesta Figura, as diferentes etapas desenvolvidas são indicadas por numerações correspondentes às utilizadas neste documento. Em cada um dos tópicos, informações mais detalhadas a respeito de cada procedimento desenvolvido neste estudo podem ser encontradas.

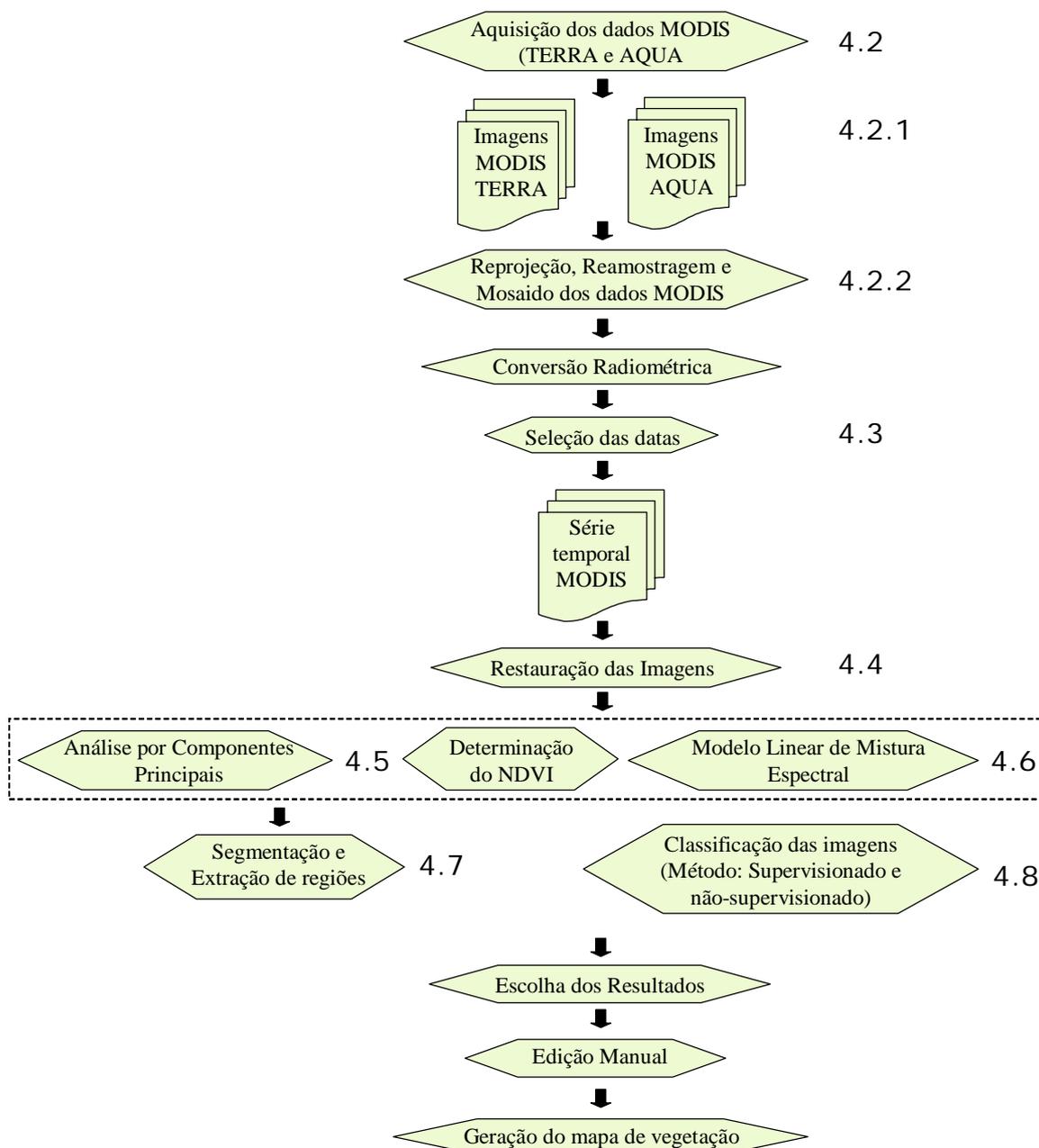


FIGURA 4.3 – Fluxograma de atividades desenvolvidas nesse estudo.

4.2 Pré – Processamento dos Dados MODIS

Os dados MODIS (imagens e produtos) necessitam passar por uma série de tratamentos antes de serem propriamente processados no Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING). As imagens MODIS podem ser adquiridas sem custo algum por meio do seguinte endereço na internet: <http://delenn.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/>. Os dados são obtidos no

formato HDF (“*Hierarchy Data Format*”) em um nível de quantização de 12 bits nas projeções *Integerized Sinusoidal* ou *Sinusoidal*. Devido ao fato do formato HDF não ser um formato usual em Sistemas de Informações Geográficas (SIG`s) foi desenvolvido um *software* específico para o pré-processamento das imagens.

Este programa, denominado MRT (*MODIS Reprojection Tool*), é gratuitamente obtido no seguinte endereço eletrônico <http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>. Pode ser utilizado para reprojeter os dados para projeções mais usuais, reamostrar os dados para outras resoluções espaciais, mosaicar, recortar e alterar o formato dos dados, como para Geotiff e binários.

Seguindo a metodologia implementada por Anderson (2004), neste trabalho de pesquisa, adotaram-se como parâmetros de saída no programa MRT a projeção geográfica e o *Datum* WGS-84 pois, segundo a autora, foram os que apresentaram melhores resultados, ou seja, maior coerência com dados vetoriais do IBGE. O aplicativo ConvGeotiff (Arai, 2005) foi desenvolvido pelo INPE, sua função é converter os dados MODIS que são originalmente disponíveis em 12 bits para 8 bits, visando a a importação para o *software* SPRING 4.2.

4.2.1 Confecção do Banco de Dados

A fase de organização dos dados referentes à pesquisa em que se basearam as operações de processamento de imagens e geoprocessamento na integração de dados ambientais é fundamental nos estudos integrados da paisagem. Os materiais da pesquisa foram organizados num banco de dados geográficos.

4.2.2 Montagem dos Mosaicos e das Imagens Fração

Após a aquisição das imagens multitemporais referentes ao ano de 2004, foram confeccionados os mosaicos quinzenais (16 dias), e posteriormente esses dois mosaicos foram utilizados para gerar um único mosaico mensal, por meio do uso da ferramenta de análise LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) disponibilizado no SPRING 4.2.

O programa foi escrito de forma a selecionar os *pixels*, com base no valor mais alto de NDVI. Segundo Moreira e Shimabukuro (2004) a chamada CMV (Composição do Máximo Valor) é obtida de uma série multitemporal de imagens georreferenciadas, para as quais o valor NDVI de um determinado *pixel* (x_i, y_i) é analisado, registrando-se o mais alto valor da série. O objetivo principal da técnica CMV é minimizar a influência na cena de fatores como: nebulosidade, variações do ângulo de iluminação solar e geometria da visada, assim como da atmosfera (vapor de água, aerossóis).

Segundo Tarpley et al. (1984), citado pelos mesmos autores acima, a técnica mencionada é a mais aceita para o processamento dos dados do visível e infravermelho próximo (bandas 1 e 2) do sensor AVHRR. A CMV teve como objetivo reduzir a quantidade de dados utilizados e também o tamanho do banco de dados visando agilizar o tempo de processamento, considerando que o tamanho de cada *tile* MODIS do produto MOD13 na resolução de 250 m é de 500Mb. Na Figura 4.4 abaixo, pode-se encontrar a divisão dos *tiles* MODIS para o globo terrestre.

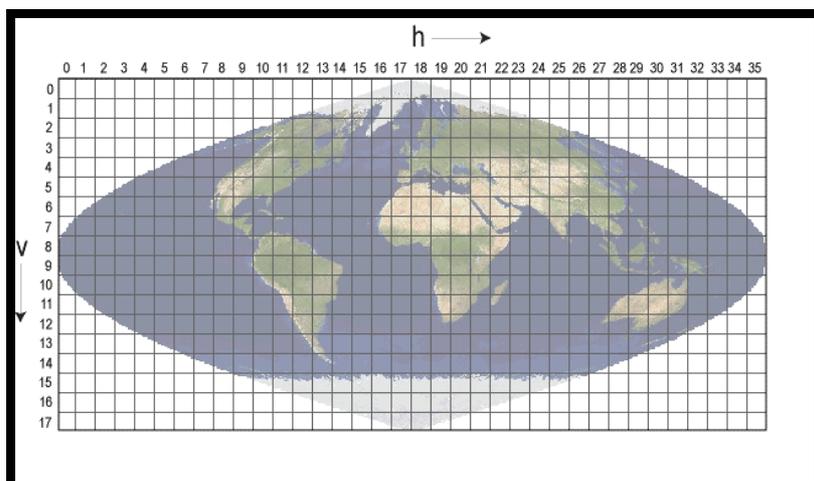


FIGURA 4.4 – Distribuição espacial dos tiles MODIS no globo terrestre.
Fonte: NASA, 2000.

Após a confecção dos mosaicos mensais para toda a série multitemporal foi aplicado o modelo linear de mistura espectral (MLME) para toda a série, nas bandas oriundas do produto MOD13: azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Seguindo a metodologia proposta por Anderson (2004), os modelos foram gerados de forma independente, partindo-se da hipótese de que é possível encontrar um *pixel* puro ou *endmember* nas imagens do sensor MODIS.

A etapa acima descrita (MLME) foi realizada tendo como objetivo primordial o de selecionar as curvas espectrais (*endmembers*) que melhor representassem cada um dos alvos selecionados (solo, vegetação, água ou sombra). Na Figura 4.5, encontra-se o gráfico correspondente a três *endmembers* (solo, sombra e vegetação) referentes à imagem MODIS de setembro a bordo da plataforma Aqua.

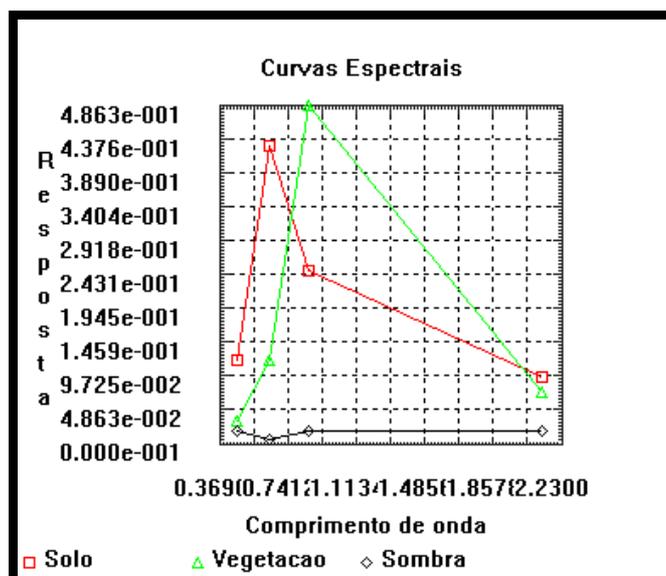


FIGURA 4.5 – *Endmembers* de três distintos alvos (solo, vegetação e sombra) selecionados em uma das datas.

4.3 Seleção de Imagens MODIS Multitemporais para Classificação

Dados multitemporais são uma importante fonte de informação para o mapeamento da vegetação usando imagens de sensoriamento remoto. Esta informação proporciona uma maior capacidade de distinguir as diversas fitofisionomias que se distribuem ao longo da paisagem (Carvalho, 2004).

Tendo como objetivo a seleção das datas das imagens multitemporais para a classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais, 23 mosaicos mensais de imagens NDVI (11 referentes à plataforma Aqua e 12 à plataforma Terra) foram utilizados. Desta forma, o mosaico 1 representa o mês de janeiro - Terra, o mosaico 2 janeiro - Aqua, o mosaico 3 fevereiro - Terra, o mosaico 4 fevereiro - Aqua e assim sucessivamente. O programa PCI Geomatics (ESA, 1994) foi usado para criar as

assinaturas para cada uma das classes de vegetação e selecionar canais da série multitemporal para posterior classificação automática.

A primeira etapa, a de obtenção das assinaturas para cada uma das classes de vegetação, consistiu em coletar no mapa digital de referência (IEF / UFLA MG) trinta amostras para cada uma das formações vegetais, por meio do uso de composições coloridas das imagens NDVI. O algoritmo envolvido no processo de gerar assinaturas espectrais envolve o uso de uma ou série de imagens. Cada assinatura de classe obtida consiste da média, desvio padrão, limiares de reflectância e probabilidades de classe *a priori* definidas. Quantidade de bandas, limiares e probabilidades são definidos pelo usuário. maiores detalhamentos sobre os procedimentos metodológicos serão vistos a seguir.

As classes amostradas nas imagens NDVI mensais foram:

1. Pinus
2. Eucalipto
3. Floresta Decidual
4. Floresta Semidecídua
5. Floresta Ombrófila
6. Campo Rupestre
7. Cerrado Denso
8. Cerrado Típico
9. Cerrado Ralo
10. Campo
11. Águas
12. Urbanização
13. Outros (áreas antropizadas)

As categorias acima citadas foram utilizadas levando em consideração as classes de vegetação do Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE,1992) e o mapa de referência da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais, produzido pelo Instituto Estadual de Florestal – IEF/MG e pela Universidade Federal de Lavras – UFLA/MG.

Na Figura 4.6 o mapa de vegetação nativa e reflorestamentos presentes no Estado de Minas Gerais é apresentado.

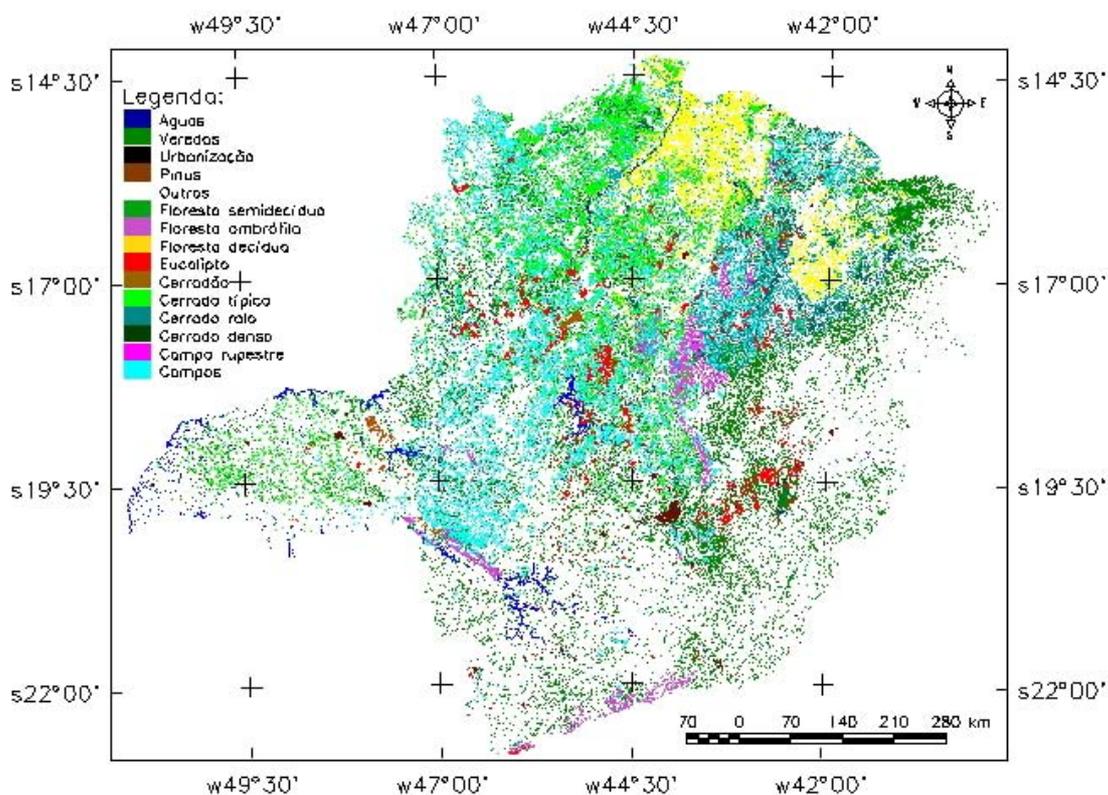


FIGURA 4.6 – Classificação do Estado de Minas Gerais, por Landsat.
Fonte: IEF – UFLA (2004).

Posteriormente, a partir das assinaturas geradas selecionaram-se os canais para classificação da cobertura vegetal. Para tanto, o módulo de seleção de canal (CNHSEL) foi usado. O algoritmo realiza a análise da matrizes de correlação, de covariância, de covariância inversa, e de covariância inversa triangular, média e desvio padrão para todos os canais inseridos no arquivo meta 23 (imagens mensais NDVI), correspondendo a 11 mosaicos Aqua e 12 mosaicos Terra.

O resultado final é disponibilizado conforme o número de canais que o usuário pretende utilizar no processo de classificação. A Tabela 4.2 apresenta o resultado obtido na seleção das imagens multitemporais do MOD13 do sensor MODIS em diferentes combinações de datas.

TABELA 4.2 – Seleção das melhores datas para realizar a classificação, segundo o número de imagens definidas a serem utilizadas, a partir dos dados NDVI. Em negrito destacam-se as datas selecionadas entre os dados.

Número de Imagens utilizadas	Mosaicos Selecionados
	NDVI
1	16
2	1 e 16
3	1, 5 e 16
4	1, 5, 15 e 16
5	1, 2, 5, 15 e 16
6	1, 2, 5, 13, 15 e 16
7	1, 2, 5, 12, 13, 15 e 16
8	1, 2, 5, 10, 12, 13, 15, 16
9	1-3, 5, 10, 12, 13, 15 e 16
10	1-3, 5, 10-13, 15 e 16
11	1-3, 5, 8, 10-13, 15 e 16
12	1-5, 8, 10-13, 15 e 16
13	1-5, 7, 8, 10-13, 15 e 16
14	1, 2-5, 7, 8, 10-16
15	1-8, 10-16
16	1-16
17	1-16 e 19
18	1-16, 19 e 21
19	1-16, 18, 19 e 21
20	1-16, 18-21
21	1-16, 18-22
22	1-22
23	1-23

A partir dos dados NDVI obtidos dos sensores MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua apresentados na Tabela 4.2, verificou-se que para uma única data, a melhor discriminação entre as fitofisionomias em análise ocorreu no mês de setembro para os dados do sensor MODIS a bordo da plataforma Terra (mosaico 16). Estes resultados mostram coerência com os estudos realizados por Ratana et al. (2005) que observaram uma maior discriminação espectral no final da estação seca.

Com a escolha de duas datas incluiu-se os dados MODIS do mês de janeiro a bordo da plataforma Terra. Neste período as fitofisionomias começam a mostrar efeitos sazonais.

Esse comportamento pode ser justificado pelo máximo contraste sazonal, já que em janeiro observa-se o máximo de precipitação acumulada. No entanto com a inclusão de uma terceira variável, (os dados de março da plataforma Terra), período em que os contrastes e diferenças sazonais começam a ficar mais evidentes, e com a inclusão de outras variáveis observa-se uma certa alternância entre dados da estação seca e chuvosa. Os dados do início da estação chuvosa, somente, foram incluídos com a definição de um número maior de variáveis.

A Tabela 4.2 apresenta as combinações de canais a serem utilizados na classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais. Por limitação computacional, em função da extensão territorial da área de estudo, e do grande volume de dados a serem processados e/ou analisados, optou-se pelo uso de seis datas para realização desta pesquisa.

Desta forma, as datas selecionados para classificação foram: 1 (jan/Terra), 2 (fev/Aqua), 5 (mar/Terra), 13 (ago/Aqua), 15 (set/Aqua) e 16 (set/Terra). É importante salientar que as imagens selecionadas serão utilizadas conjuntamente com seus respectivos índices de vegetação e imagens fração (sombra, vegetação e solo). A partir da etapa anteriormente descrita, todos os processamentos efetuados nas fases seguintes do trabalho foram realizadas em função do conjunto de dados selecionados para obtenção do mapa final de vegetação do Estado de Minas Gerais.

4.4 Restauração das Imagens e Reamostragem

Os dados do sensor MODIS, das respectivas datas mencionadas no tópico anterior, foram submetidos ao processo de restauração. Todos os dados de entrada foram dispostos em formato Geotiff com a resolução espacial de 250m e uma resolução radiométrica de 8bits.

O aplicativo Restau (Federov e Fonseca, 2002), desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI/INPE), foi utilizado para o processo de restauração. As bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) foram restauradas e reamostradas para um tamanho de *pixel* de 125m . As bandas 3 e 7 (azul e infra-vermelho médio,

respectivamente) foram inicialmente reamostradas na escala de 500 para 250m, e posteriormente submetidas ao processo de restauração. O método de reamostragem empregado foi o do vizinho mais próximo para preservar as características radiométricas das imagens (Schowengerdt, 1997). Após o processo de reamostragem as duas bandas foram restauradas em uma grade de amostragem de 125m.

Com o objetivo de verificar a viabilidade do uso do processo de restauração, várias áreas testes foram selecionadas. Procedimentos de segmentação e classificação, por exemplo, foram empregados nos conjuntos de dados originais (dados do sensor MODIS sem restauração) e nos dados restaurados. Análises estatísticas também foram usadas para se verificar a significância estatística deste procedimento em relação ao conjunto de dados originais. Alguns resultados serão apresentados posteriormente.

4.5 Análise por Componentes Principais

A análise dos dados do sensor MODIS utilizadas neste estudo também foi contemplada pela análise por componentes principais (APC). A APC é uma técnica usual no sensoriamento remoto e na análise de grandes conjuntos de espectros de reflectância (Galvão et al., 1995, 1997, 2001).

Um exemplo do uso de APC, incluindo as equações para a obtenção dos auto-valores e auto-vetores e dos escores pode ser encontrado em Matter (1999) e Schowengerdt (1997). No presente estudo, para cada data, aplicou-se a APC sobre as quatro bandas espectrais. Uma matriz de correlação, derivada a partir dos valores de reflectância das quatro bandas forneceu a base para o cálculo dos auto-valores e auto-vetores e para a subsequente determinação dos escores. Analisando os auto-vetores e os escores das componentes principais, a contribuição de cada banda para explicar a variabilidade do conjunto de dados pôde ser analisada e a similaridade entre as fitofisionomias em cada data pôde ser inspecionada, respectivamente.

No presente estudo sobre as imagens resultantes da Análise por Componentes Principais foram efetuados outros processamentos tais como segmentações, classificações supervisionadas e não supervisionadas, que serão explicitados nos próximos tópicos.

4.6 Modelo Linear de Mistura Espectral

Para cada conjunto mensal de dados (bandas vermelho, infravermelho próximo, azul e infravermelho médio), foi aplicado o modelo linear de mistura espectral (MLME). Para cada data, utilizou-se os *endmembers* solo, sombra e vegetação.

Para cada um dos alvos especificados nas imagens fração buscou-se na imagem *pixels* puros (*endmembers*) representativos de cada um dos alvos em questão. A seleção dos membros foi feita a partir de uma inspeção visual, na qual escolheu-se um *pixel* para cada membro (sombra, solo e vegetação). Todos os processamentos foram realizados no aplicativo SPRING 4.2 (Câmara et al, 1996).

Para demonstrar a eficácia desta técnica na discriminação de alvos, as Figuras 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, as frações sombra e solo para a discriminação de dois alvos de interesse. Como exemplo, a classe Água (discriminada na Figura 4.7) e a fitofisionomia Campos (discriminada na Figura 4.8).

Na Figura 4.7 a fração sombra foi de fundamental importância para a discriminação da classe Água. Nesta Figura, a represa imageada é o lago de Furnas, localizado na porção sudeste da área de estudo. As setas na cor amarela, indicam aproximadamente a delimitação pronunciada da classe Água com o restante da imagem, já que maiores proporções de sombra foram observadas. A escolha da imagem para a extração desta fração foi de agosto (Terra) em função do menor nível dos reservatórios, como também a redução de outros componentes opticamente ativos (solo em suspensão, por exemplo) no final da estação seca em comparação com outras datas adquiridas durante a estação chuvosa.

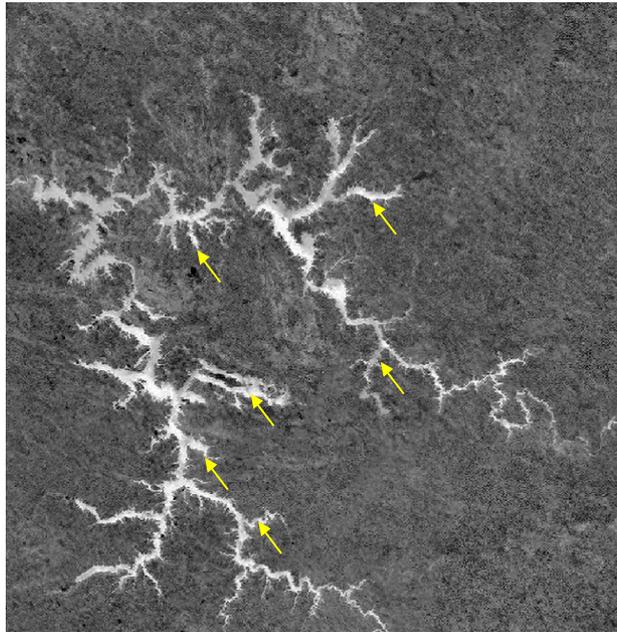


FIGURA 4.7 – Imagem fração sombra referente ao mês de agosto plataforma Aqua em uma área correspondente à parte da região sul da área de estudo.

Por outro lado, a Figura 4.8 mostra a fração solo obtida para o mês de agosto. Nesta Figura, pode-se perceber a delimitação das regiões onde a fitofisionomia Campos predominam e corroboram com as observações de Ferreira (2003). As feições características, e as áreas mais representativas desta fitofisionomia estão indicadas por setas da cor amarela. Neste caso específico, escolheu-se a data em função da melhor delimitação desta fitofisionomia em comparação com as demais datas remanescentes. A maior separabilidade entretanto, deve-se provavelmente ao menor verdor das demais fitofisionomias e de uma maior contribuição dos mineirais do solo como também da maior proporção de gramíneas secas sobre o solo.

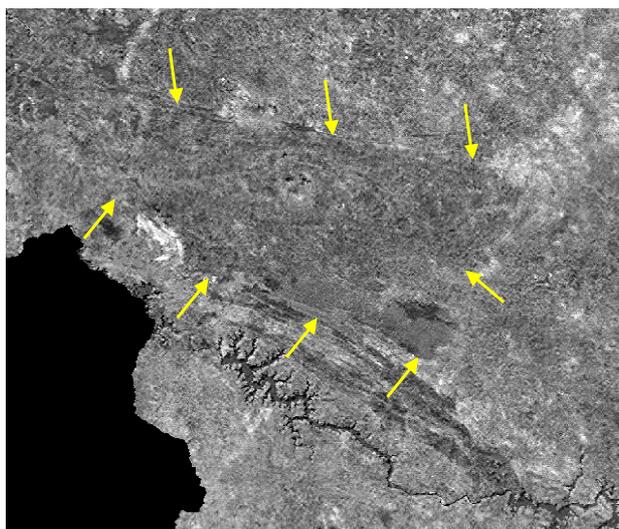


FIGURA 4.8 – Imagem fração solo referente ao mês de agosto plataforma Aqua correspondente à parte da região sudoeste da área de estudo.

4.7 Segmentação das Imagens

As imagens originadas da aplicação da técnica de Análise por Componentes Principais referentes aos meses de março, agosto e setembro pertencentes à plataforma Terra e as imagens NDVI dos meses de agosto e setembro, respectivamente, foram igualmente utilizadas no processo de segmentação. Da mesma forma, a imagem fração sombra do mês de setembro (plataforma /Terra), e a imagem fração solo, do mês de agosto (plataforma/ Aqua) também foram utilizadas nesta etapa do trabalho.

No processo de segmentação foram testados diferentes limiares de similaridade e área. No entanto, em função da análise visual dos resultados, bem como da limitação computacional, foram utilizados os valores 8-10, 8-15, 12-15, 12-15, 12-20 e 12-25. Para exemplificar o desempenho dos segmentadores, foram selecionados os dados NDVI representados nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente. Estas Figuras mostram a aplicação de dois diferentes limiares, aplicados na porção norte (Figura 4.9) e sudoeste do Estado (Figura 4.10), com limiares de similaridade e área, 8-10 e 8-15, respectivamente. Em ambas as Figuras, percebe-se a delimitação das áreas compreendidas pelas fitofisnomias Mata Estacional Semidecidual e Cerrado Típico para o caso particular do norte do Estado. Na Figura 4.9 pode-se observar a delimitação

das áreas compreendidas pela classe outros e a Floresta Estacional Semidecidual para o caso particular do sudeste do Estado.

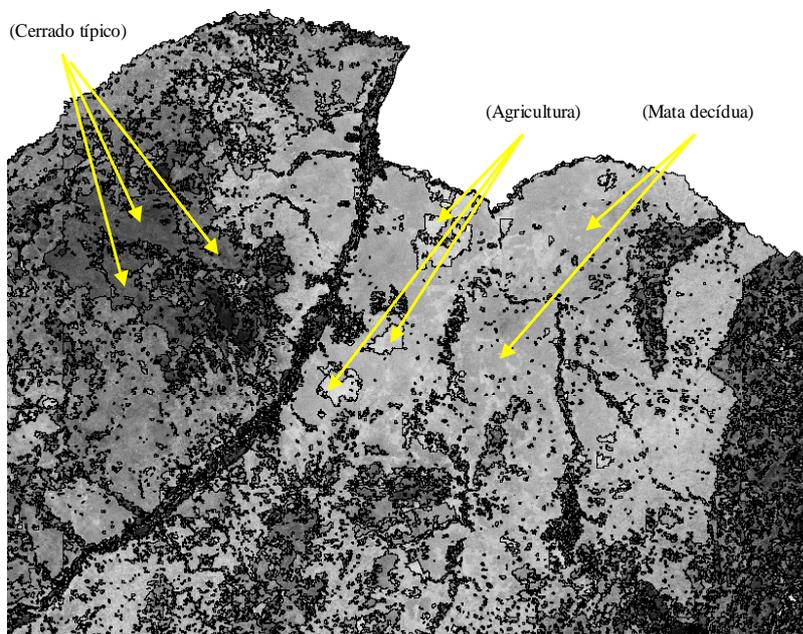


FIGURA 4.9 – Ilustração do proceso de segmentação na região norte do Estado de Minas Gerais a partir da imagem de setembro a bordo da plataforma Terra a partir do produto NDVI (Limar 8 e Área 10).

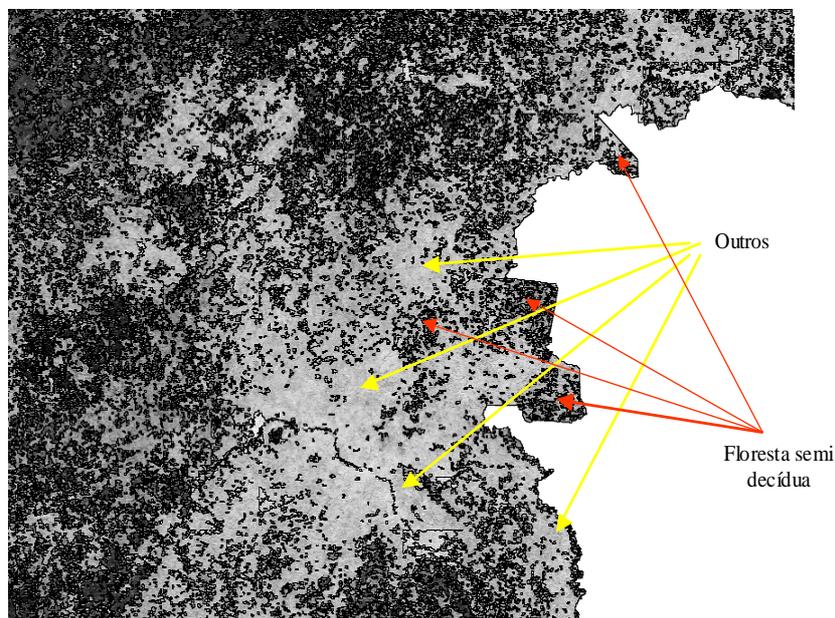


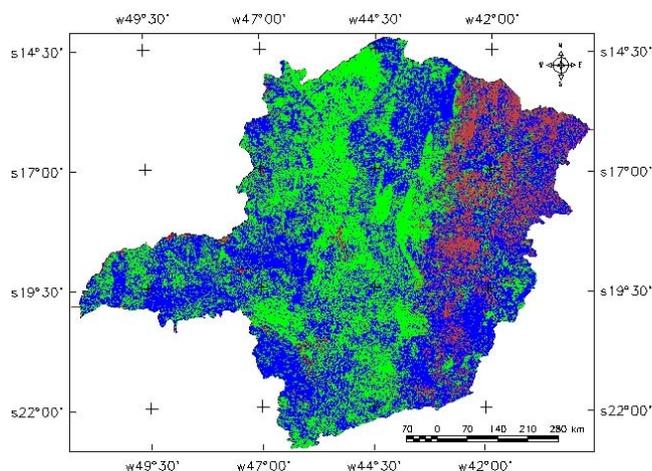
FIGURA 4.10 – Ilustração do proceso de segmentação na região leste do Estado de Minas Gerais a partir da imagem de setembro a bordo da plataforma Terra a partir do produto NDVI (Limar 8 e Área 15).

4.8 Aplicação dos Classificadores

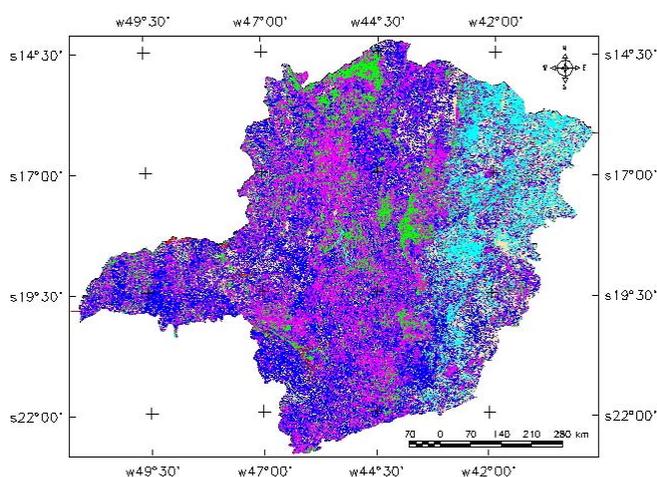
Após o processo de seleção dos canais para classificação, procedeu-se a aplicação dos algoritmos automáticos de classificação das imagens do sensor MODIS. O classificador não-supervisionado K-médias, por exemplo, foi aplicado em todas as imagens em diferentes abordagens. Na primeira, aplicou-se o classificador em todas as bandas, na segunda, em todas componentes da ACP e na terceira, somente nas duas primeiras componentes principais por concentrarem boa parte das informações espectrais. Neste classificador, o mínimo de classes selecionadas foi quatro e o máximo doze. Para todas as situações, um máximo de 10 iterações foi aplicado. Evidentemente, em função dos resultados obtidos, os melhores resultados das classificações foram utilizados para a confecção do mapa final. Este processo será mais bem abordado nos próximos parágrafos.

Os mapas de cada classe foram extraídos automaticamente e com o mínimo de edição a partir de uma avaliação das melhores classes. Esta avaliação foi conduzida em todo o conjunto de dados mencionado anteriormente (conjunto de 6 mosaicos). Os melhores resultados foram mapeados individualmente de forma independente e mosaicados em distintos planos de informação. No final, um mosaico reuniu todas as classes.

Como exemplo, a Figura 4.11 apresenta os resultados da classificação para 5 e 9 temas usando o classificador K-médias para a imagem de março. Como pode ser visto, feições de campos rupestres podem ser melhor representadas de acordo com a escolha do número de classes.



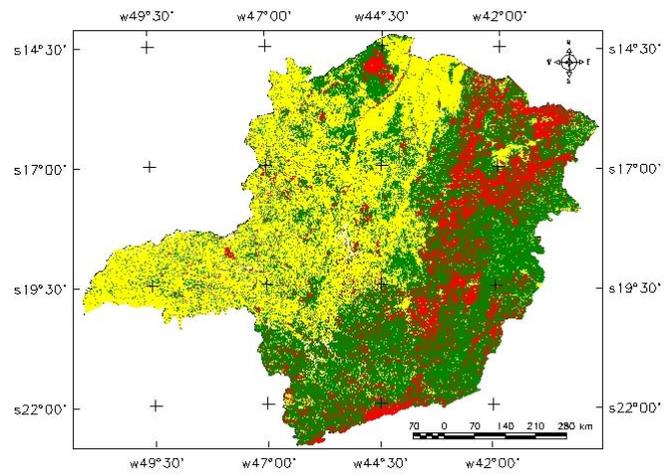
(a)



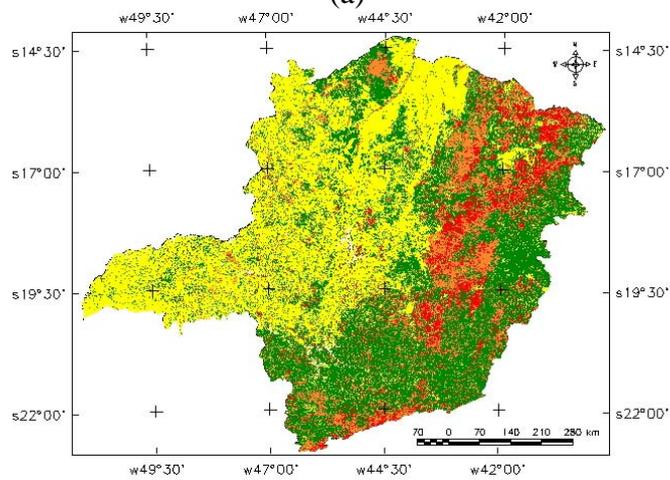
(b)

FIGURA 4.11 – Classificação realizada utilizando K-medias para o Estado de Minas Gerais usando a imagem de mrço da plataforma Terra utilizando (a) 5 temas e (b) 9 temas, e 10 interações para ambos mapas.

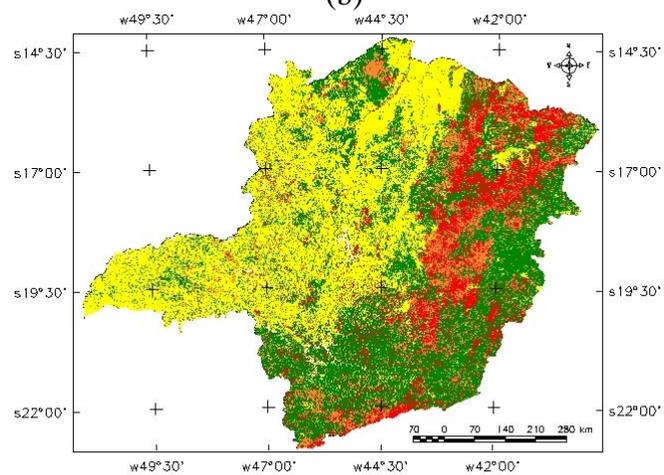
Outros classificadores disponíveis no aplicativo SPRING 4.2 também foram usados: Histograma e Battacharya (por região) e k-médias e MAXVER-ICM (por *pixel*). A Figura 4.12 mostra o resultado do classificador por Histograma para 4, 5 e 6 classes do sensor MODIS do mês de setembro a bordo da plataforma Terra. Percebe-se que as classes definidas pela cor cinza (fundo e água) pouco variam, juntamente com as classes das cores amarela e verde. Entretanto mudanças são observadas para a classe na cor roxa (Figura 4.12a) que se desmembra para uma classe adicional da Figura 4.12b e outra adicional para a Figura 4.12c.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.12 – Mosaicos do sensor MODIS referentes à plataforma Terra do mês setembro, submetidos a diferentes número de classes (a) quatro, (b) cinco, e (c) seis, no processo não supervisionado de classificação chamado Histograma.

Para demonstrar os resultados das formações ombrófilas, a Figura 4.13a mostra o mapa de referência e a Figura 4.13b o mapa gerado pela classificação por histograma (na área delimitada no quadro indicada na região sul do Estado). De fato, de acordo com esta Figura, a cor roxa se assemelha com a cor vermelha da classe em questão. Entretanto, em função da resolução espacial de 125m o classificador gerou polígonos maiores enquanto que nos dados de 30m (mapa de referência) percebe-se um maior detalhamento de polígonos. No entanto, com poucas edições, esta classe foi facilmente discriminada e mapeada. As áreas indicadas com setas mostram regiões do bioma Floresta Ombrófila na classificação de referência (Figura 4.13a) e no mapa produzido neste trabalho (Figura 4.13b).

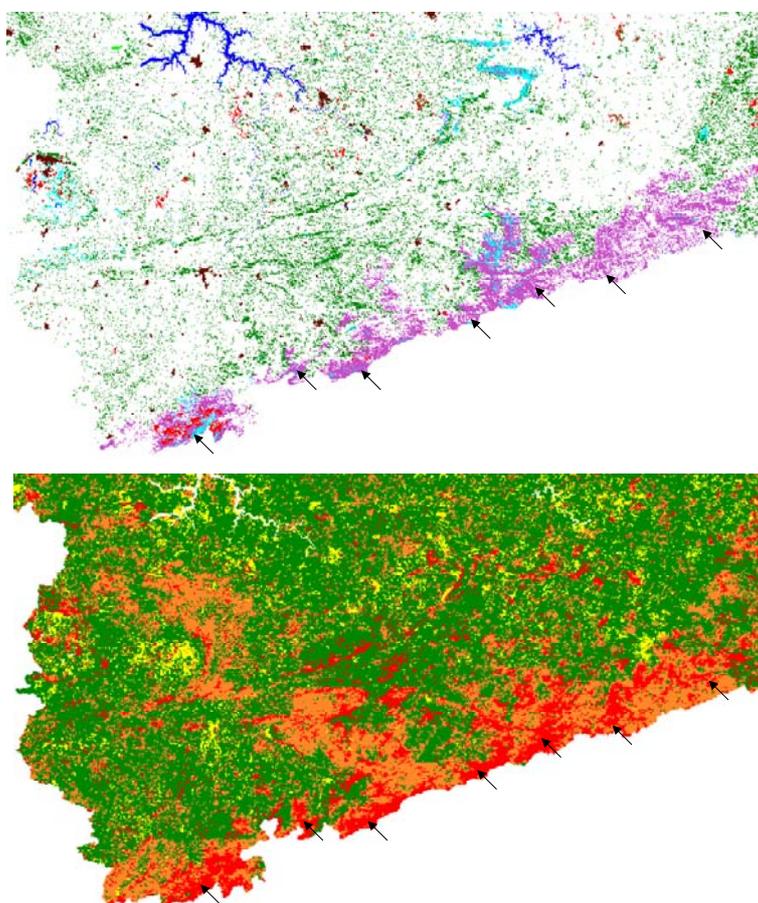


FIGURA 4.13 – Recorte da região sul do Estado de Minas Gerais ilustrando a distribuição espacial da fitofisionomia Floresta Ombrófila. Na primeira Figura (letra a) está ilustrada o mapa de referência e na segunda Figura (letra b) a classificação por histograma para a mesma fitofisionomias. A indicação das áreas representativas desta fitofisionomias é feita por setas.

A etapa seguinte foi a edição destas classes para assegurar uma melhor qualidade e remover os erros dos classificadores (omissão e comissão). E, finalmente, para a determinação das áreas antropizadas, foram computadas as áreas não classificadas. Nas situações em que mais de um classificador mostrou-se eficiente no mapeamento de uma determinada classe, a decisão de escolha entre um e outro baseou-se na menor necessidade de edição matricial.

Para as imagens classificadas utilizando-se o k-médias, foram estabelecidos os seguintes parâmetros:

- 6 temas e 10 interações para 1 data (mês agosto plataforma Aqua) PC 1,2,3 e 4.
- 7 temas e 10 interações para 1 data (mês setembro plataforma Terra) PC 1,2,3 e 4.

Para as imagens classificadas utilizando-se Histograma:

- 5 temas para uma data (mês setembro plataforma Terra).

Para as imagens classificadas pelo método supervisionado MAXVER-ICM:

- 1 data (mês setembro plataforma Terra) com limiar de 75% PC 1 e 2.
- 1 data (mês setembro plataforma Terra) com limiar de 90% PC 1 e 2.

Para as imagens classificadas pelo método supervisionado Battacharya:

- 1 data (mês setembro plataforma Terra, imagem segmentada com limiares de área 12 e similaridade 8) limiar do classificador 99.9%.
- 1 data (mês março plataforma Terra, imagem segmentada com limiares de área 25 e similaridade 12).
- 1 data (mês agosto Aqua, imagem segmentada com limiares de área 15 e similaridade 12).
- 1 data (imagem NDVI setembro Terra, segmentada com limiares de área 8 e similaridade 15).

4.9 Dados de Campo e Validação

Durante o período de estudo, foi realizada uma missão de campo em outubro/2005, com a finalidade de se conhecer e observar *in situ* as condições e características das

diferentes fitofisionomias presentes na área de estudo. Estes dados permitiram a identificação de regiões a serem usadas como verdade terrestre nos procedimentos de classificação e interpretação das imagens e a avaliação da acurácia do mapa gerado pela UFLA e IEF/MG. Desta maneira, o trabalho de campo foi direcionado para melhorar a precisão do mapa a ser gerado, a partir da coleta de 898 pontos amostrais com o GPS (Sistema de Posicionamento Global) em áreas homogêneas e representativas de todas as fitofisionomias e áreas antropizadas. Os dados/pontos foram coletados, principalmente, ao longo de rodovias. Uma descrição de cada ponto visitado foi feita. Os dados de campo foram então transpostos às imagens (imagem classificada a partir dos dados multitemporais do sensor MODIS e de referência) e gerados matrizes de confusão. De posse das matrizes de confusão obtidas entre o cruzamento dos pontos coletados em campo e as imagens de classificação (imagem classificada e de referência), a Acurácia Global de Classificação e o Índice Kappa foram determinados. Por fim, avaliou-se a significância estatística das matrizes pelo teste-Z. Um fluxograma das atividades realizadas corresponde a Figura 4.14.

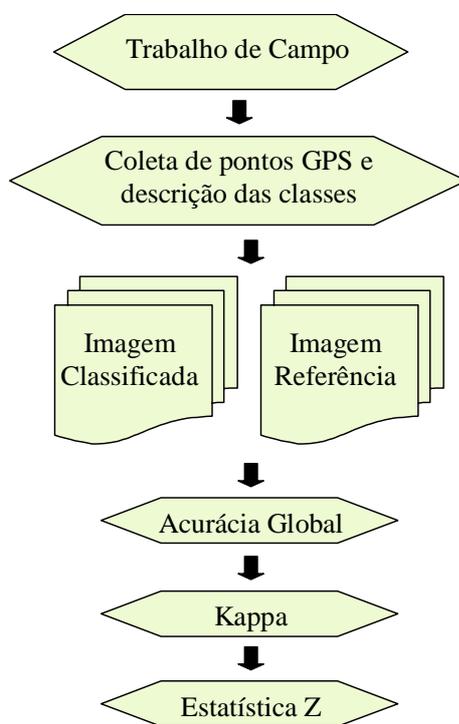


FIGURA 4.14 – Fluxograma de atividades realizadas para a validação do mapa de vegetação obtido a partir da classificação da vegetação do Estado de Minas Gerais pelos dados MODIS e o mapa de referência.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados desta dissertação de mestrado. Inicialmente são demonstrados os resultados da classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais e posteriormente os resultados oriundos das aplicações de diferentes técnicas de processamento de imagens.

5.1 Comportamento Sazonal das Fitofisionomias

A Figura 5.1 mostra os perfis do índice de vegetação NDVI obtidos a partir dos dados do sensor MODIS nos cinco dos seis meses analisados para nove das 13 classes em análise (jan/Terra, fev/Aqua, mar/Terra, ago/Aqua, e set/Terra). A seleção das classes deveu-se a otimização da representação gráfica. As análises dos perfis obtidos através dos dados de NDVI exibiram dinâmica sazonal, com menores e maiores valores de NDVI encontrados nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Embora não apresentados em função da visualização, imagens adquiridas durante a estação chuvosa mostraram maiores desvios padrões para as fitofisionomias em análise em relação à estação seca.

Na estação chuvosa (janeiro, fevereiro e março), as fitofisionomias que apresentavam maior cobertura do solo e, portanto maior densidade de folhas, a exemplo da Floresta Ombrófila, Floresta Semidecídua e Floresta Decídua, bem como os reflorestamentos compreendendo as classes Pinus e Eucalipto, mostraram maiores valores de NDVI do que Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Campo. Entretanto, um decréscimo é observado para a maioria das classes, exceto para Floresta Ombrófila e Floresta Semidecídua. Este comportamento observado, pode estar relacionado a distribuição espacial da precipitação.

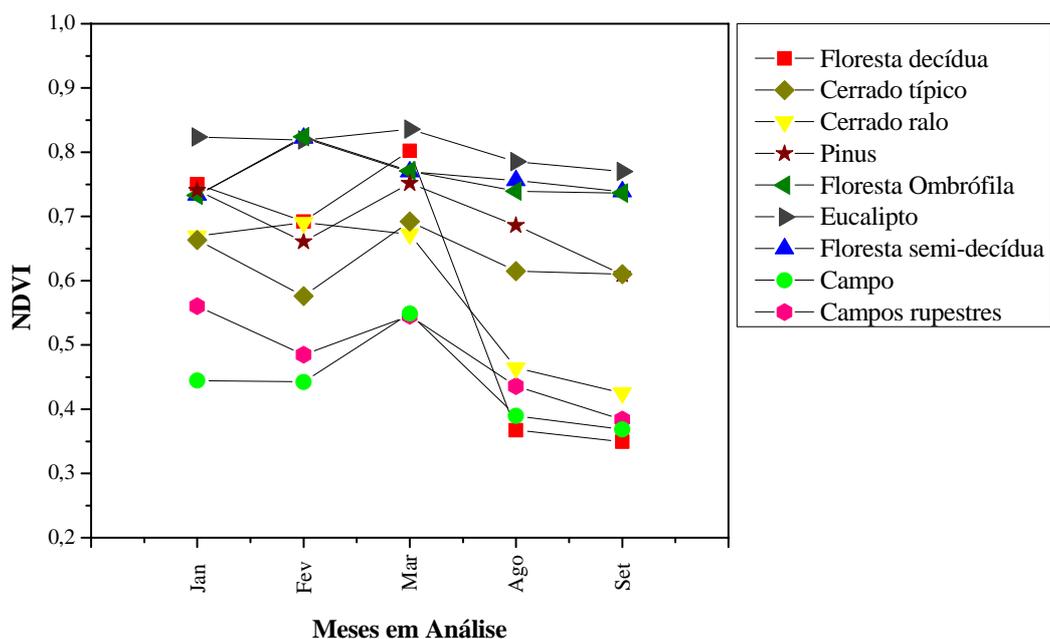


FIGURA 5.1 – Variação sazonal do índice de vegetação NDVI para nove fitofisionomias das 13 classes em análise em cinco dos seis meses investigados.

Do final da estação chuvosa até a estação seca, todas as fitofisionomias mostraram sensível decréscimo no índice de vegetação NDVI. Entretanto, o grau é diferenciada de acordo com a classe em análise. A menor sensibilidade, por exemplo, ocorreu para a cultura do Eucalipto, enquanto que a maior para a fitofisionomia Floresta decídua. Nesse sentido observou-se que o índice de vegetação NDVI mostrou sensibilidade à variação fenológica da vegetação decorrente, muito provavelmente, da mudança nos regimes de chuva.

Os padrões dos índices de vegetação apresentados na Figura 5.1 de algumas fitofisionomias podem estar associados a alterações da capacidade fotossintética devido à perda de folhas na estação seca. As fitofisionomias Campo, Cerrado Ralo, por exemplo, mostraram semelhança nos perfis do mês de setembro, porém com diferenças na magnitude dos dados. Segundo Ratana et al. (2005), esta dinâmica espectral pode estar relacionada em função da maior densidade de gramíneas e folhas secas sobre o solo, contribuindo assim com uma maior e menor resposta na região do visível e infravermelho próximo, respectivamente.

Outra fitofisionomia, a exemplo da Floresta Decídua, mostrou sensível contraste entre os meses de janeiro e setembro, como pode ser visualizado nos perfis espectrais das Figuras 5.2a e 5.2b, respectivamente. Nestes períodos, esta fitofisionomia apresentou valores mínimos e máximos de NDVI de $0,35\pm 0,07$ e $0,75\pm 0,02$, respectivamente, mostrando extremas condições sazonais desta fitofisionomia. A dinâmica espectral encontrada corrobora com as observações realizadas por Liesenberg et al. (2006b).

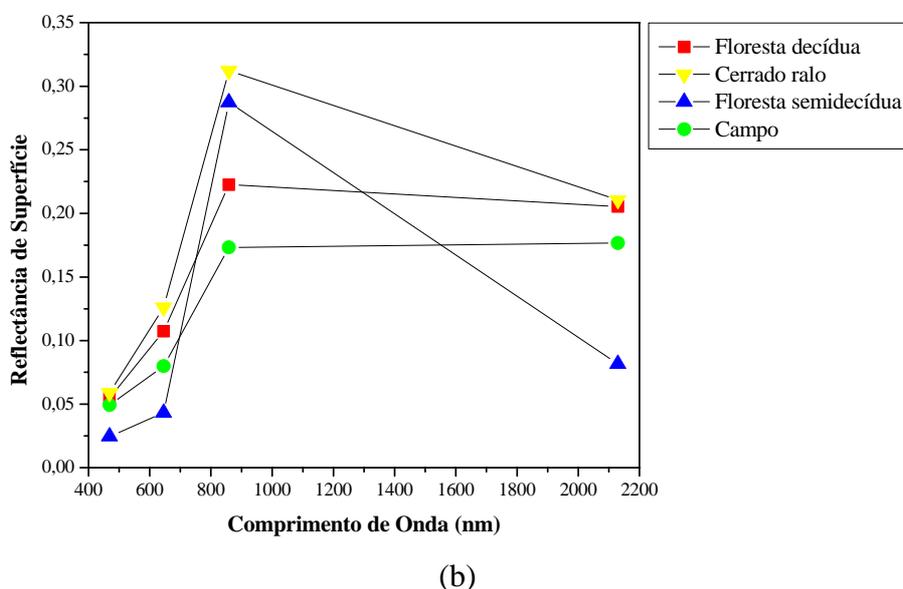
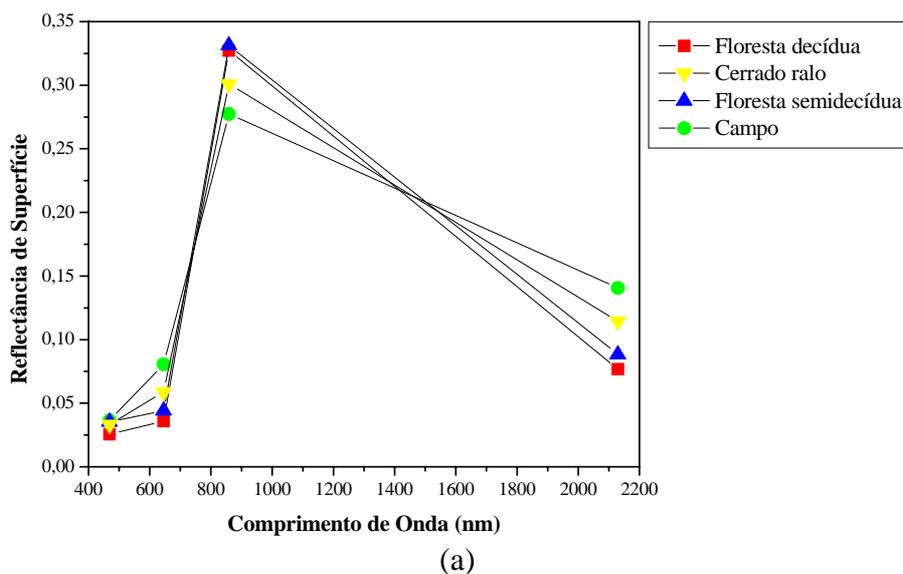


FIGURA 5.2 – Perfis espectrais de quatro classes de vegetação para quatro bandas espectrais do sensor MODIS nos meses de março (a) e setembro (b), respectivamente.

5.2 Restauração de Imagens

A aplicação da técnica de restauração de imagens permitiu uma melhor identificação das classes de vegetação utilizadas para o mapeamento da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais. Para comprovar tal informação, a Figura 5.3 mostra a classificação não-supervisionada K-médias para uma porção da área total de estudo nesta pesquisa com dados brutos, na resolução espacial de 250m e restaurados na resolução de 125m. De acordo com a Figura 5.3b, em comparação com a Figura 5.3a, um melhor delineamento é observado nas classes, mais especificamente na Floresta Decídua na porção norte do Estado. Além do melhor delineamento desta fitofisionomia, melhor captura dos detalhes nas bordas dos alvos que estão localizados em zonas de transição de alta frequência tais como solo-água foram observadas. Além da análise visual, as afirmações também podem ser constatadas de forma visual contrastando os resultados com a Figura 5.3c.

Essa afirmação se apoia nos estudos estatísticos. As Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os valores de médias, desvios padrões e variâncias para todas as quatro bandas espectrais dos dados originais (250m) e restaurados (125m). Para fins de demonstração dos resultados foram selecionadas, dentre as classes consideradas neste estudo, as fitofisionomias Floresta Estacional Semidecidual (Tabela 5.1), Eucalipto (Tabela 5.2) e Pinus (Tabela 5.3). Um conjunto aleatório de 300 *pixels* foi selecionado para cada classe para fins de cômputo das estatísticas. Após verificação da distribuição normal dos dados por meio do teste Kolmogorov-Smirnov e da homogeneidade de variância pelo Teste de Cochran seguiu-se a análise estatística dos valores de reflectância para as classes de vegetação mapeadas. As médias das imagens restauradas e originais foram analisadas por meio do teste de hipótese *t*-Student.

Os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o aplicativo StatdiskV9.1 (Triola,2005). Para demonstrar a interface do aplicativo, a Figura 5.4 indica os resultados das análises estatísticas para a fitofisionomia Floresta Estacional Semidecidual com um nível de significância de 99% para as bandas do vermelho (Figura 5.4a), infravermelho próximo (Figura 5.4b), azul (Figura 5.4c) e infravermelho

médio (Figura 5.4d). maiores informações sobre os métodos estatísticos além do aplicativo utilizado para as análises podem ser encontrados em Triola (2005).

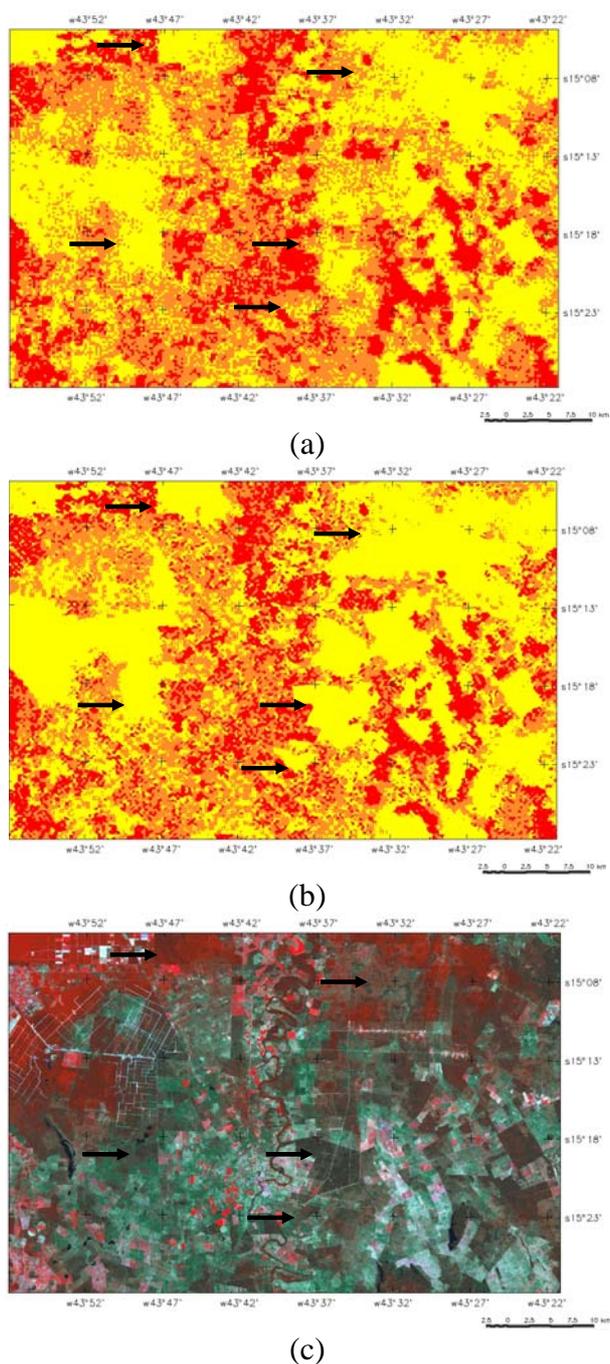


FIGURA 5.3 – Classificação de imagens MODIS pelo K-médias considerando os dados com resolução espacial de (a) 250 m, e (b) 125m. Uma imagem do sensor Landsat para a mesma área de estudo adquirida em 15 de junho de 2004 é mostrada em (c).

Analisando os resultados das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, percebe-se que em todos os exemplos mencionados ocorreu um aumento na variância para as imagens restauradas (125m) em comparação com os valores encontrados para as imagens originais (250m).

TABELA 5.1 – Valores médios de reflectância para a classe Floresta Semidecídua.

	250 m			125 m		
	Desvio Padrão	Média	Variância	Desvio Padrão	Média	Variância
Vermelho	3,72	24,57	13,84	5,12	24,88	26,21
IVP	1,48	35,76	2,19	2,72	36,54	7,40
Azul	1,79	18,23	3,20	2,45	18,98	5,98
IVM	1,41	21,71	1,99	1,69	22,07	2,86

Média de 300 pixels. Imagem Terra (Ago – 2004)

TABELA 5.2 – Valores médios de reflectância para a classe Eucalipto.

	250 m			125 m		
	Desvio Padrão	Média	Variância	Desvio Padrão	Média	Variância
Vermelho	5,37	33,87	28,84	6,08	33,99	36,97
IVP	8,08	36,58	65,28	8,78	37,63	77,09
Azul	3,14	19,87	9,86	3,72	20,14	13,84
IVM	2,19	23,54	4,79	2,81	24,07	7,89

Média de 300 pixels. Imagem Terra (Ago – 2004)

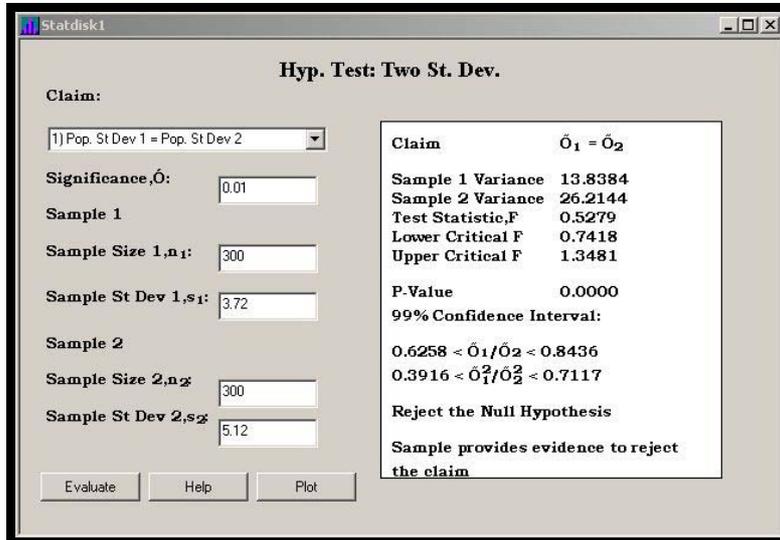
TABELA 5.3 – Valores Médios de reflectância para a classe Pinus.

	250 m			125 m		
	Desvio Padrão	Média	Variância	Desvio Padrão	Média	Variância
Vermelho	4,47	21,23	19,98	5,37	20,97	28,84
IVP	6,22	27,73	38,69	4,63	27,77	21,44
Azul	3,32	12,87	11,02	4,11	12,98	16,89
IVM	4,11	19,89	16,89	4,88	20,64	23,81

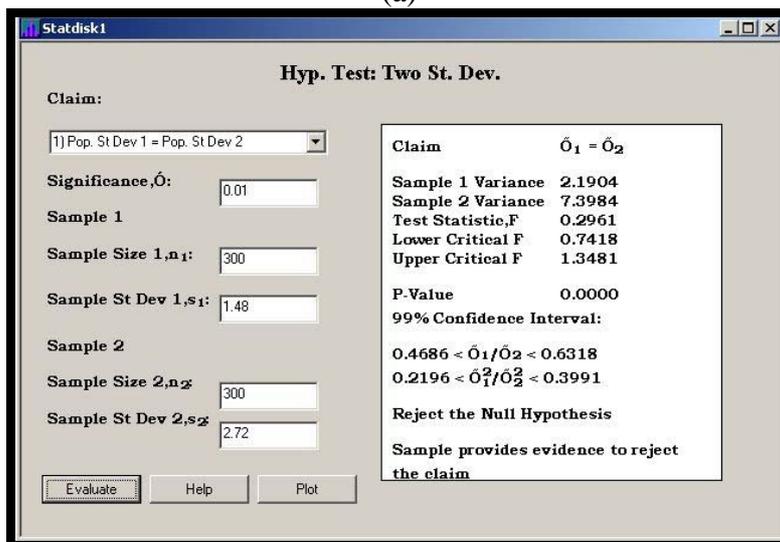
Média de 300 pixels. Imagem Terra (Ago – 2004)

O processo de restauração produziu um ganho no valor da variância, aumentando o conteúdo de informação (detalhes) da imagem, sem alterar de modo significativo a característica radiométrica da imagem original, que, segundo (Boggione, 2003) são duas características essenciais para um bom filtro de restauração. Diante desta constatação, pode-se afirmar que as imagens restauradas do sensor MODIS melhoram o conteúdo de informação (aumento da variância ou desvio padrão) sem, no entanto alterar significativamente o conteúdo espectral e/ou radiométrico. Resultados similares foram

também observados por Silva (2004) que desenvolveu um processo de classificação de comunidades aquáticas em uma área teste no bioma Amazônico.



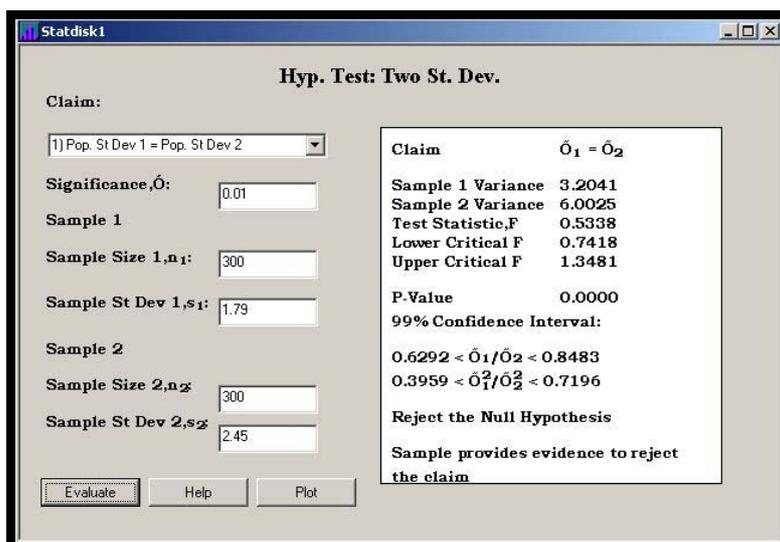
(a)



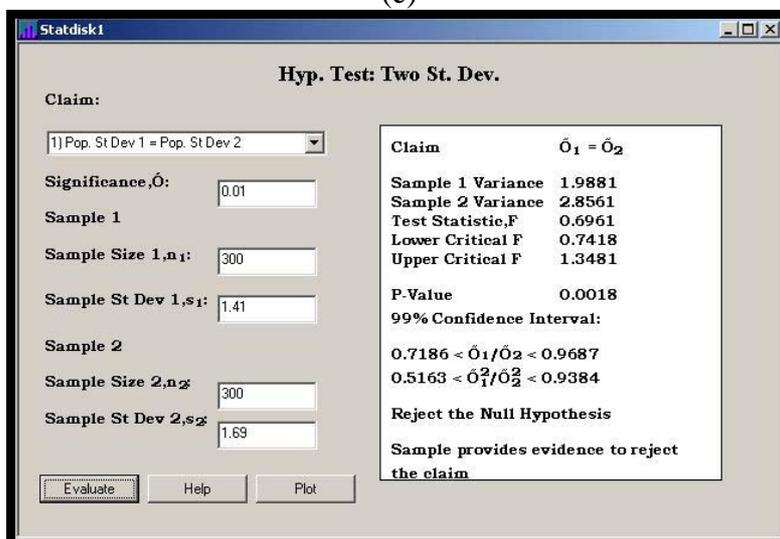
(b)

(Continua)

FIGURA 5.4 – Conclusão.



(c)



(d)

FIGURA 5.4 – Teste *t*-Student aplicado para o conjunto de 300 *pixels* coletados para a fitofisionomias Floresta semidecídua considerando as bandas espectrais do: a) Vermelho, b) IVP, c) Azul, e d) IVM.

5.3 Transformação por Componentes Principais

O entendimento das variações espectro-temporais associadas às classes consideradas neste trabalho é obtido a partir da Transformação por Principais Componentes (TPC) dos espectros MODIS. A Tabela 5.4 indica os autovetores e os autovalores resultantes do uso de TPC considerando a imagem como variável de entrada. Os resultados foram apresentados para cada uma das seis datas de aquisição das imagens, ou seja, para jan/Terra (estação chuvosa), fev/Aqua (estação chuvosa), (c) mar/Terra (final da estação

chuvosa), ago/Aqua (meio da estação seca), set/Aqua e set/Terra (final da estação seca). Na Tabela 5.4, os autovetores indicam a contribuição de cada banda espectral para explicar uma dada componente, enquanto os autovalores indicam o percentual da informação espectral contida ou reunida em cada componente.

Na Tabela 5.4 a primeira componente foi responsável por 87,96%, 87,10%, 88,11%, 95,15%, 95,78% e 95,84% da variância dos dados para as datas de (a) jan/Terra, (b) fev/Aqua, (c) mar/Terra, (d) ago/Aqua, (e) set/Aqua e (f) set/Terra, respectivamente. Juntas, a primeira e a segunda componentes (PC1 e PC2), foram responsáveis por 95,36%, 93,89%, 95,52%, 98,90%, 98,87% e 90,04% da variância total dos dados, respectivamente.

Conforme indicado pelos valores dos autovetores na Tabela 5.4, a primeira componente (PC1) refletiu as variações da reflectância média do sensor MODIS em suas quatro bandas espectrais. A tendência é mais fortemente observada nas bandas espectrais do azul e MIR em função da similaridade dos valores das mesmas para ago/Aqua, set/Aqua e set/Terra (final da estação seca). Por outro lado, uma relação similar pode ser encontrada para azul e vermelho para os dados de jan/Terra, fev/Aqua e mar/Terra (estação chuvosa).

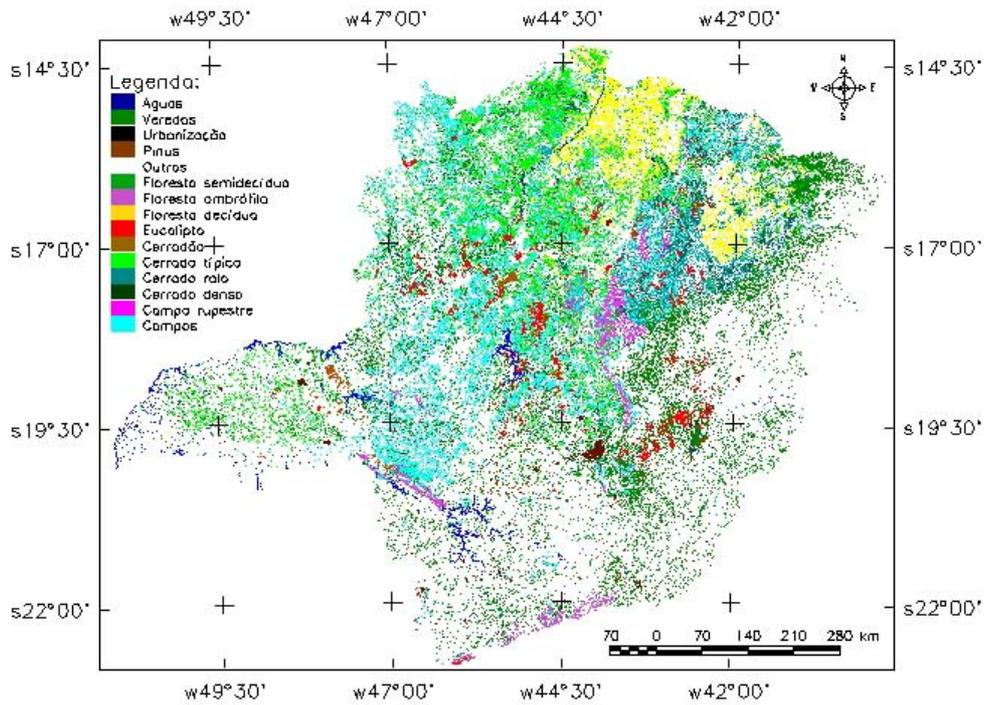
A segunda componente (PC2) foi fortemente influenciada pelas bandas do vermelho e IVP, ou pelas suas relações de covariância negativa para as diferentes datas analisadas, principalmente, para ago/Aqua, set/Aqua e set/Terra (estação seca). Como as bandas do azul (jan/Terra e fev/Aqua, principalmente), vermelho e IVP estão intrinsicamente relacionadas a vegetação, pode-se afirmar que os valores dos auto-vetores para uma mesma data (ou entre datas) estiveram associados principalmente com o vigor da vegetação ou com a sua sazonalidade. Estes resultados corroboram com as observações realizadas por Liesenberg (2006a).

TABELA 5.4 – Autovetores e auto-valores resultantes do uso de principais componentes com valores de reflectância de 4 bandas espectrais. Os resultados são apresentados para: (a) jan/Terra, (b) fev/Aqua, (c) mar/Terra, (d) ago/Aqua, (e) set/Aqua e (f) set/Terra.

Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.19	0.30	0.90	0.25
IVM	0.75	0.28	-0.38	0.46
IVP	-0.37	-0.40	-0.02	0.84
Vermelho	-0.51	0.82	-0.21	0.16
Autovalores (%)	87.96	7.40	3.48	1.16
	3282.45	276.01	129.99	43.45
(a)				
Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.28	0.89	0.31	0.20
IVM	0.47	-0.38	0.17	0.78
IVP	0.81	-0.01	-0.43	-0.40
Vermelho	0.22	-0.26	0.83	-0.44
Autovalores (%)	87.10	6.79	4.06	2.05
	3555.87	277.27	165.83	83.58
(b)				
Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.20	0.31	0.89	0.27
IVM	0.77	0.23	-0.39	0.46
IVP	-0.37	-0.43	-0.01	0.82
Vermelho	-0.48	0.82	-0.23	0.20
Autovalores (%)	88.11	7.41	3.22	1.26
	2771.20	233.04	101.16	39.68
(c)				
Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.14	0.54	0.78	0.29
IVM	0.11	0.78	-0.61	0.14
IVP	0.04	-0.29	-0.16	0.94
Vermelho	0.98	-0.15	-0.04	-0.10
Autovalores (%)	95.15	3.75	0.97	0.13
	1748.89	68.95	17.83	2.30
(d)				
Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.15	0.55	0.76	0.31
IVM	0.13	0.74	-0.63	0.16
IVP	0.03	-0.33	-0.15	0.93
Vermelho	0.98	-0.18	-0.02	-0.10
Autovalores (%)	95.78	3.09	0.96	0.17
	2441.97	78.73	24.53	4.40
(e)				
Região espectral	PC1	PC2	PC3	PC4
Azul	0.32	0.76	0.55	0.15
IVM	0.22	-0.64	0.72	0.15
IVP	0.92	-0.11	-0.37	-0.03
Vermelho	-0.05	-0.02	-0.21	0.98
Autovalores (%)	95.84	3.20	0.85	0.11
	2015.70	67.39	17.90	2.23
(f)				

5.4 Mapeamento das Fitofisionomias

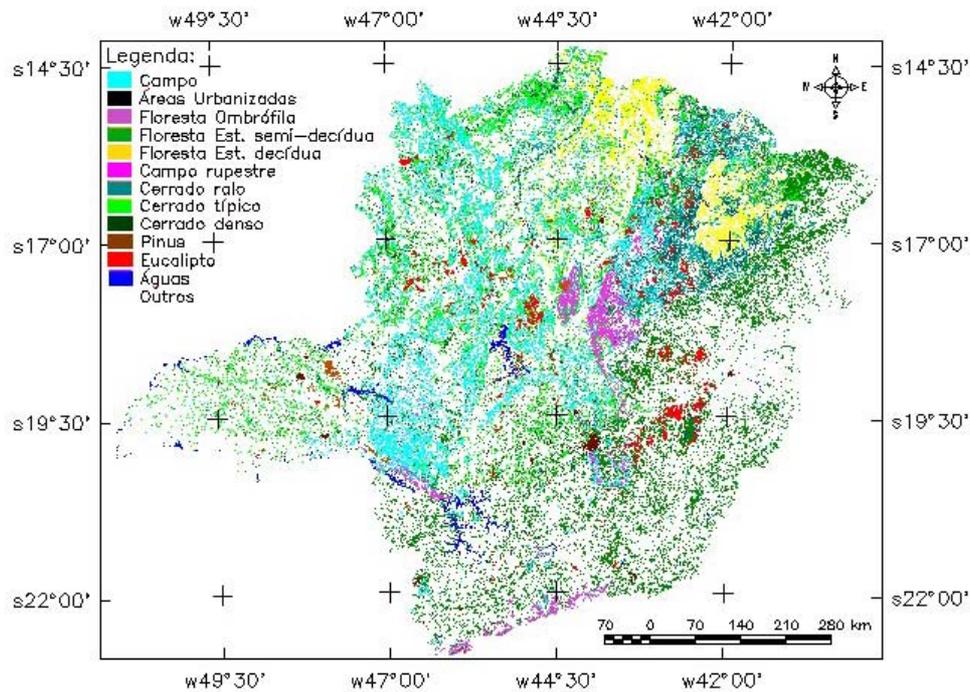
Em relação ao mapeamento da cobertura vegetal, a Figura 5.5 mostra o mapa de referência (Figura 5.5a) e o gerado a partir das classificações dos dados MODIS (Figura 5.5b). Uma comparação entre ambas classificações será feita nos próximos parágrafos a seguir.



(a)

(Continua)

FIGURA 5.5 – Conclusão.



(b)

FIGURA 5.5 – Ilustração do mapeamento realizado pelo IEF/UFLA utilizando dados do sensor TM e ETM+ a bordo das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a), respectivamente, e o gerado através deste estudo fazendo uso dos dados multitemporais do sensor MODIS a bordo das plataformas Terra e Aqua (b).

De acordo com a Tabela 5.5, que apresenta os valores em área (ha) das fitofisionomias em análise, percebe-se uma superestimativa em ordem do menor para o maior da Floresta Semidecídua, Cerrado Típico, Campo e Cerrado Denso. Por outro lado, uma subestimativa para Águas, Eucalipto, Floresta Ombrófila e Floresta Decídua foram observadas.

TABELA 5.5 – Comparativo entre as áreas mapeadas entre o mapa de referência fornecido pelo IEF/UFLA e as áreas mapeadas utilizando os dados multitemporais dos dados MODIS.

Classes Consideradas	Referência (ha)	Percentual %	Mapeado (ha)	Percentual %
Água	624.017	1,0639	599.323	1,0218
Pinus	143.303	0,2443	159.992	0,2728
Eucalipto	1.068.589	1,8219	946.125	1,6131
Áreas Urbanas	301.595	0,5142	256.695	0,4377
Campos rupestres	615.934	1,0501	779.056	1,3283
Cerrado ralo	1.734.282	2,9569	1.578.450	2,6912
Cerrado denso	1.589.357	2,7098	1.241.453	2,1166
Cerrado típico	4.723.937	8,0541	4.271.990	7,2836
Campos	3.757.693	6,4067	3.853.184	6,5695
Floresta ombrófila	236.860	0,4038	222.576	0,3795
Floresta decídua	1.668.300	2,8444	1.426.084	2,4314
Floresta semidecídua	5.448.107	9,2888	5.969.593	10,1779
Outros	36.740.492	62,6410	37.347.945	63,6767
Área do Estado	58.652.466	100	58.652.466	100

Os dados coletados durante a missão em campo (Figura 5.7) permitiram a caracterização geral de cada um dos biomas descritos neste estudo. Por meio dos pontos coletados em campo, foi possível realizar uma análise mais precisa do desempenho do sensor MODIS na caracterização das diferentes fitofisionomias inseridas na área de estudo.

A dinâmica do mapeamento das classes e a confusão entre as mesmas pode ser melhor compreendida através da análise das Tabelas 5.6 e 5.7, que mostram as matrizes de confusão para os pontos coletados em campo para os mapas de referência e os obtidos pelos dados MODIS, respectivamente.

Uma análise do conjunto de pontos coletados em campo (898) sobre os mapas de referência e do MODIS apresentaram uma exatidão global de 0,86 e 0,75, respectivamente. O índice kappa encontrado foi, respectivamente, de 0,8369 e 0,7307, de acordo com o preconizado pela literatura por apresentar valores ligeiramente menores em função do cômputo das informações fora da diagonal principal. As variâncias encontradas para ambos Kappas foram de 0,0002623 e 0,0001786, respectivamente.

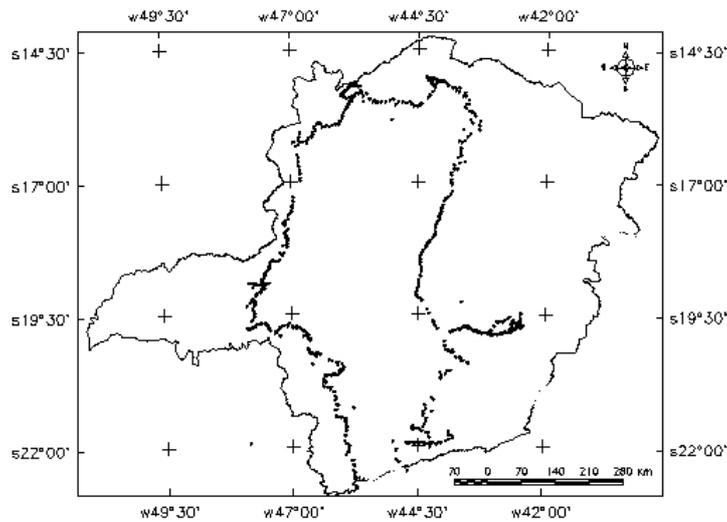


FIGURA 5.6 – Trajetos percorridos em campo no mês de outubro de 2005 onde pontos de GPS foram tomados e uma caracterização geral do ponto visitado foi realizada.

TABELA 5.6 – Matriz de confusão considerando os pontos coletados em campo no mês de outubro de 2005 sobre o mapeamento gerado pelo IEF/UFLA.

MAPA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	16					1				1	2			20
2		87		6	3			1			5			102
3			20			4				1	4			29
4		1		40	7					1				49
5				1	21	1		1			1			25
6		3	1	13		55					9			81
7			5				28			1	4	2		40
8			5					32				11		48
9		1							27		4			32
10			9			3	17		2	112	23	1		167
11	4	7	4	6	1	5	3		1	2	176	3	3	215
12							8					21		29
13	2										7		52	61
	22	99	44	66	32	69	56	34	31	125	240	25	55	898

Note que: 1 (Água), 2 (Campo), 3 (Cerrado denso), 4 (Cerrado Ralo), 5 (Campo Rupestre), 6 (Cerrado típico), 7 (Eucalipto), 8 (Floresta decídua), 9 (Floresta Ombrófila), 10 (Floresta semi-decídua), 11 (Outros), 12 (Pinus) e 13 (Áreas Urbanizadas).

TABELA 5.7 – Matriz de confusão considerando os pontos coletados em campo no mês de outubro de 2004 sobre o mapeamento gerado utilizando os dados multitemporais do sensor MODIS.

REF	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1	20													20
2		91		3			2	1			5			102
3		1	24	1							3			29
4				47						1	1			49
5				2	22						1			25
6		4		10		63					4			81
7			2				35			2	1			40
8			4					40			4			48
9									32					32
10			5			2	14			125	19	2		167
11	2	5	1	1	1	2	5	3	2	1	189	2	1	215
12							7					22		29
13											1		60	61
	22	101	36	64	23	67	63	44	34	129	228	26	61	898

Note que: 1 (Água), 2 (Campo), 3 (Cerrado denso), 4 (Cerrado Ralo), 5 (Campo Rupestre), 6 (Cerrado típico), 7 (Eucalipto), 8 (Floresta decídua), 9 (Floresta Ombrófila), 10 (Floresta semi-decídua), 11 (Outros), 12 (Pinus) e 13 (Áreas Urbanizadas).

De acordo com os valores de Kappa encontrados, ambos mapas mostram que os processamentos foram satisfatórios, e por isso o mapeamento realizado por dados Landsat foi classificado como ótimo, enquanto que o gerado por este estudo como bom. O teste-Z aplicado entre os Kappas apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7 mostraram que os mesmos diferem entre si ($Z=5,0577$), entretanto pelos bons resultados apresentados, um pode realmente ser utilizado em comparação ao outro baseado nos pontos coletados em campo.

Para entender a dinâmica do mapeamento encontrado, uma série de Figuras será utilizada a seguir. Para cada classe se relacionar seus respectivos erros de comissão e de inclusão. Nesta sequência de Figuras, a classe referência é representada na parte superior (denominação da letra a) enquanto que a classe mapeada é apresentada na porção inferior (letra b).

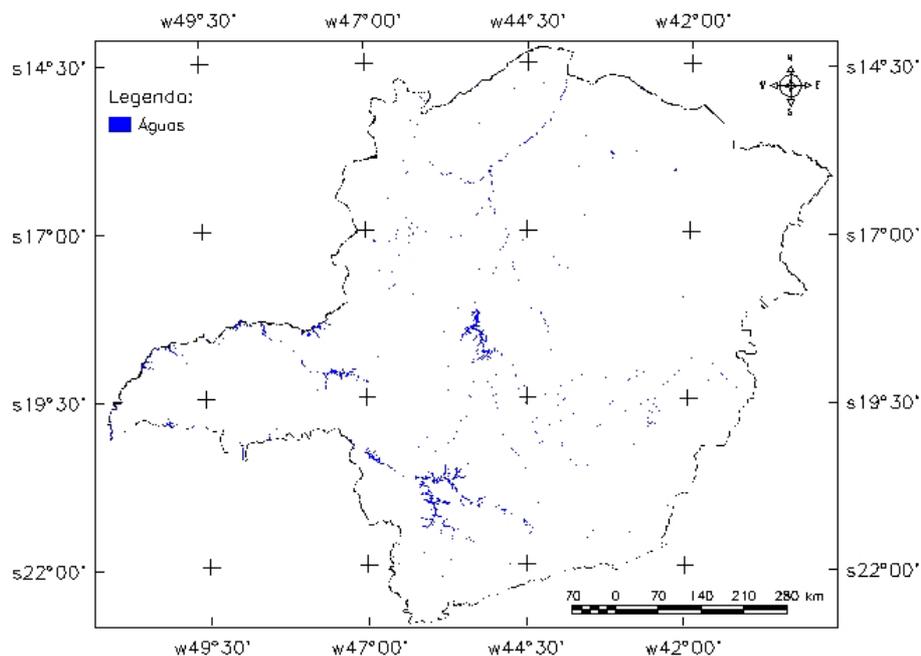
A classe Água, por exemplo, no mapa de referência Landsat possui uma extensão de 624.017 ha (1,06%), enquanto que no mapeamento realizado com os produtos MODIS foi obtido um total de 599.323 ha (1,02%). Comparando estes valores percentuais, obtém-se uma subestimativa total de 4% em relação aos dados de referência. Os motivos que podem explicar tal fato são a resolução espacial do sensor MODIS, menor que a dos sensores da série TM e ETM+, e um maior percentual de mistura nos *pixels*.

Outro aspecto a ser considerado, e não menos importante, são as datas envolvidas no processo de mapeamento de ambos mapas. Um mapeamento realizado durante o período chuvoso pode apresentar valores maiores em relação ao período de estiagem, e significativas diferenças entre áreas podem ser encontradas. Um exemplo desta dinâmica, apesar de ter sido realizado no bioma Amazônico pode ser visto em França (2005).

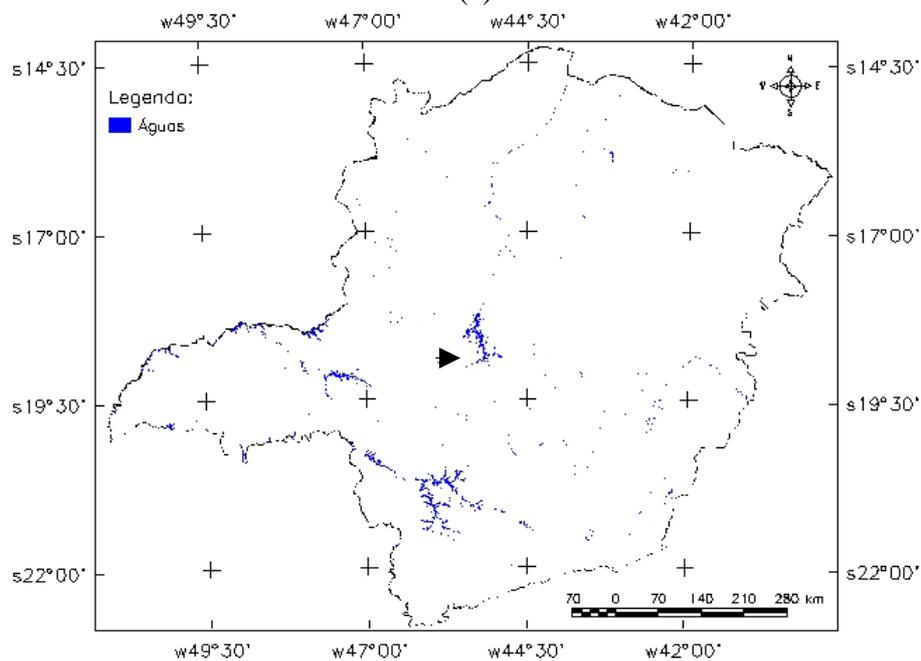
Percebe-se que um potencial considerável para mapeamentos de corpos d' água por meio do uso de imagens MODIS para programas de mapeamentos em grande escala. A técnica do modelo linear de mistura espectral, empregada para o mapeamento desta classe através da imagem fração sombra, mostrou-se fundamental na estimação de recursos hídricos deste Estado.

As Figuras 5.8a e 5.8b mostram respectivamente o mapa de referência e o MODIS. De acordo com estas Figuras, as menores estimativas encontradas foram em função da presença corpos d' água menores que os classificadores até então usados com os dados MODIS não foram capazes de detectar. A principal razão pode estar associada a sua resolução espacial em comparação aos dados LANDSAT.

De acordo com a Tabela 5.7 (matriz de confusão do mapeamento - MODIS) alguns *pixels* foram classificados erroneamente para Cerrado Típico, Floresta Semidecídua e outros. Por outro lado, a Tabela 5.6 (matriz de confusão – referência) não mostrou confusão para nenhuma classe. Este comportamento pode estar associado a coleta de pontos próximos a represas, e que, em função da resolução espacial do sensor MODIS, foram erroneamente classificados.



(a)



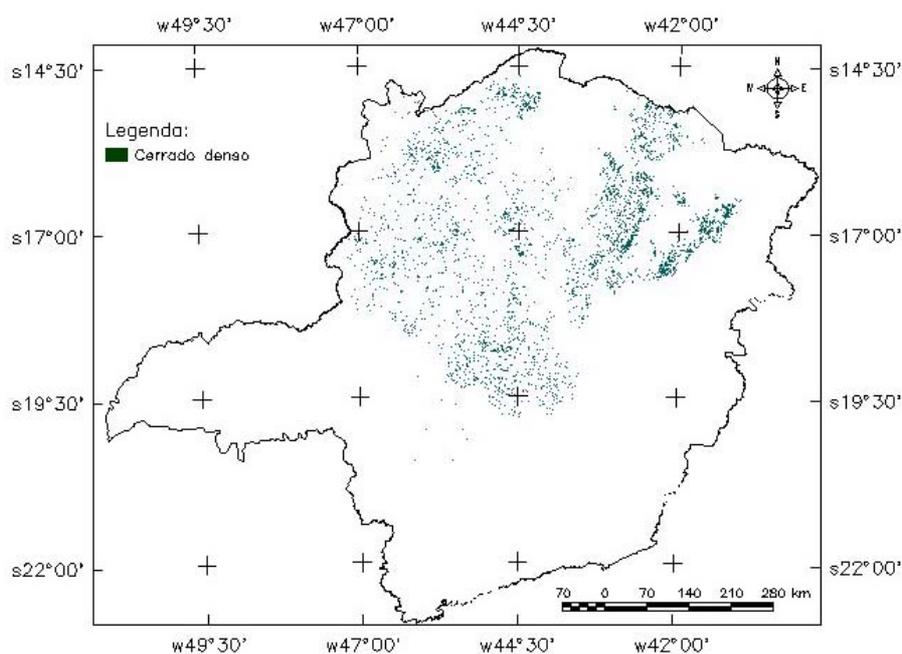
(b)

FIGURA 5.7 – Mapeamento da classe Água no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

No mapeamento da classe Cerrado Denso (Figura 5.9), obteve-se o total de 1.241.453 ha, sendo sua maior ocorrência localizada na região nordeste da área de estudo. No

mapa de referência esta mesma classe possui a extensão total de 1.589.357 ha, no processo automático de classificação ocorreu uma superestimativa da ordem de 21,86 % que esteve concentrada principalmente na região central e noroeste do Estado. De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, a fitofisionomia mostrou certa confusão espectral com o Cerrado Típico, em função do seu comportamento espectral similar.

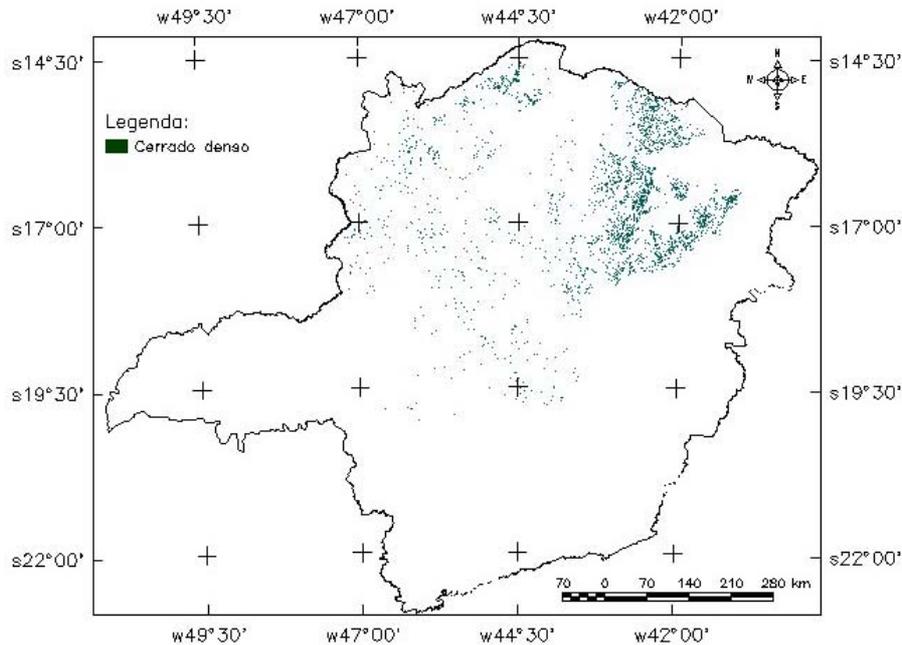
O comportamento espectral da vegetação do tipo Cerrado (savana) é bastante semelhante para a maior parte das suas diversas fitofisionomias. Aliado a este fator considera-se ainda a grande sazonalidade envolvida na sua resposta espectral. Fatores que atuando conjunta ou independentemente interagem com a capacidade de diferenciação das classes do bioma cerrado por sensoriamento remoto de resolução moderada, tal como o sensor MODIS.



(a)

(Continua)

FIGURA 5.8 – Conclusão.



(b)

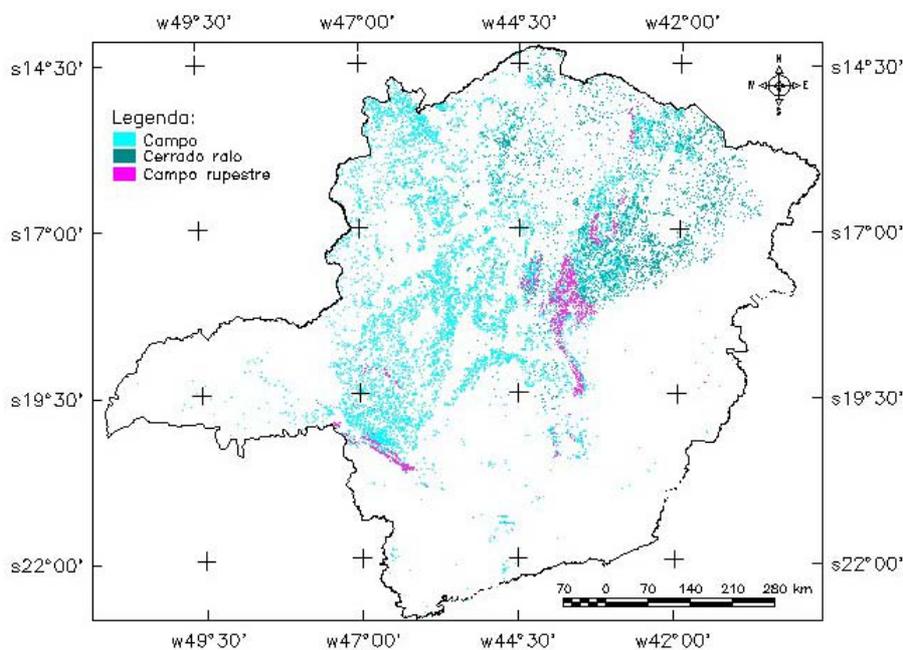
FIGURA 5.8 – Mapeamento da fitofisionomias Cerrado Denso no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

As Figuras 5.10a e 5.10b mostram a distribuição geográfica das fitofisionomias Campo, Campos Rupestres e Cerrado Ralo, para o mapa de referência (letra a) e o obtido por este estudo (letra b). Estas fitofisionomias apresentaram uma área total de 1.734.283 ha, 615.934 ha e 1.784.282 ha, respectivamente, no mapa de referencia. Considerando o mapeamento realizado um total de 3.853.184ha, 779.056ha e 1.578.450ha, respectivamente, foram obtidos. Houve, portanto, uma superestimação para as fitofisionomias Campos e Campos Rupestres, enquanto que uma subestimativa para a fitofisionomia Cerrado Ralo.

Houve, especificamente, uma subestimativa total de 9% perante a referência, já que um total de 155.832 ha deixou de ser identificado como Cerrado Ralo, principalmente na região nordeste do Estado. Para a fitofisionomia Campo, um total de 95.491 ha deixou de ser identificada (subestimativa de 2.54%) enquanto os Campos Rupestres tiveram uma superestimativa de 26.48 % ou 163.122 ha.

Além da forte contribuição do componente solo no processo de mistura espectral, que naturalmente ocorre e se realça em sensores de resolução moderada tais como o MODIS, o comportamento sazonal bem característico presente em todas as fisionomias do Cerrado são fatores plausíveis de aplicação para os resultados encontrados especificamente nestas fitofisionomias, e em outras de mesma similaridade espectral. A exemplo do Cerrado Típico, principalmente, aonde de acordo com as Tabelas 5.6, e 5.7, uma relativa confusão em ambas matrizes de confusão foi encontrada. A mesma relação pode ser empregada para Campos e Campos Rupestres em relação a Cerrado Ralo.

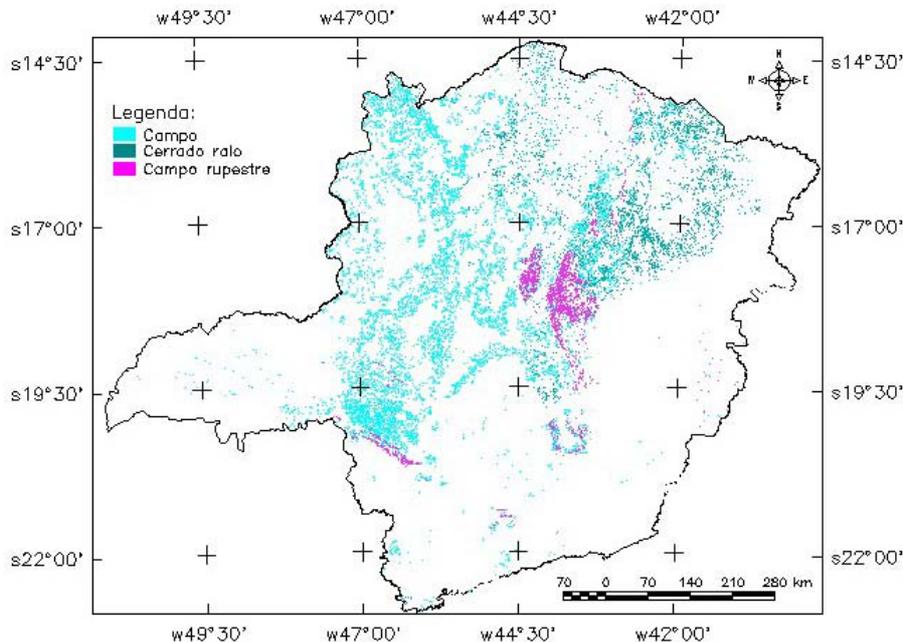
A grande ocorrência da Cerrado Ralo em áreas de transição entre a Floresta Semidecídua e Decídua também são fatores que podem ser considerados como preponderantes. As duas florestas (Semidecídua e Decídua) possuem também um comportamento espectral diferenciado ao longo do ano, o que pode causar em algumas épocas do ano uma confusão espectral entre tais formações, o que ocasionaria erros de estimativa. Princípio semelhante pode ser empregado para as fitofisionomias Campo e Campos Rupestres.



(a)

(Continua)

FIGURA 5.9 – Conclusão.



(b)

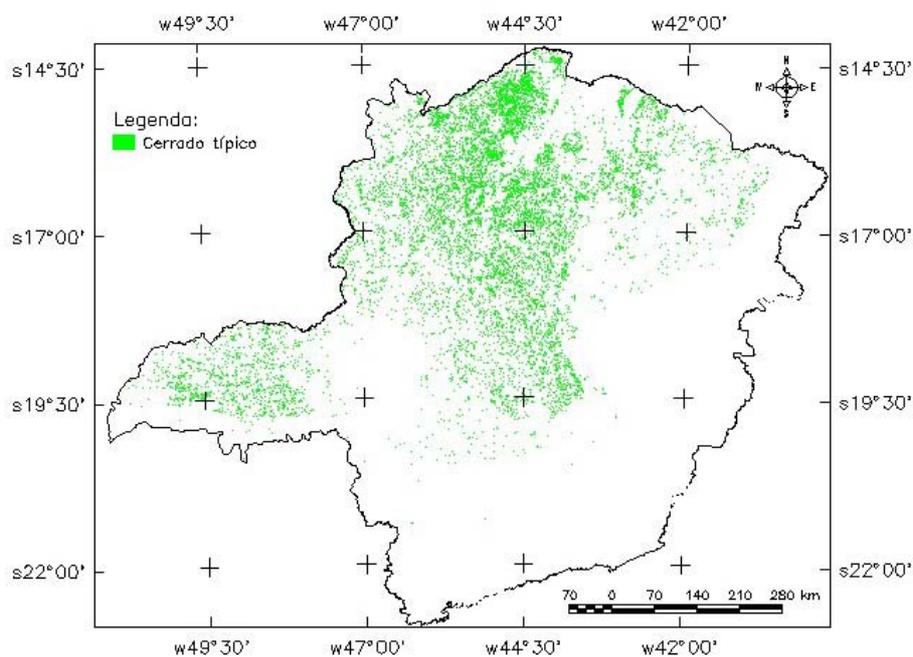
FIGURA 5.9 – Mapeamento da fitofisionomias Campo, Campos Rupestres e Cerrado ralo no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

As Figuras 5.10a e 5.10b mostram a distribuição geográfica da fitofisionomia Cerrado Típico para o mapa de referência (letra a) e o obtido por este estudo (letra b). Dentre todas as classes mapeadas, o Cerrado Típico foi a que apresentou maior subestimativa total, ou seja, 451.947 ha (9.56%) não foi mapeado como tal fitofisionomia em relação ao mapa de referência utilizado. Em resumo, a área total obtida pelo mapeamento de referência foi de 4.723.923 ha enquanto que o alcançado por meio dos produtos MODIS foi de 4.271.990 ha.

Os mesmos fatores mencionados nas discussões da classe anterior (Cerrado Ralo) podem ser também considerados neste contexto, aliando-se ao fato de que o Cerrado Típico é a classe de maior extensão dentro da área de estudo. A sua ocorrência restringe-se apenas a regiões de alta mecanização agrícola (noroeste e triângulo mineiro principalmente) e a áreas de maior urbanização do Estado de Minas Gerais. Esses recortes de área contribuem para uma maior fragmentação e o inerente aumento do grau de dificuldade para identificar e mapear suas feições.

O processo de fragmentação da paisagem contribui ativamente no fenômeno de mistura espectral, e na confusão com a fitofisionomia Cerrado Ralo e classe outros, principalmente, como indicado pelas Tabelas 5.6 e 5.7.

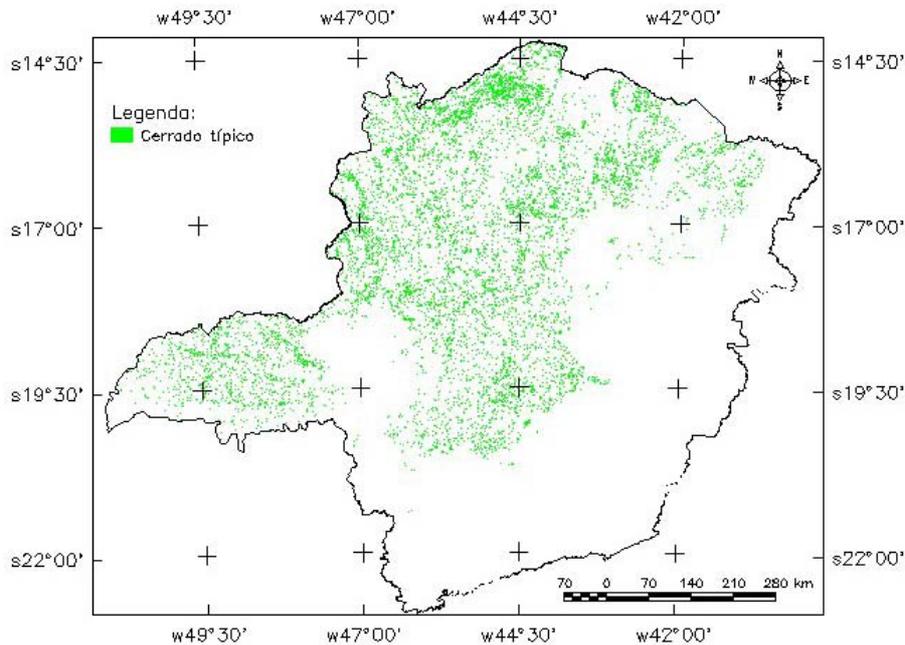
Na Figura 5.11, pode-se visualizar, o processo de fragmentação do Cerrado Típico ao longo de toda a região de estudo. Nota-se também uma menor capacidade de identificação dos fragmentos de menor tamanho, pelo sensor MODIS em comparação com o potencial do TM/ETM+ na identificação dos mesmos fragmentos.



(a)

(Continuação)

FIGURA 5.10 – Conclusão.



(b)

FIGURA 5.10 – Mapeamento da fitofisionomias Cerrado Típico no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

As Figuras 5.12a e 5.12b ilustram a distribuição espacial dos cultivos de Eucalipto e Pinus, sendo considerado o mapa de referência a Figura 5.13a e o obtido por este estudo a Figura 5.13b.

Para a classe Eucalipto, o mapa de referência utilizado apresenta uma área total de 1.068.589 ha. Porém, no mapeamento realizado obteve-se um total de 946.125 ha. Para o Pinus uma área de 143.303 ha no mapa de referência, enquanto no mapeamento realizado um total de 159.992 ha. Ou seja, uma suposta subestimativa de 11,46% em relação ao mapa referência para o Eucalipto, contra a uma superestimativa de 16.689 ha, equivalente a 11,64 % a mais que no mapa de referência para a classe Pinus.

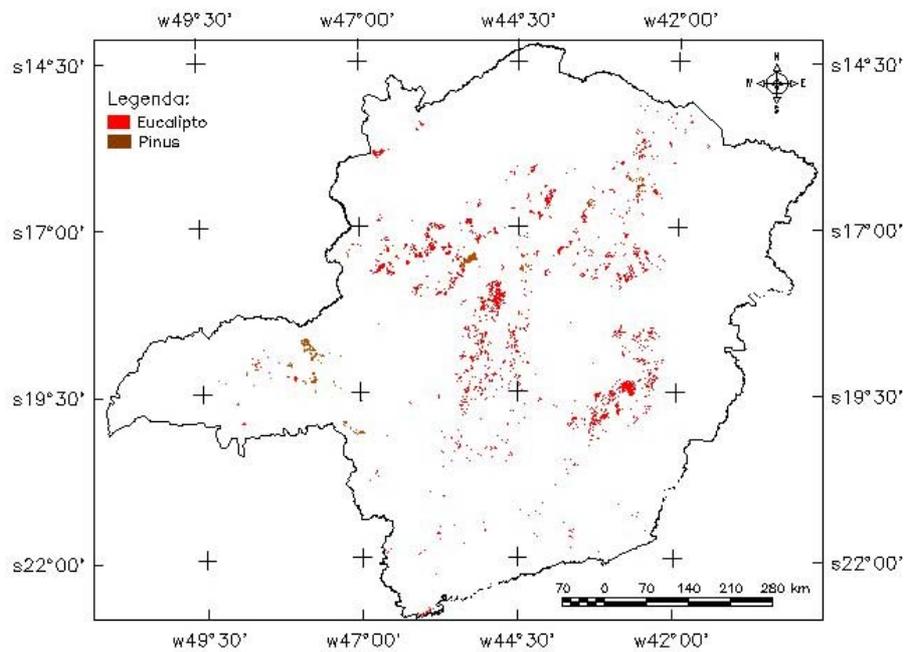
O cultivo de Pinus e Eucalipto em áreas vizinhas torna a separabilidade de ambas a classes algo complexo, ocasionando a confusão no processo de classificação das imagens. Também o fato das imagens da classificação de referência possuir imagens que tem um range de 4 anos (1999-2003) pode ocasionar variações na determinação da

área plantada, enquanto que o mosaico MODIS utilizado nesta dissertação foi composto por imagens do ano de 2004. Esta variação pode estar relacionada, principalmente, ao ciclo de produção e constante renovação e ampliação dos plantios para o abastecimento de siderúrgicas e produção de papel e celulose.

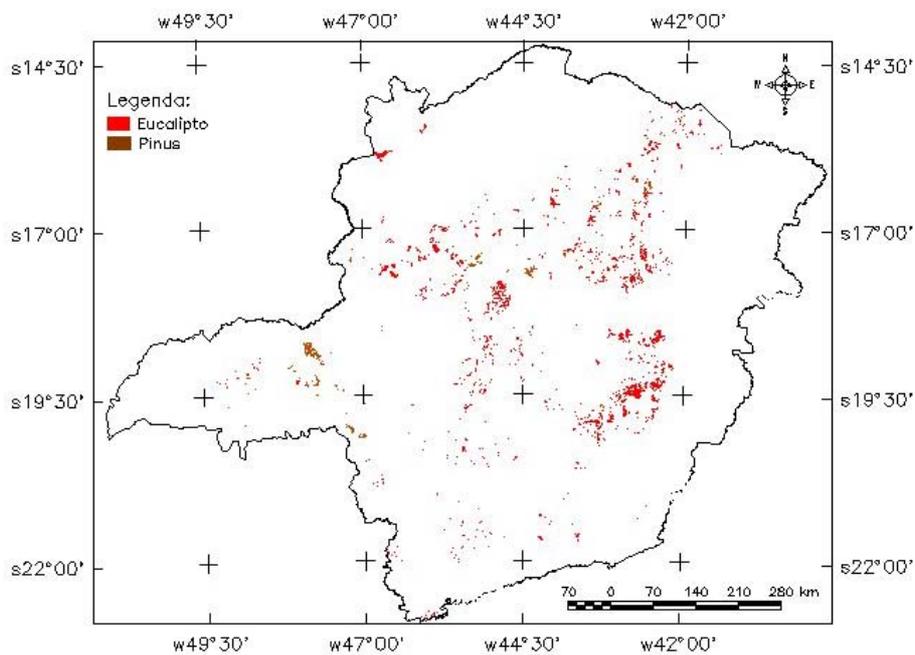
Devido ao curto ciclo de produção, constante corte e intenso plantio, torna plausível postular que a subestimativa de 122.464 ha (11.46%) talvez esta relacionada não somente a processos de mistura espectral, erros de classificação, entre outros,mas induz-nos a cogitar que a exploração dos recursos florestais (eucalipto) nas áreas de produção mapeadas possam ter influenciado neste resultado final de classificação do tema em questão.

Em algumas regiões específicas de plantio de eucalipto, Triângulo Mineiro e noroeste de Minas especificamente, há áreas com plantios geminados tanto de eucalipto quanto de pinus. Por isso, percebeu-se alguma confusão no processo de classificação, nas poucas áreas limitrofes dos plantios das duas espécies em questão.

As culturas de Eucalipto e Pinus possuem um comportamento espectral diferenciando quando comparadas com os demais alvos que estão situados nas suas circunvizinhanças. Tanto sua textura, densidade de plantio, forma geométrica (talhões) ao longo de uma paisagem irregular quanto a distribuição dos demais alvos e seu constante verdor fazem com que este possua um grau de discriminação diferenciado. Sua identificação torna-se mais fácil, inclusive nas análises visuais das imagens.



(a)



(b)

FIGURA 5.11 – Mapeamento das Classes Reflorestamento para as culturas Eucalipto e Pinus no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

Com relação às fitofisionomias Floresta Decídua (Caatinga), Floresta Semidecídua, as Figuras 5.14a e 5.14b, apresentam em ordem, o mapa de referência (Figura 5.14a) e o

obtido neste estudo (Figura 5.13b), respectivamente. A classe Floresta Decídua (Caatinga) compreendeu uma área total de 1.424.084 ha nos resultados obtidos pela classificação utilizando dados do sensor MODIS. Para o mapa de referência, esta mesma classe obteve um total de 1.668.300 ha, ou seja, o resultado deste trabalho subestimou o bioma Caatinga em 14.52%.

Esta classe encontra-se presente numa região de transição entre os biomas do Cerrado e da Floresta Semidecídua. Analisando a Figura 5.13 abaixo localizada pode-se perceber que na porção leste do Estado, houve uma subestimativa clara do bioma (em relação ao mapa de referência).

Devido ao seu comportamento espectral variável ao longo do ano e ao processo de mistura espectral que é acentuado nas bordas desta classe, que são também regiões passíveis de confusão espectral pela sua junção de diferentes tipos vegetacionais presentes em intervalos de área relativamente pequenos para que possam ser captados pelo sensor MODIS.

A forte participação do componente do solo neste bioma no período de queda das folhas (caducifolia) também representa um argumento coerente para a diferenciação relativa dos resultados encontrados em comparação com os de referência.

Por outro lado, a área mapeada para a fitofisionomia Florestal Semidecídua pelos dados do sensor MODIS foi de 5.969.593 ha e no mapa de referência um total de 5.448.107 ha. Em outras palavras, houve superestimativa em 9.57%, ou seja, um total de 521.486 ha foram identificados como pertencentes ao bioma sem realmente o pertencerem, tendo como referência o mapa utilizado nesta dissertação. Este bioma encontra-se inserido numa área de grande abrangência ao longo da região de estudo. A principal porção do referido bioma está localizada na parte leste do Estado de Minas Gerais, ocorrendo também ao sul e oeste nas regiões onde ocorrem maiores índices de precipitação.

Devido ao seu comportamento espectral constante ao longo do ano, remanescente em sua maior parte de tamanhos consideráveis e localização restrita a porção sudeste do Estado de Minas Gerais, sua caracterização foi mais facilmente efetuada quando

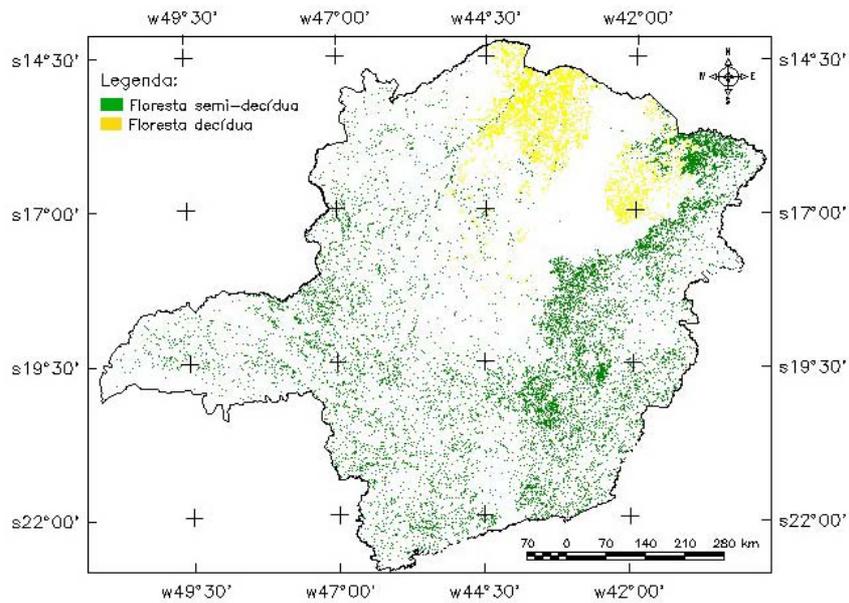
comparada às outras classes. No entanto, os fragmentos isolados e de menor área, não foram mapeados integralmente, o que ocasionou uma subestimativa do bioma, em relação ao mapa tido como referência.

Devido ao seu elevado grau de fragmentação ao longo de toda sua abrangência, sua identificação / mapeamento tornam-se complexas. A grande dispersão de pequenos fragmentos isolados em topos de morros e áreas de preservação permanentes, e sua grande área de transição entre os biomas o tornam um caso particular.

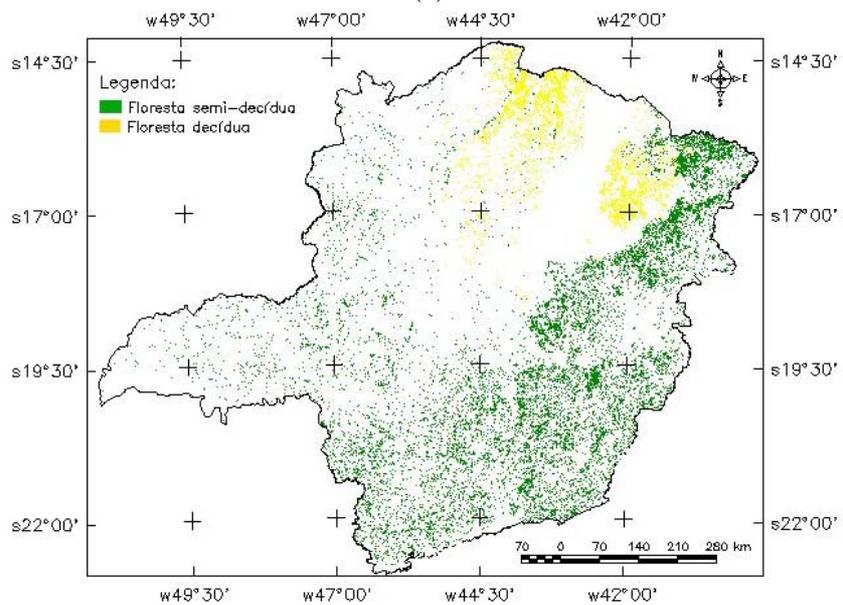
E por último, a fitofisionomia Floresta Ombrófila foi a que apresentou melhores resultados em termos de coerência entre os dois mapas (referência e o obtido nesta pesquisa). O mapa de referência apresenta um valor em área correspondente a 236.860 ha, já o resultado alcançado nesta dissertação foi 222.576 ha. Uma subestimativa de 14.284 ha ou 6.03 % de diferença.

A resolução espacial do sensor MODIS em relação ao TM/ETM+ contribui para que ocorram perdas de discriminação em algumas áreas do bioma que estão dispersas no mosaico da paisagem. O tamanho reduzido da maioria dos fragmentos dispersos juntamente com o processo de mistura espectral contribui para a perda da capacidade de mapeamento da Floresta Ombrófila.

Mais adiante, a visualização de áreas onde ocorreu uma fusão de fragmentos, resultando em polígonos de maior área, quando comparadas com os mesmos do sensor TM/ETM+ (mapa de referência) é demonstrada em maiores detalhes. A moderada resolução espacial do sensor MODIS, aliada ao maior grau de mistura espectral dos alvos ocasionada pela própria resolução espacial diminuiu as possibilidades de discriminar (identificar) pequenos fragmentos.



(a)

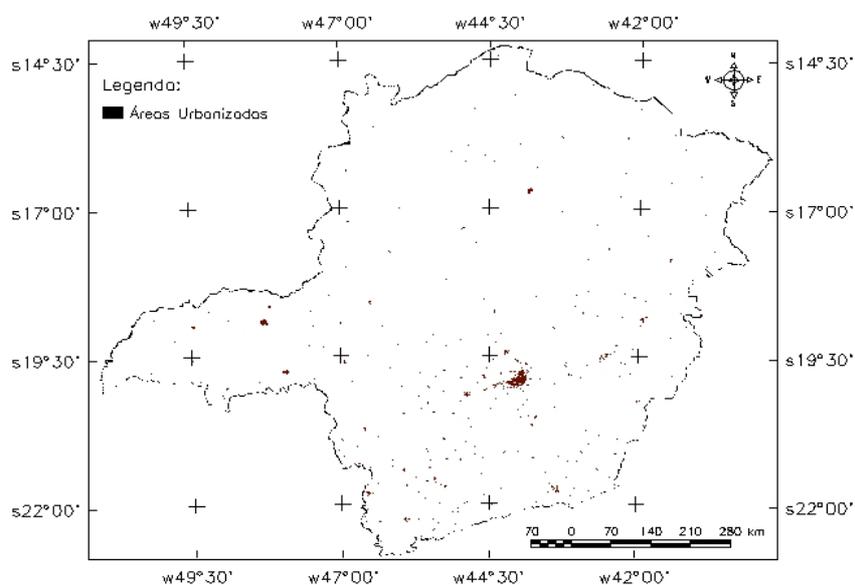


(b)

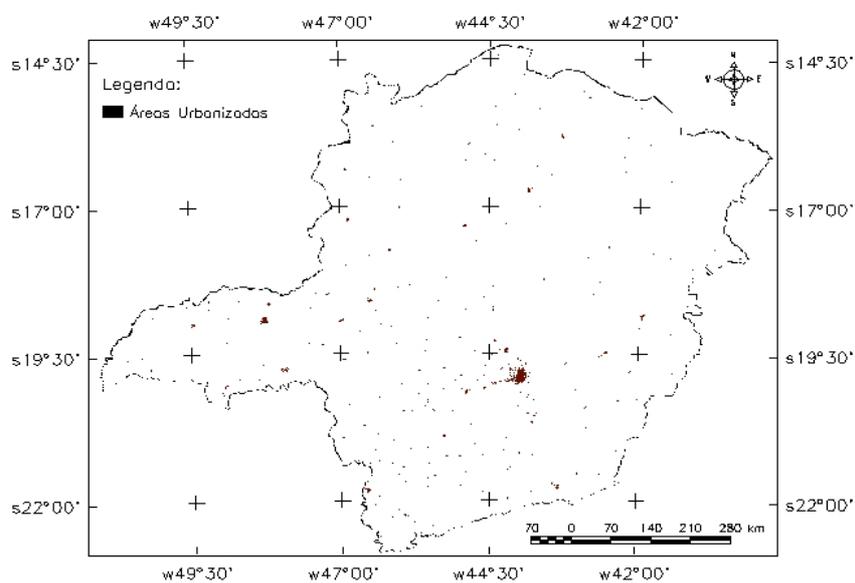
FIGURA 5.12 – Mapeamento das fitofisionomias Floresta Estacional Decídua, Floresta Se midécídua e Floresta Ombrófila no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

As Figuras 5.15a e 5.15b, apresentam os mapas de referência e o mapa originado por este estudo a partir dos dados MODIS, respectivamente, para a classe Áreas Urbanizadas. Esta classe, assim como as demais, foi sensivelmente afetada pela

resolução espacial do sensor MODIS, onde uma subestimativa foi observada, com um total de 44.900 ha ou 14,89%. Como pode ser visto na Figura 5.15, um grande número de pequenas cidades não foi mapeada, principalmente no Triângulo Mineiro, além de toda a porção leste do Estado.



(a)



(b)

FIGURA 5.13 – Mapeamento da classe Áreas Urbanizadas no mapa de referência gerado pelo IEF/UFLA a partir dos dados dos sensores TM e ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento a partir de dados multitemporais do sensor MODIS (b).

Visando demonstrar de modo mais amplo e de forma gráfica (abrangendo todas as classes de vegetação) o desempenho do sensor MODIS no processo de classificação em comparação com a classificação de referência utilizada pode ser observada na Figura 5.6. De acordo com esta Figura, um aumento na discrepância entre os valores mapeados e de referência é observado quando analisamos especificamente as fitofisionomias do bioma Cerrado. A confusão espectral que ocorre entre suas diferentes feições reflete na perda da exatidão do mapeamento destas classes. Para a classe Cerrado Típico ocorre a maior divergência em relação ao mapa de referência e o resultado alcançado no mapeamento.

No entanto, conforme já discutido anteriormente, nota-se a similaridade em termos de valores de área para as classes que foram mais facilmente e precisamente identificadas e mapeadas. Neste caso pode-se notar tal semelhança nas classes / Floresta Ombrófila, Água e Áreas Urbanizadas, apesar das observações expostas nos parágrafos anteriores. Para demonstrar o desempenho dos dados MODIS para o mapeamento de fitofisionomias do Estado, a Figura 5.16 apresenta retângulos envolventes que demonstram a análise particular dos resultados adquiridos nestas regiões.

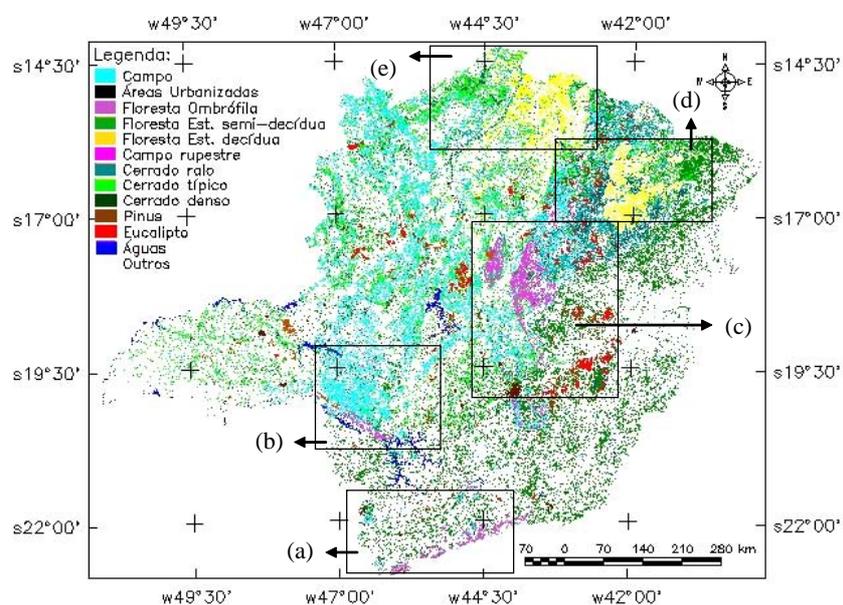


FIGURA 5.14 – Seleção de seis retângulos contendo distintas áreas mapeadas para a discussão dos resultados do mapeamento das classes consideradas neste estudo.

A primeira área em questão, corresponde a (letra a) da Figura 5.18. A região do extremo sul do Estado (Figura 5.18) trata de uma área aonde seis classes podem ser encontradas. Entre as classes podem ser citadas a Floresta Ombrófila, Eucalipto, Floresta Semidecídua, Campo, Águas e Áreas urbanizadas. Em particular, uma coerência é observada para as diferentes classes, entretanto a junção de polígonos menores para a formação de polígonos maiores foi observada. Outro aspecto é a ausência de polígonos menores, da Floresta Ombrófila que não foram possíveis ser mapeadas pelas técnicas aqui utilizadas para os dados MODIS.

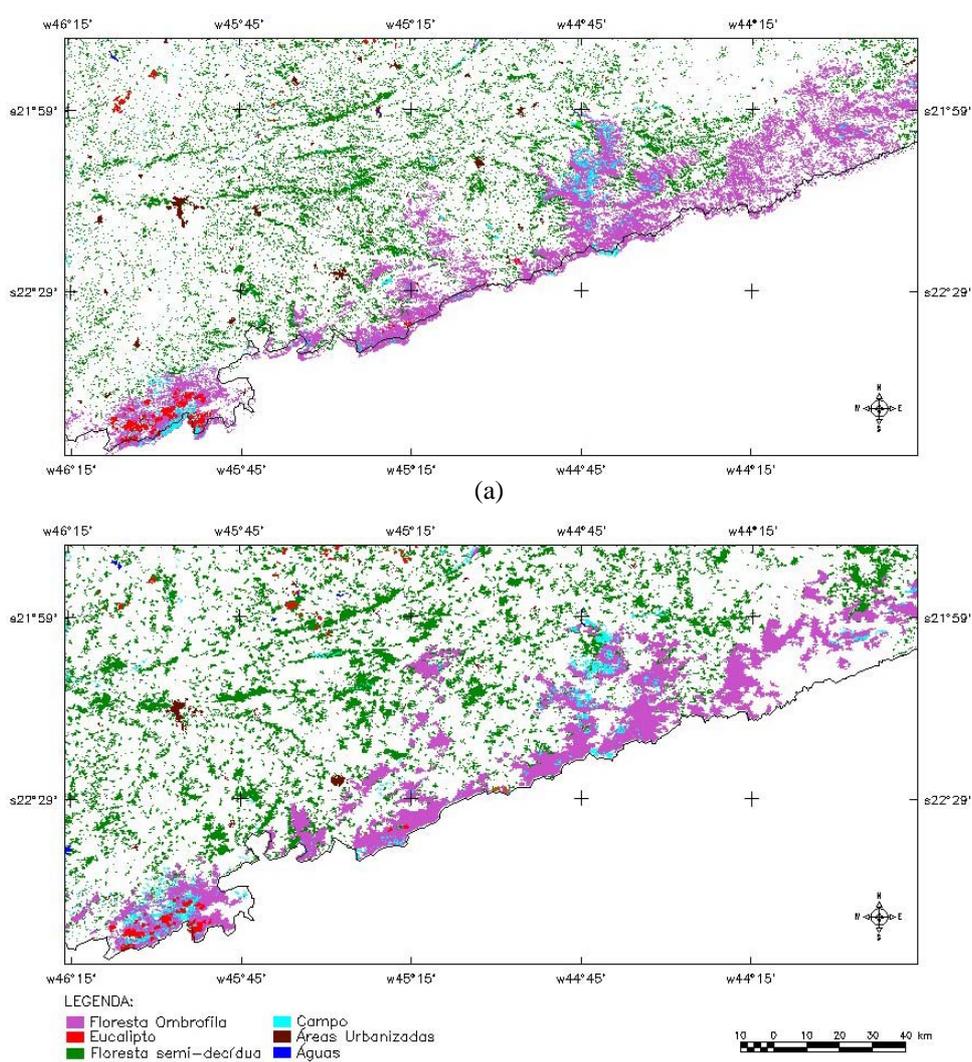
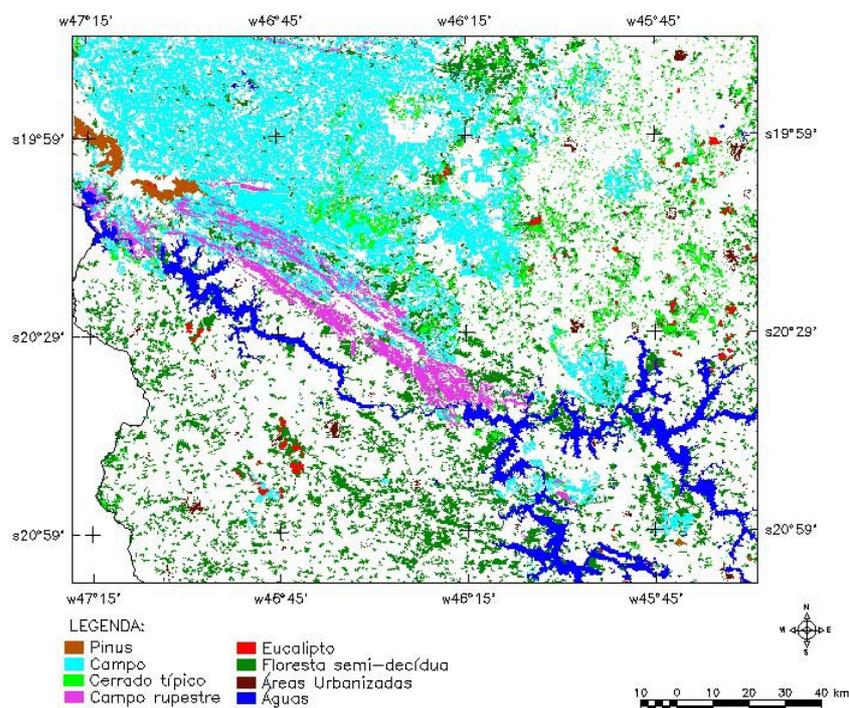


FIGURA 5.15 – Mapeamento da porção sul do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).

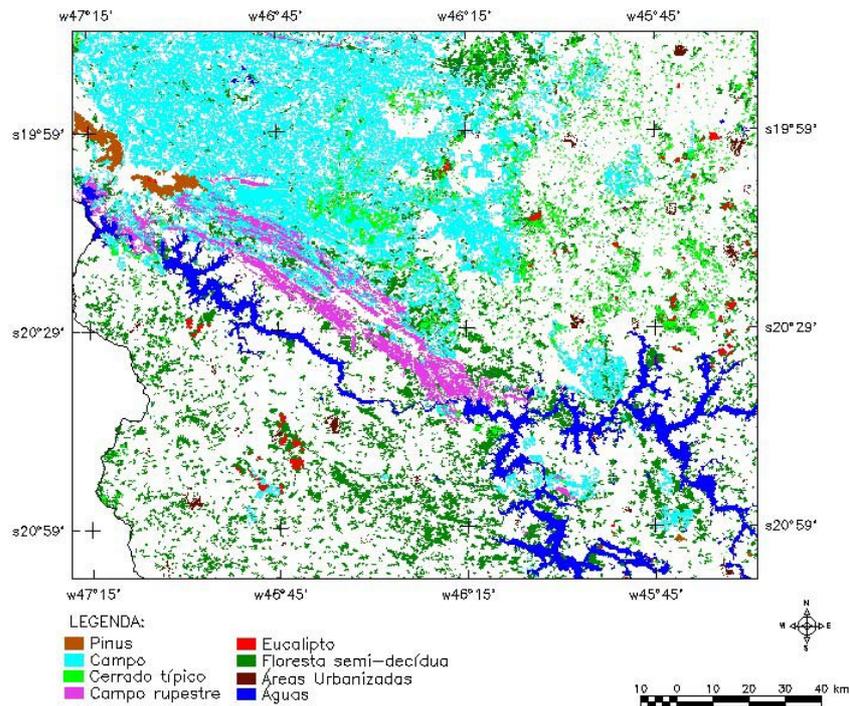
A segunda área considera (letra b) trata de uma área localizada no sudoeste do Estado aonde oito classes correspondem ao retângulo considerado (Figura 5.19). Nesta Figura, a junção de polígonos pode ser observada para Campos em relação a Campos Rupestres e Cerrado Típico. Outros aspectos a serem observados, é a superestimativa da fitofisionomia Floresta Semidecídua, além da semelhança da distribuição e estimativa de área para a classe Água e por fim, a alteração das áreas de reflorestamento de Pinus em função da provável dinâmica destas áreas.



(a)

(Continua)

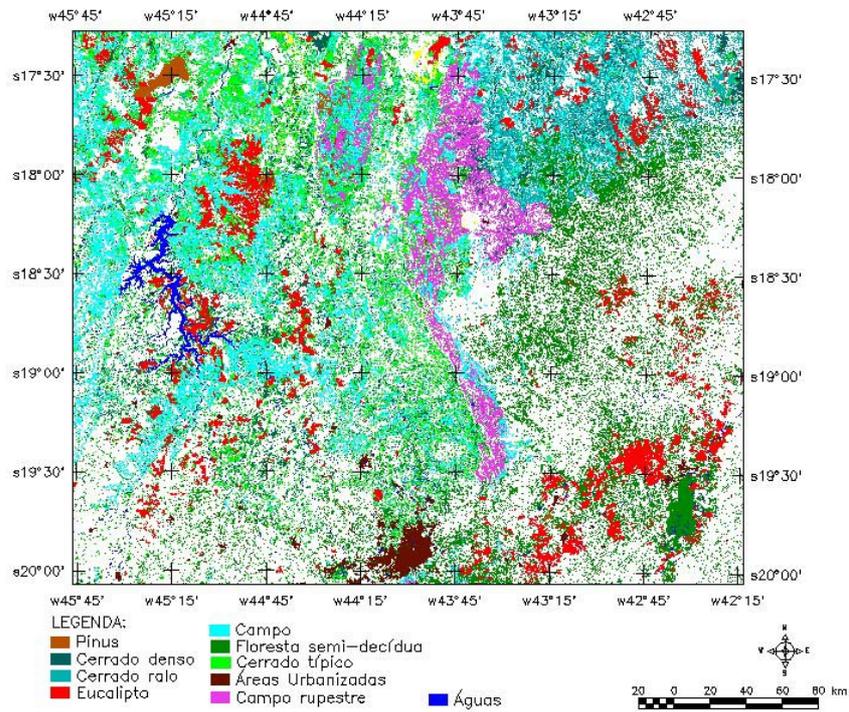
FIGURA 5.16 – Continuação.



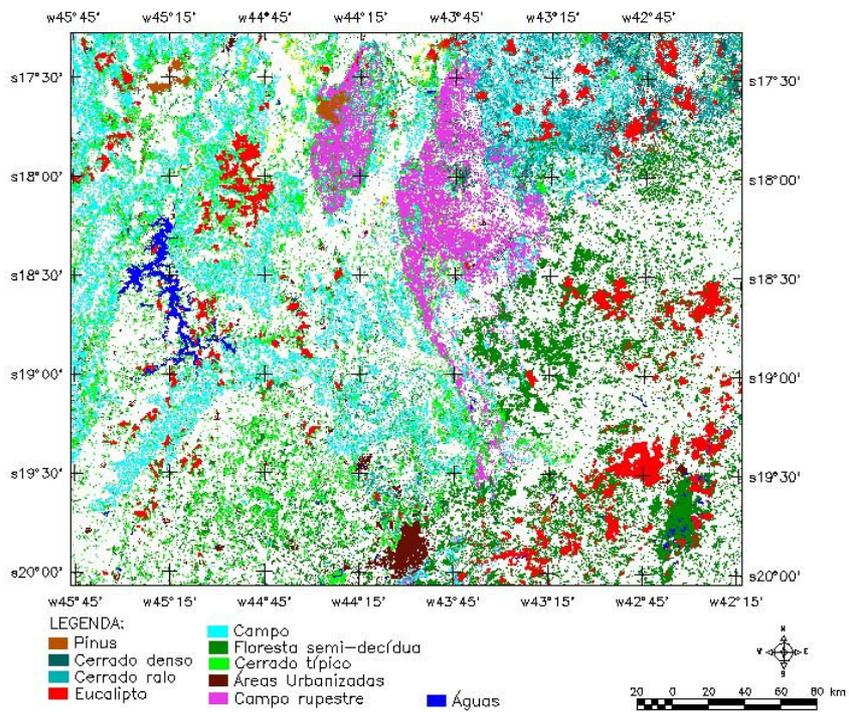
(b)

FIGURA 5.16 – Mapeamento da porção sudoeste do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais MODIS (b).

Alterações dos polígonos para Floresta Semidecídua, além da correspondência entre as classes Água e superestimativa da fitofisionomia Campos Rupestres também pode ser encontrada na Figura 5.20 que ilustra a letra c da Figura 5.17. A Figura 5.20 representa a parte central do Estado onde pode-se observar uma superestimativa da fitofisionomia Cerrado Típico em algumas áreas de Campo e vice-versa e da fitofisionomia Cerrado Ralo para Campos Rupestres. Outro aspecto observado são alterações significativas das áreas de reflorestamento de Eucalipto e Pinus, principalmente.



(a)



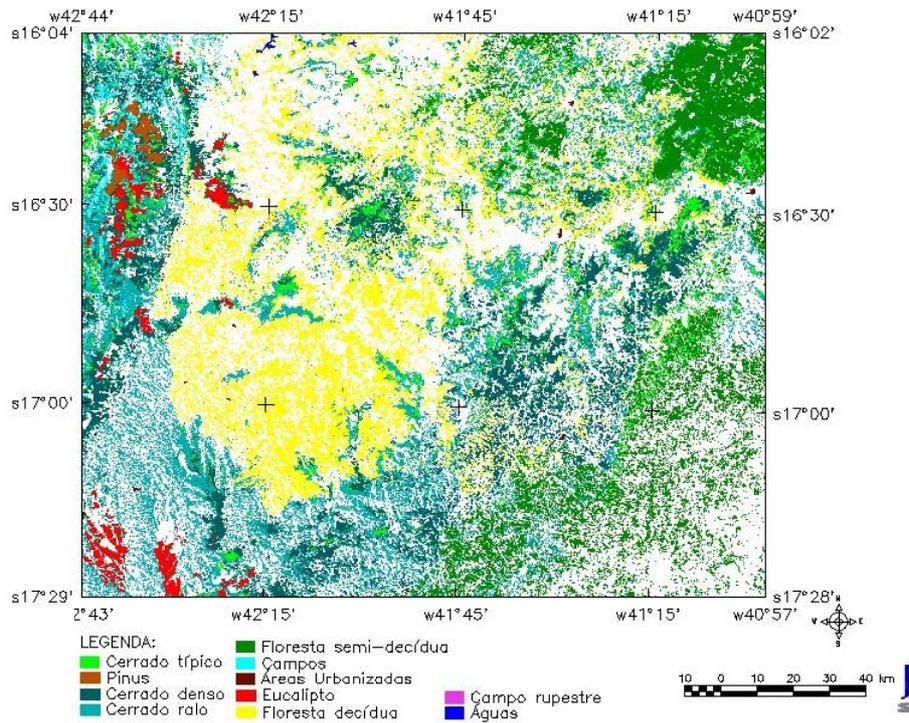
(b)

FIGURA 5.17 – Mapeamento da porção central do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).

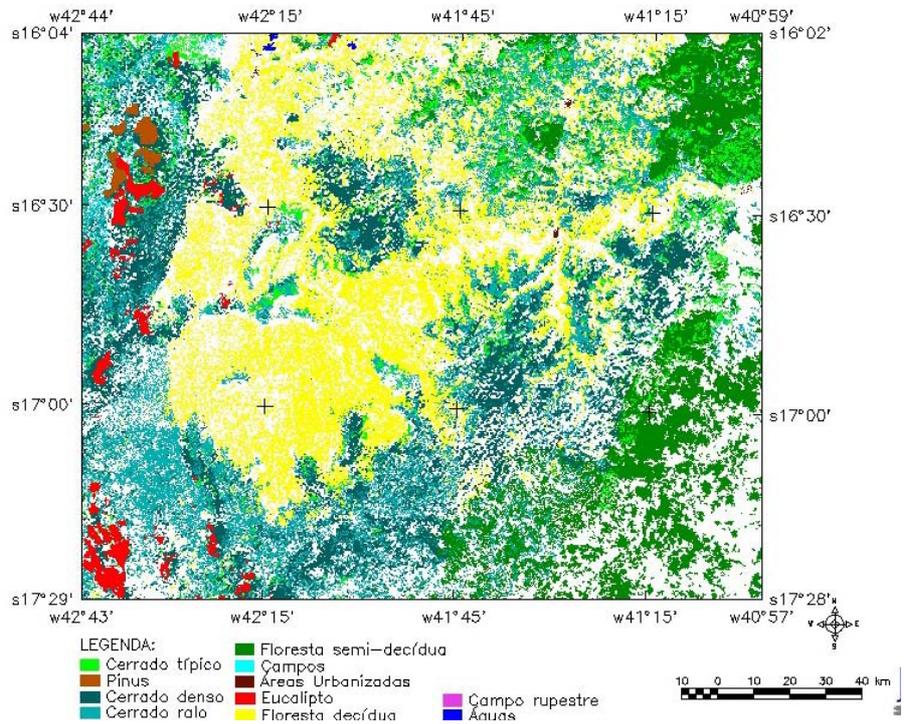
A Figura 5.21 que representa a letra d das áreas selecionadas para análise na Figura 5.17 mostra a porção nordeste do Estado onde superestimativas para as fitofisionomias Floresta Semidecídua, Cerrado Denso e Cerrado Ralo foram encontradas. Por outro lado, subestimativa ocorreu para Floresta Decídua. Uma confusão entre o classificador para a porção superior foi observada para Cerrado Denso e reflorestamento de Eucalipto, e dinâmicas das áreas reflorestadas com Eucalipto e Pinus também foram encontradas.

Para a região noroeste, indicação da letra e das áreas selecionadas da Figura 5.17, a Figura 5.22 mostra a distribuição espacial de oito classes de uso. Uma adequada caracterização das classes Água e Floresta Decídua, e uma subestimativa para Cerrado Típico foi encontrada.

Para a região sudoeste, a Figura 5.23 (letra f) mostra a distribuição espacial de sete classes de uso. Novamente, uma correspondente da classe Água foi encontrada, enquanto que uma subestimação da Floresta Semidecídua é encontrada para esta região particular do Estado. Áreas destinadas a reflorestamentos, como os de Pinus e Eucalipto também sofreram significativas alterações como as observadas para as demais áreas do Estado.

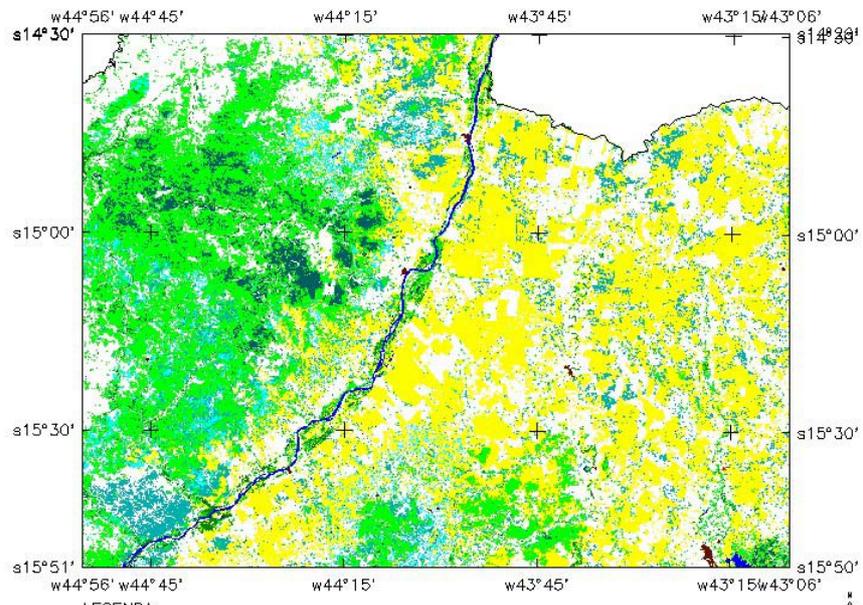


(a)

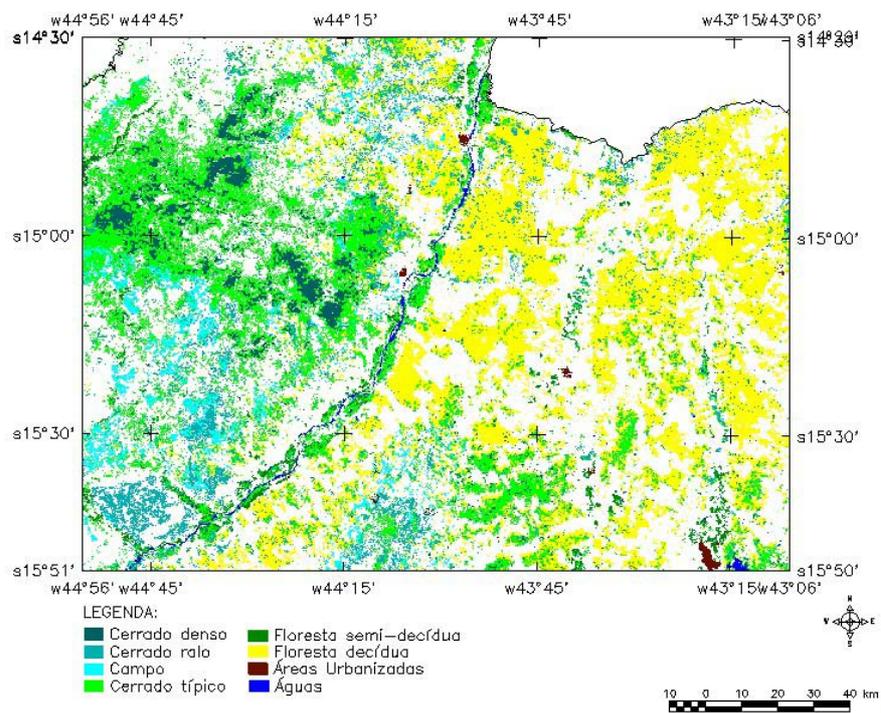


(b)

FIGURA 5.18 – Mapeamento da porção nordeste do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).

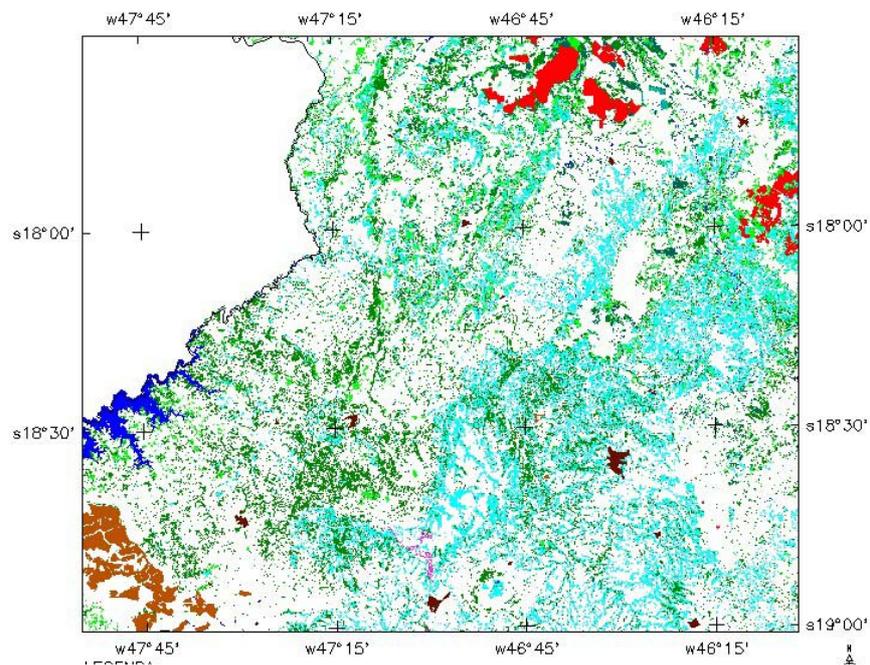


(a)

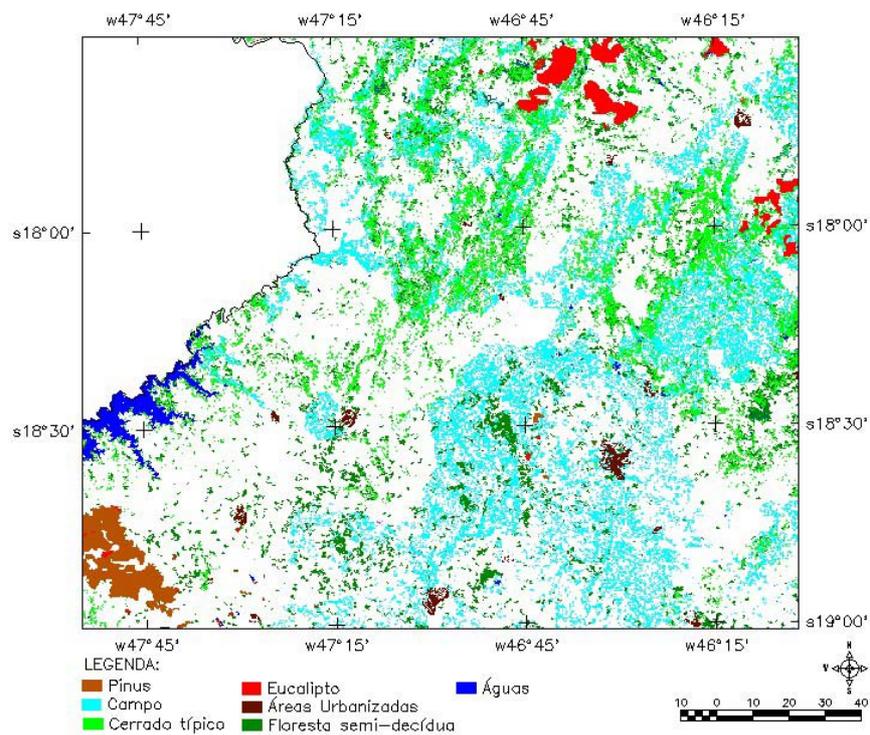


(b)

FIGURA 5.19 – Mapeamento da porção norte do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).



(a)



(b)

FIGURA 5.20 – Mapeamento da porção sudoeste do Estado de Minas Gerais considerando os dados dos sensores TM/ETM+ das plataformas Landsat 5 e 7 (letra a) e o mapeamento considerando os dados multitemporais do sensor MODIS (b).

CAPITULO 6

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho de classificação da cobertura vegetal do Estado de Minas Gerais por meio do uso de imagens multitemporais MODIS permitem fazer as seguintes conclusões abaixo citadas. Para facilitar a compreensão das mesmas, estas serão tratadas em tópicos que se seguem.

Em relação a aplicação do algoritmo de restauração de imagens multitemporais do sensor MODIS, pode-se concluir que:

- A aplicação do algoritmo propiciou um ganho no conteúdo informativo presente em cada uma das bandas utilizadas. Uma alteração na variância e uma manutenção nos valores médios foram encontradas.
- Observou-se uma melhoria na capacidade de interpretação visual para os dados restaurados, o que permitiu maior nitidez nas regiões de transição entre altas frequências (bordas), principalmente.

Em relação a aplicação de índice de vegetação (NDVI), pôde-se concluir que:

- As fitofisionomias em análise mostraram perfis de índices de vegetação representativos das dinâmicas sazonais da vegetação, com maiores valores ocorrendo na estação chuvosa (outubro a abril) e menores para a estação seca (maio a setembro), respectivamente, conforme preconizado na literatura;
- Os perfis do índice de vegetação mostraram um padrão em relação a precipitação, no qual o máximo verdor foi menor para formações herbáceas do que para fitofisionomias de estrato arbóreo;

- O máximo contraste sazonal observado corresponde à Floresta Decídua (bioma Caatinga), enquanto que o menor constraste sazonal à Floresta Ombrófila (bioma Mata Atlântica); e

Em relação a aplicação da Transformação de Principais Componentes (TCP), pôde-se concluir que:

- Em relação à primeira componente (PC1), conforme indicação dos auto-vetores, a mesma refletiu as variações da reflectância média do sensor MODIS em suas quatro bandas espectrais;
- Em relação à segunda componente (PC2), pôde-se perceber que esta foi fortemente influenciada pelas bandas do vermelho e IVP, ou pelas suas relações de covariância negativas para as diferentes datas analisadas, principalmente para ago/Aqua, set/Aqua e set/Terra (estação seca); e
- Os valores dos auto-vetores para uma mesma data (ou entre datas) estiveram associados, principalmente, com o vigor da vegetação ou com a sua sazonalidade.

Em relação a aplicação do modelo linear de mistura espectral, pôde-se concluir que:

- A utilização da técnica do Modelo Linear de Mistura Espectral mostrou-se bastante eficiente para detecção da hidrografia da área de estudo e da classe Campo.

Em relação aos trabalhos de campo, pôde-se concluir que:

- Um total de 898 pontos foram observados permitindo caracterizar cada fitofisionomia sob análise;
- A utilização dos pontos produziu uma exatidão global de 0,86 e um Kappa de 0,84 para o dado da UFLA e 0,75 e 0,73, indicando que ambos foram satisfatórios e bons de acordo com o preconizado pela literatura;

Em relação aos resultados obtidos pelos processos de mapeamento, pôde-se concluir que:

- A utilização de dados multitemporais foram importantes para diferentes fitofisionomias as quais possuem relação intrínseca com os efeitos sazonais e conseqüentemente uma alternância nas respostas espectrais obtidas. Estas mudanças sazonais são portanto importantes para a identificação e delimitação de determinados grupos fitofisionômicos; e
- Observou-se coerências entre mapas de referência e o obtido por este estudo para classes Floresta Ombrófila e Pinus, enquanto para Floresta Estacional Semidecídua, Cerrado Típico e Cerrado Denso foram menos satisfatórios;
- Contatou-se que as diferenças entre classes foram variadas e de acordo com especificidades de cada classe analisada. A Água por exemplo, em função da resolução espacial. Para outras classes como Eucalipto as diferenças podem estar associadas à rotatividade da cultura. E por fim, as diferenças entre as aquisições das imagens também podem influenciar nos resultados observados.

E finalmente, em relação aos resultados obtidos por este estudo, pôde-se concluir que:

- Considerando-se que os dados oriundos do sensor MODIS são disponibilizados gratuitamente, e que apresentam elevado grau de pre- processamento (correção atmosférica e georreferenciamento) e possuem alta resolução temporal de aquisição de informações (duas passagens diárias), conclui-se que tais dados podem efetivamente ser aplicados em estudos de monitoramento e classificação da cobertura da terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Mineira de Defesa do Ambiente. (AMDA) Mata Seca está sob ameaça. **Ambiente Hoje**, v. 120, p. 24, set. 2005.

Anderson, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal de Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS**. 2004. 247p. (INPE-12290-TDI/986). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

Anderson, L.O; Latorre, M. L. ; Shimabukuro, Y. E.; Arai, E.; Carvalho-junior, O.A **Sensor MODIS : uma abordagem geral**. São José dos Campos -SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -INPE, 2003. 86 p. (RPQ / 752).

Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E; Lima, A.; Medeiros, J. S. Mapeamento da cobertura da terra do Estado do Mato Grosso através da utilização de dados multitemporais do sensor MODIS. **Geografia**, v.30, n.2, p.365-380, 2005.

Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E; DeFreis, R. S.; Morton, D. Assessment of deforestation in near real time over the Brazilian Amazon multitemporal fraction images derived from Terra MODIS. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v.2, n.3, p.315-318, 2005.

Arai, E; Freitas, R.M.;Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E Análise radiométrica de imagens MOD09 em 16 bits e 8 bits. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. **Anais...** Goiânia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005. p. 3983-3990.

Becker, B.K; A Amazônia e a política ambiental brasileira. **GEOgraphia: Revista do Curso de Pós - Graduação em Geografia - UFF**, v.11, p. 119, jan. 2004.

Boggione, G.A; **Restauração de imagens do satélite LANDSAT-7**. 2003. 162p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

Camara, G; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M; Garrido, J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling.** **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Carreiras, J.M.B.; Shimabukuro, Y.E.; Pereira, J. M.C.; Stroppiana, D. Fraction images derived from SPOT- 4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 23, p. 4979-4983, 2002.

Carvalho, L.M.T. **Mapping and Monitoring Forest Remnants. A multiscale analysis of spatio-temporal data.** 2001. 138p. Tese (Doutorado em Geociências) - Wageningen University, Wageningen, 2001.

Colwell, R.N. **Manual of Remote Sensing.** 2. ed. [S. l.]: American Society of Photogrammetry, 1983. 579 p.

Crosta, A. P. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Campinas: IG UNICAMP, 1992. 164 p.

Curran, J.P. **Principles of Remote Sensing.** New York : Longman Publishing Group, 1986. 282 p.

DeFries, R.S.; Houghton, R.A.; Hansen, M.C.; Fiedl, C.B.; Skole, D. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for 1980s and 1990s. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America.** V. 99, n. 22, p. 14256-14261, 2002.

Ferreira, M.E. **Análise do modelo linear de mistura espectral na discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (Bioma Cerrado).** 2003. 127p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2003.

Florenzano, T.G.; **Imagens de satélite para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos. 2002. 97 p.

Fonseca, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR.** 1988. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1988.

Fonseca, L.M.G.; **Método para restauração e reamostragem de imagens do sensor TM**. São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1988. 14 p. (PI INPE-4491-PRE /1255)

FRANÇA, Andréia Maria da Silva. **Aplicação de sensoriamento remoto no estudo da influência da dinâmica sazonal do rio Amazonas sobre a morfologia dos sistemas lacustres**. 2005-03-29. (INPE--TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Fundação Biodiversitas ; **Biodiversidade em Minas Gerais** . Belo Horizonte, Fundação Vale do Rio Doce, 2004. (Mapa Topográfico. Escala 1: 250.000).

Galvão, L. S.; Vitorello, I.; Formaggio, A. R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, v.61, n.1, p.24-33, 1997.

Galvão, L. S.; Vitorello, I.; Paradella, W. R. Spectroradiometric discrimination of laterites with principal components analysis and additive modelling. **Remote Sensing of Environment**, v. 53, n. 1, p. 70-75, 1995.

Galvão, L.S.; Pizarro, M.A.; Epiphanyo, J.C.N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral - chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 75, n. 2, p. 245-255, 2001.

Hansen, M.C.; DeFries, R.S.; Townshend, J.R.G.; Marufu, L.; Sohlberg, R. Development of MODIS tree cover validation data set for Western Province, Zambia.. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

Hoffer, R. M. **Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data**. New York: McGraw Hill , 1978. 228 p.

Hu, B.; Miller, J. R.; Chen, J.M Retrieval of the canopy leaf area index in the BOREAS flux tower sites using linear spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.89, p. 176-188, 2004.

Huete, A.R; Liu, H.Q.; Batchily, K.; Van Leeuwen, W.A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS.. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

Huete, A; Justice, C. **MODIS VEGETATION INDEX (MOD13) Algorithm Theoretical Basis Document**. n. Version 3, p. 120, abr. 1999 Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/land_atbd.php>. Acesso em: 19 maio 2005.

IBGE. **Manual técnico da vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1992, 97p.

Jensen, J.; **Remote sensing of the environment : an earth resource perspective**. New York: Prantice Hall, 2000. 544 p.

Justice, C. O.; Vermote, E.; Townshend, J. R. G.; DeFries, R.; Roy, D. P.; Halt. D. K.; Salomonson, V. V.; Privete, J. L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, R. B.; Knyazikhin, Y.; Running, S. W.; Nemani, R. R.; Zhengming W.; Huete, A. R.; van Leeuwen, W.; Wolfe, R. E.; Giglio, L.; Muller, J.; Lewis, P. Bransley, M. J. The moderate resolution spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249, 1998.

Justice, C.O; Giglio, L. ; Korontzi, S. ; Owes, J. ; Morisette, J. T. ; Roy, D.; Descloitres, J. ; Alleaume, S. ; Petitcolin, F. ; Kaufman, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 244-262, 2002.

Kaufman, Y. J.; Herring, D. D.; Ranson, K. J.; Collatz, G. J. Earth Observing System AM1 mission to Earth. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1045-1055, 1998.

Kumar, R.; **Radiation from plants-reflection and emission: a review** . Lafayette: Purdue Research Foundation, 1972. 88 p.

Latorre, M.L; Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E.; junior, O.A.C Senor Modis : características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 97-126, 2003.

Liesenber, V. Monitoramento global e regional da cobertura vegetal: Uma abordagem dos atuais Sistemas de Observação da Terra. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 7, p. 115-128, 2005.

Liesenberg, V. **Análise multiangular de fitofisionomias do bioma Cerrado com dados do sensor MISR/TERRA**. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos 2006.

Liesenberg, V.; Galvão, L.S.; Ponzoni, F.J. Variations in reflectance with seasonality and viewing geometry: implications for classification of Brazilian savanna physiognomies with MISR/Terra data. **Remote Sensing of Environment**, v. 107, n. 1/2, p. 276-286, Mar. 2007.

Martins, C. S. Caracterização física e fitogeográfica de Minas Gerais. In: Mendonça, M.P; Lins, L.V. **Lista Vermelha das Espécies Ameaçadas de Extinção da Flora de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Zoo Botânica de Belo Horizonte, 2000. 78 p.

Mather, P. M; **Computer Processing of Remotely-Sensed Images**. West Sussex: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

Meliá, J.; Gilabert, M.A.; García - Haro, F.J. A Mixture modeling approach to estimate vegetation parameters for heterogeneous canopies in remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, n.72, p. 328-345, 2000.

Moreira, A.A.N; Camelier, C. Relevo e Vegetação. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geografia do Brasil - Região Sudeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. v. 5, Cap. 2, p. 667.

Moreira, M. A; **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa - MG: UFV, 2003. 307 p.

Moreira, M. A; Shimabukuro, Y.E. Cálculo do Índice de Vegetação a Partir do Sensor AVHRR. In: Ferreira, N.J. **Aplicações Ambientais Brasileiras dos Satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2004. Cap. 4, p. 271.

Myers, N.; Mittermeier, R. A.; Mittermeier, C. G.; Fonseca, G. A. B.; Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 1, p. 124-32, 2000.

NASA: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – NASA's Earth Observing System, 2003.

Nimer, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.

Nimer, E. **Geografia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 667 p.

Parkinson, C.L.; Greenstone, E. **EOS data products handbook**. vol. 2. Maryland - USA: NASA, 2000. 253 p.

Pastor, C.Q. **Aplicación del modelo de mezclas espectrales en la teledetección forestal**. 2002. 222p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidad de Valladolid, Valladolid, 2002.

Piromal, R. A. S. **Avaliação do modelo 5-scale para simular valores de refletância de unidades da paisagem na floresta nacional do Tapajós**. 2006-05-05. Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006. Disponível em: <<http://mtc-m17.sid.inpe.br/rep-/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/07.14.17.14>>. Acesso em: 06 jun. 2007.

Ponzoni, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: **Sensoriamento Remoto Refletância dos Alvos Naturais**. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2001. Cap. 5, p. 261.

RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SF. 23/24 – Rio de Janeiro / Vitória. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1983. 777 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.32).

RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SE. 24 – Rio Doce. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1987. 545 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.34).

RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SD. 23 - Brasília. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1982. 660 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.29).

Ratana, P.; Huete, A.R.; Ferreira, L.G. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal-temporal domain. **Earth Interactions**, v. 9, n.3, p. 1-22, 2005.

Ribeiro, J. F; Walter, B. M.T Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano, S.M; Almeida, S.P **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, DF: EMBRAPA, 1998. Cap. III, p. 556.

Rizzini, C.T; **Tratado de fitogeografia do Brasil**. Rio de Janeiro: Âmbito Cultural, 1997. 747 p.

Rodriguez Yi, J. L.; Shimabukuro, Y.E.; Rudorff, B.F.T. Image segmentation for classification of vegetation using NOAA / AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 167-172, 2000.

Santos, J. R. Biomassa aérea da vegetação de cerrado: estimativa e correlação com dados do sensor "Thematic Mapper" do satélite Landsat. 1988. 130p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba 1988.

Schowengerdt, R.A; **Remote sensing - models and methods for image processing**. Tucson - USA: Academic Press, 1997. 522 p.

Shimabukuro, Y.E.; Smith. J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

Shimabukuro, Y.E; Batista, G.T., Mello, E.M.K., Moreira, J.C., Duarte, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of Amazon Region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 3, n. 19, p. 535-541, 1998.

Shimabukuro, Y.E. **Shade images derived from linear mixing models of multispectral measurements of forested areas**. 1987. 274p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Colorado State University, Colorado -USA 1987.

SILVA, T. S. F. **Avaliação da Aplicabilidade de Imagens EOS-MODIS e Landsat TM no Estudo da Dinâmica Espaço-Temporal das Comunidades de Macrófitas em Lagos da Planície de Inundação Amazônica**. 2004. 120p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos *não publicado*.

Strahler, A.; Muchoney, D.; Borak, J.; Friedl, M.; Gopal, S.; Lambin, E.; Moody, A. MODIS land cover and land-cover change products algorithm theoretical basis document (ATBD). **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, p. 1254-1269, 1999.

Tarpley, J. D., S. R. Schneider and R. L. Money. Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellite. **Journal of Climate Applied Meteorology**, v. 23, p. 491-494, 1984.

Thiam, A.; Eastman, R. **Principles of Remote Sensing and Image Processing**. Rwanda: IDRISI, 1999. 170 p.

Townshend, J. R. G.; Justice C.; Li, W.; Gurney, C.; McManus, J. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 2-3, p. 243-255, 1991.

Triola, M.F.; **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 2005. 656 p

Verbyla, D.; **Satellite remote sensing of natural resources**. New York – USA: CRC, 1995. 198p.

Vermote, E.; El Saleous, N.; Justice, C. Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: first results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 97-111, 2002.

Vermote, E.F.; Vermeulen, A. Algorithm Theoretical Basis Document. Disponível em: <moadarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/ATBD/atbd_mod08.pdf>. Acesso em 23 fevereiro 2005.

Zhang, X; Friedl, M.A.; Schaaf, C.B.; Strahler, A.H.; Hodges, J.C.F.; Gao, F.; Reed, B.C.; Huete, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.