



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12290-TDI/986

**CLASSIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DA COBERTURA
VEGETAL DO ESTADO DO MATO GROSSO UTILIZANDO
DADOS MULTITEMPORAIS DO SENSOR MODIS**

Liana Oighenstein Anderson

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Yosio Edemir Shimabukuro, aprovada em 25 de junho de 2004.

INPE
São José dos Campos
2005

528.711.7 (817.1 A/Z)

ANDERSON, L. O.

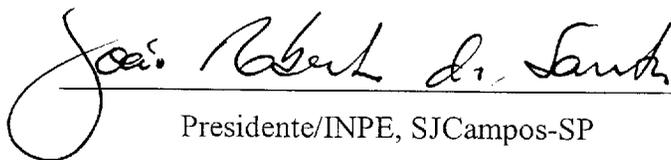
Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do estado do Mato Grosso utilizando dados multitemporais do sensor MODIS / L. O. Anderson.- São José dos Campos: INPE, 2004.

247p. – (INPE-12290-TDI/986).

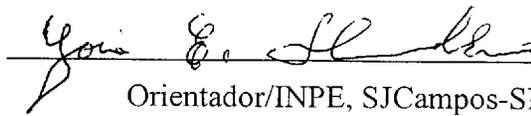
1.Mato Grosso (MT). 2.Sensor MODIS. 3..Monitoramento da Cobertura da Terra. 4.Detecção de mudanças naturais e antrópicas. 5.Sensoriamento Remoto. I.Título.

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

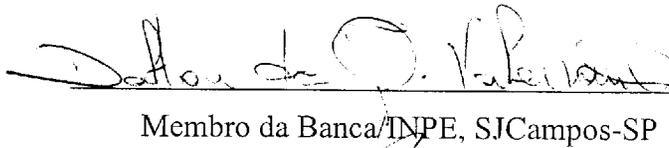
Dr. João Roberto dos Santos


Presidente/INPE, SJCampos-SP

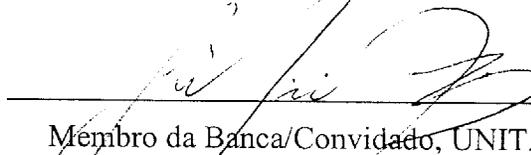
Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Dalton de Morisson Valeriano


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

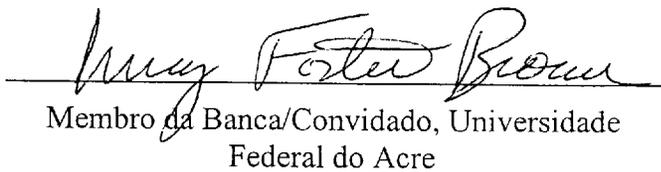
Dr. Getúlio Teixeira Batista


Membro da Banca/Convidado, UNITAU-SP

Dr. Fernando Roberto Martins


Membro da Banca/Convidado, UNICAMP-SP

Dr. Irving Foster Brown


Membro da Banca/Convidado, Universidade
Federal do Acre

Aluno(a): Liana Oighenstein Anderson

São José dos Campos, 25 de junho de 2004.

O maior crime que podemos cometer contra a vida, contra a teia da vida, é perpetuar a ignorância. O conhecimento deve circular como o vento, ser livre de fronteiras, de culturas, de preconceitos e atingir a todos, como o ar que respiramos.

A PATCHA MAMA

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Yosio pela oportunidade, por sempre apoiar e acreditar no meu esforço, pela amizade, paciência, orientação no trabalho e conselhos na vida desde que nos conhecemos.

À minha família, meu pai, minha mãe, Walter, Pedro, Ione, Dinéia, David, Sylvia, Diney, Daniel, Eduardo e Norma pelo amor incondicional, compreensão e apoio, mesmo durante toda minha ausência.

Aos meus amigos da turma 2002: Brummer, Félix, Ieda, Gelelete, Eddy, Pierre, Cícero, Silvio, Willian, Cleber, Paula (em memória), Lucyana, Enzo, pelo companheirismo, aprendizado, e pelas noites de estudos e festas compartilhadas.

Aos meus amigos Brummer e Felix por todo amor e profunda amizade desde sempre, por tornar minha vida mais feliz e completa.

Aos meus amigos dos laboratórios que trabalhei (LTID, Sala Florestas/Agricultura, UMD) Marcos, Ramon, Brummer, Luciana, Vivi, Xavier, Clério, Brenner, Fernando, Jan, Carolina, Didier e Douglas por sempre estarem dispostos a me ajudar e a conversar sobre sensoriamento e as questões filosóficas da vida.

Aos meus amigos do INPE, meu irmão André Grilo, Eliana, Tiago, Andreia, Monstro, Rizzi, Cíntia, Thiago, Rogério, Sylvia Ratón, Bel, Ale, Luciana, Giboti, Melissa, Salete, Viviane, Paulo Eduardo, Kaká, Roberta, Latão, e Lucca, Paulino e Júlio (LTID).

Aos professores Bernardo, Valdete, Egídio, João Roberto, Nelsinho, Simeão e Felgueiras por sempre me ajudarem, e pelos conselhos no trabalho. Aos meus professores das disciplinas Dalton, Diógenes, Júlio, Evlyn, Getúlio, Flávio, Maurício, Lorenzetti, Epiphany, Crepani, Viane, Guaraci e Câmara.

As secretárias Etel, Ange, Tamara e Cris pela ajuda durante o curso.

À Dra. Ruth, Matt, Douglas, Ellen, Latorre, Yosio, Aragão, Fernando, Viane, Félix e Camilo pela oportunidade e aprendizado durante os trabalhos de campo.

Aos meus amigos do Pólo Aquático, principalmente ao Psicopata, pelo apoio e força nos dias mais difíceis, aos meus amigos da Capoeira Besouro Mangangá, em especial ao mestre Lobão, Rico, Vicente e Zé Maria, pelos ensinamentos da vida, aos amigos do futebol do INPE, pela paciência e carinho.

Aos meus amigos de Campinas: Ricardo, Cintia Cogu, Tubão, Sandra, Tehra, Christian, Cristiano, Breno, Lidy, MC Amaral, Volker, Cida, por todo o caminho trilhado juntos; às minhas amigas de SJC, Thais, Tininha e Susana por todos os anos de amizade, ao meu amigo Carlão (UENF).

À Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro e pelas viagens a congressos nacionais.

À FAPESP, pelo financiamento do projeto (Proc. 2003/01727-0).

Aos guardas, em especial aos do terceiro turno pela companhia e preocupação, aos amigos da piscina da ADC: Romildo, Eduardo, Luizão e Nelsinho e aos amigos da cantina da ADC por todo apoio.

RESUMO

Em uma escala global, a mudança do uso da terra e da cobertura vegetal está ocorrendo em passos acelerados, principalmente nos trópicos. Estas mudanças nos ecossistemas terrestres estão fortemente associadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico principalmente em países subdesenvolvidos, onde não se encontram planejamentos para a ocupação do território, nem projetos e estudos para explorar de maneira sustentável os recursos da terra. Com a facilidade de acesso a um número cada vez maior de informações provenientes do Sensoriamento Remoto, a utilização de novos sensores, com melhores resoluções espacial, temporal e espectral, tem se mostrado extremamente importante para um melhor entendimento dos processos ecológicos e antrópicos que agem nos sistemas terrestres. Neste contexto, foi selecionado para a realização desta pesquisa o Estado do Mato Grosso, uma região que possui diversas formações vegetais e que vem sofrendo grandes mudanças no uso e cobertura da terra, e o sensor MODIS, que possui características de resolução espectral, espacial e temporal que possibilitam uma melhoria na qualidade e acurácia de estudos em escalas regional e global. Este trabalho apresenta uma proposta metodológica para a realização da classificação da cobertura da terra e o monitoramento das mudanças na cobertura vegetal, devido a fatores naturais e antrópicos. Os objetivos gerais deste estudo foram: 1) gerar um mapa de cobertura da terra da região para o ano de 2002; 2) monitorar as mudanças fenológicas da vegetação a partir dos índices de vegetação NDVI e EVI, para a melhor compreensão das respostas destes sistemas naturais às variações sazonais; e 3) desenvolver uma metodologia de detecção de mudanças da cobertura da terra, devido a desmatamentos e queimadas. Dentre os principais aspectos da metodologia, destacou-se a aplicação do modelo linear de mistura espectral para avaliar e monitorar as mudanças ocorridas nessa região a partir de dados multitemporais do sensor MODIS adquiridas no ano de 2002. Gerou-se um mapa da cobertura da terra para o ano de 2002, e a partir deste mapa, realizou-se a análise do comportamento fenológico da vegetação, mostrando a potencialidade do NDVI do sensor MODIS em gerar a assinatura característica para o ano de 2002 das fisionomias classificadas. Para isso, foram utilizadas as imagens (composição de 16 dias) disponibilizadas pelo produto MOD13 e as imagens fração vegetação, solo e sombra derivadas dessas imagens (composição mensais) através do modelo linear de mistura espectral. Para compreender como as alterações antrópicas estão ocorrendo na região de estudo, utilizou-se as imagens diárias de reflectância de superfície (produto MOD09) adquiridas nas mesmas datas do ETM+ entre o período de junho a outubro de 2002. Devido as suas características, foi utilizada principalmente, a imagem fração solo para o mapeamento das novas áreas desmatadas. Os resultados obtidos foram comparados com os dados do sensor ETM+ e do projeto PRODES considerados como verdade terrestre. Verificou-se que existe uma tendência a subestimativa de $0,051 \text{ km}^2$ por km^2 das áreas desmatadas detectadas pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+, que diminui conforme o tamanho dos polígonos detectados aumentam. Outros fatores que influenciaram as estimativas das áreas desmatadas estão relacionados com a forma e espacialização dos polígonos mapeados. As imagens fração sombra geradas a partir dos dados MODIS mostraram-se eficientes para a identificação e monitoramento das áreas queimadas. Os resultados encontrados mostram a potencialidade da utilização das imagens do sensor MODIS para a classificação e monitoramento da cobertura vegetal a nível regional e global. As imagens diárias (produto MOD09) do sensor MODIS mostraram um excelente potencial para a detecção de áreas desmatadas e queimadas em tempo real, o que permitirá a implementação de um Sistema de Alerta de Desmatamento.

CLASSIFICATION AND MONITORING OF *MATO GROSSO* STATE LAND COVER USING MULTITEMPORAL MODIS SENSOR DATA

ABSTRACT

In a global scale, the land use and land cover changes are occurring in an accelerated manner mainly in the tropics. These terrestrial ecosystems changes are strongly associated with the socio economics development process mainly in developing countries, where there is no territorial occupation planning neither projects and studies to exploit the land resources in a sustainable way. With the facility to access the increasing information provided by remote sensing, the use of new sensors with better spatial, temporal and spectral resolutions have showed to be very important for a better understanding of anthropic and ecological processes, that act in the terrestrial systems. In this context, for the elaboration of this research the Brazilian State of Mato Grosso was chosen due to its variety of vegetation cover types and due to the strong land use changes that it has been suffering. The MODIS sensor was also selected due to its spectral, spatial and temporal resolution characteristics that make possible an improvement in the quality and accuracy of global and regional studies. This work presents a methodological proposal for the land use and land cover classification and the land cover changes monitoring caused by natural and anthropic factors. The general objectives of this study were: 1) to generate a land use and vegetation cover map for the year 2002; 2) to monitor the vegetation phenological changes using NDVI and EVI vegetation indices to better understand the responses of these natural systems to the seasonal variations; and 3) to develop a methodology for detecting land cover change caused by deforestation and burning. Within the main methodology aspects we focused on the application of a linear spectral mixing model to evaluate and monitor changes occurred in this region from multi-temporal MODIS sensor data acquired in 2002. The land cover map was generated for the 2002 year and a phenological vegetation behavior analysis was done through it, showing the potential of MODIS NDVI to generate the characteristic signature for the classified vegetation cover for the year 2002. For this, monthly compositions derived from 16 days data available in MOD13 product and vegetation, soil, and shade fraction images, derived from the linear spectral mixing model, were used. In order to understand how the anthropic alterations are occurring in the study area, daily surface reflectance images (MOD09) acquired at the same ETM+ dates during the July to October 2002 period were used. Due to its characteristics, it was mainly used, the soil fraction image for mapping the new deforested areas. The obtained results were compared to ETM+ and PRODES project data considered as ground truth. It was verified a subestimation tendency of 0,051 km² per km² for the deforested areas detected by the MODIS sensor when compared to ETM+ sensor, which decreases as the size of detected polygons increases. Other factors that influenced the deforestation areas estimation are related with the shape and spatial distribution of the polygons mapped. The shade fraction images generated from MODIS sensor were effective to identify and monitor the burned areas. The results showed the potentiality of MODIS images for the classification and monitoring studies on global and regional levels. The daily images (MOD09) from MODIS sensor showed an excellent potential for the detection of deforested and burned areas in a real time, which will allow the implementation of a Deforestation System Alert.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	27
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1 Comportamento Espectral da Vegetação	34
2.1.1 Comportamento Espectral da Folha	34
2.1.2 Comportamento Espectral de Dosséis Vegetais	37
2.2 O Sensor MODIS	40
2.2.1 Produtos Gerados pelo Sensor MODIS	45
2.3 Processamento Digital de Imagens	51
2.3.1 Correção Geométrica e Registro de Imagens	52
2.3.2 Correção e Retificação Radiométrica das Imagens	53
2.3.3 Classificação e Interpretação da Cobertura Vegetal	59
2.3.4 Mapeamento da Cobertura Vegetal	61
2.3.5 Modelo de Mistura Espectral	62
2.4 Alterações na Cobertura da Terra Devido a Ações Antrópicas	64
2.4.1 Região Amazônica	66
2.5 Mudanças da Cobertura da Terra	68
2.5.1 Fenologia das Formações Vegetais	70
2.5.2 O Desmatamento	72
2.5.2.1 Monitoramento do Desmatamento na Amazônia	75
2.5.3 As Queimadas	78
CAPÍTULO 3 - ÁREA DE ESTUDO	83
3.1 Descrição da Área de Estudo	83
3.2 Aspectos Fisiográficos	84
3.3 Aspectos Vegetacionais	89
3.3.1 A Região Norte do Estado	89
3.3.2 A Região Central do Estado	93
3.3.3 A Região Sul do Estado	94
3.4 Uso da Terra no Estado do Mato Grosso	95

3.4.1 A Agropecuária.....	96
3.4.2 As Queimadas.....	101
3.4.3 O Desmatamento	105
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS	109
4.1 Classificação Digital da Cobertura Vegetal	109
4.1.1 Pré-tratamento dos Dados MODIS.....	111
4.1.2 Confecção do Banco de Dados.....	115
4.1.3 Elaboração dos Mosaicos	116
4.1.4 Geração das Imagens Fração.....	117
4.1.5 Seleção das Imagens MODIS para a Classificação	120
4.1.6 Segmentação e Extração de Regiões	122
4.1.7 Classificação das Imagens.....	124
4.2 Geração do Mapa de Vegetação.....	126
4.3 Análises da Fenologia com Base no Mapa de Cobertura da Terra Gerado.....	135
4.4 Análises das Mudanças na Cobertura da Terra Devido a Ações Antrópicas	142
4.4.1 O Desmatamento	142
4.4.2 Avaliação Multitemporal do Processo de Desmatamento.....	152
4.4.2.1 Pré-processamento das Imagens ETM+.....	153
4.4.3 Desenvolvimento Metodológico	161
4.4.4 As Queimadas.....	169
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	175
5.1 Classificação da Cobertura Vegetal.....	175
5.2 Monitoramento da Cobertura da Terra.....	186
5.2.1 Comportamento Fenológico da Vegetação	186
5.2.2 Detecção de Áreas Desmatadas Utilizando Dados do Sensor MODIS.....	202
5.2.3 Análise das Áreas Queimadas Utilizando Dados do Sensor MODIS	217
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	223
6.1 Conclusões.....	223
6.2 Recomendações	226
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	229
APÊNDICE A EXEMPLOS DOS PROGRAMAS GERADOS EM ANÁLISE LEGAL (LINGUAGEM ESPACIAL DE GEOPROCESSAMENTO ALGÉBRICO) NESTA DISSERTAÇÃO	243

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Curva espectral média típica de uma folha verde sadia.	35
2.2 - Reflectância de folhas de diferentes espécies vegetais.	36
2.3 - Curvas de reflectância para folhas de milho com diferente conteúdo de água.	37
2.4 – Fatores que influenciam a resposta espectral dos dosséis.	40
2.5 - Disposição e largura de bandas do sensor MODIS em relação aos sensores ETM+ e AVHRR.	42
2.6 - Produto MOD13: NDVI e EVI, do período de 25 de junho a 10 de julho de 2000, com resolução espacial de 500m, abrangendo a América do Sul.	51
2.7 - Exemplo da seleção de pontos de controle escuros.	57
2.8 – Taxa média do desflorestamento para a unidade federativa do Mato Grosso, estimada pelo INPE. (*) esta relacionada à média bianual.	76
3.1- Localização geográfica da área de estudo.	83
3.2 - Isoietas anuais em mm do Estado do Mato Grosso sobre uma imagem MODIS referente a época chuvosa, composição RGB das bandas 1,2 e 7.	85
3.3 - Curvas de precipitação de algumas localidades na região Centro-oeste.	86
3.4 - Mapa climático da região Centro-oeste, com o limite político do Estado do Mato Grosso.	87
3.5 - Imagem SRTM do relevo do Estado do Mato Grosso, separado por classes a cada 250 metros de altitude. No detalhe, imagem Landsat abrangendo parte da Serra Azul e Chapada dos Guimarães.	88
3.7 - Perfil esquemático da região de Savanas.	94
3.8 - Localização das áreas que fazem parte do Pantanal brasileiro.	95
3.9 - Regimes espaciais agrupados segundo padrões de desmatamento e efetivo do rebanho.	98
3.10 - Incremento da área plantada de soja para o Estado do Mato Grosso em relação à área total plantada para o Brasil.	99
3.11- Dinâmica da produção de soja (em toneladas) nos municípios do Estado do Mato Grosso, para o período de 1990 a 2001.	100
3.12 - A imagem superior mostra uma composição dos focos de calor acumulados do mês de agosto de 2002, para o Estado do Mato Grosso, enquanto que a imagem inferior mostra uma composição do mês de janeiro de 2003. Estes dados são gerados com base nos dados do satélite NOAA/AVHRR.	102
3.13 - Focos de calor no Estado do Mato Grosso em relação a ao Brasil, para o período de julho a setembro.	103
3.14 - Focos de calor nas Mesoregiões do Estado do Mato para o período 1996 a 2002.	104
3.15 - Cenas TM/Landsat consideradas na geração da estimativa da taxa média do desflorestamento bruto das áreas críticas para o período de 2000/2001.	106
4.1 - Cenas do sensor MODIS utilizadas no processo de classificação da vegetação, na grade de referenciamento das imagens. Em vermelho apresenta-se a cena utilizada para a análise do processo de desflorestamento.	110
4.2 - Diagrama dos passos necessários para o tratamento dos dados MODIS para a importação para o Sistema SPRING.	111

4.3 - Fusos da projeção UTM para o Estado do Mato Grosso. Esta projeção não foi utilizada devido aos três fusos que cortam a região, gerando uma distorção geométrica nos dados.....	113
4.4 - Histograma de uma imagem reflectância do sensor MODIS, canal da região espectral do vermelho: (a) Conversão utilizando o intervalo 0,0 a 1,0; (b) mesma imagem convertida utilizando o intervalo -0,01 a 1,0, e (c) intervalo de -0,2 a 1,0.	115
4.5 - Mosaicos gerados para a área de estudo: (a) estação chuvosa que compreende os meses de janeiro a abril, novembro e dezembro; e (b) estação seca, que compreende os meses de maio a outubro.	116
4.6 - Curvas espectrais dos modelos de mistura gerados independentemente (composições mensais), e o resultado para o modelo “único” da estação chuvosa.	118
4.8 - Processo de segmentação para a área de estudo. Em (a) composição RGB das imagens NDVI, dos meses de julho, agosto e setembro, respectivamente; (b) detalhe de uma área no centro da região; e (c) sua segmentação (linhas em vermelho).....	124
4.10 – Em (a) mapa do PRODES para a área de estudo, mostrando as áreas desmatadas em vermelho, floresta em branco e não floresta em rosa. Em (b) observa-se as áreas desmatadas detectadas pelo PRODES em vermelho, e as demais classes de cobertura da terra mapeadas; em (c) observa-se a máscara de não-floresta provinda dos dados PRODES e as demais classes de cobertura da terra.....	129
4.11 – Em (a) observa-se a distribuição dos pontos de coleta de dados de precipitação no Estado do Mato Grosso; em (b) observa-se a grade final de precipitação acumulada gerada a partir da interpolação das amostras, e somando-se as grades referentes a todos os meses do ano de 2002.	130
4.12 – Mapa de precipitação acumulada para o ano de 2002, para a área de estudo. Em (a) observa-se o mapa gerado com cinco classes, e em (b) o mapa gerado com três classes.	131
4.13 – Imagem de altimetria do Estado do Mato Grosso, gerada a partir de dados SRTM.	132
4.14 - Localização dos pontos visitados, coletados com GPS durante o trabalho de campo, em junho/julho de 2003.	133
4.15 - Detalhe dos pontos visitados no trabalho de campo em junho/julho de 2003 coletados com GPS, em algumas das fisionomias mais comuns visitadas. A imagem é referente ao mesmo período no ano de 2002.	134
4.16 – (a) Esquema da amostragem dentro da mesma classe de vegetação com espacialização abrangente dentro do Estado; (b) apresenta-se o total de amostras adquiridas em todas as classes para a geração do coeficiente de correlação entre os Índices de Vegetação e precipitação.	136
4.17 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Formação Floresta Ombrófila Aberta, agrupadas em três Áreas: Norte (pontos vermelhos), Centro (pontos amarelos) e Leste (pontos azuis) do Estado.....	136

4.18 - Mapas de vegetação do Estado do Mato Grosso. Em (a) mapa de Vegetação gerado pelo IBAMA/IBGE (1993); (b) gerado a partir de dados NOAA-AVHRR, por Rodriguez Yi (2000); (c) gerado pela Prodeagro-MT.....	137
4.19 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Gramíneo-lenhosa, agrupadas em duas áreas: Centro (pontos pretos) e Leste do Estado (pontos vermelhos).	138
4.20 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Arbórea Aberta, agrupadas em três áreas: Centro (pontos vermelhos), chapada (pontos azuis) e sul do Estado (pontos amarelos).	138
4.21 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Parque agrupadas em quatro áreas: norte (pontos rosas), oeste (pontos verdes), sul (pontos vermelhos), e em áreas de alagamento (pontos azuis).....	139
4.22 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Contato agrupadas em três áreas: centro-sul (pontos vermelhos), entre as culturas de soja (pontos azuis), e ao norte (pontos amarelos).	140
4.23 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Formações Pioneiras ao longo da classe (pontos amarelos).	140
4.24 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de cultura de soja agrupadas em três áreas: em áreas de Floresta Ombrófila Aberta (pontos verdes), em Savana Arbóreo Aberta (pontos laranja), e em Savana Gramíneo-lenhosa (pontos rosas).	141
4.25 – Fluxograma do estudo preliminar para a avaliação da aplicação do modelo de mistura nos produtos MOD09 e MOD13.	143
4.26 – Imagens fração solo, de uma área onde ocorreu desmatamento entre os dias 166-182. Os limites dos polígonos detectados pelo PRODES estão em vermelho.	144
4.27 - Composição RGB das bandas do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Em (a) imagem ETM+, dia 214, mostrando polígono antes do desflorestamento e (b) dia 230, após o desflorestamento; (c) cena do produto MOD09, dia 214 e (d) e dia 230; (e) composição do produto MOD13 referente ao mês de agosto (dia 213 a dia 243) e (f)) composição do produto MOD13 referente ao mês de setembro (dia 244 a dia 273).	145
4.28 – Dispersão dos pixels da imagem fração solo para dois momentos: antes e após o desmatamento. Em (a): Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 166 a 182 para o sensor ETM+; (b) Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 166 a 182 para o produto MOD09; (c) Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 161 a 177 e 177 a 193 para o produto MOD13.	146
4.29 – Seleção das áreas de teste. Em (a) polígonos desmatados em 2002, detectados pelo projeto PRODES (em vermelho), e em outras cores, os polígonos que tiveram suas áreas alteradas no período do dia 166 ao dia 182. Em (b) os polígonos selecionados e em (c) a área alterada destes polígonos nestes 16 dias.	147
4.30 – Diferença das imagens fração solo, para os dados ETM+, MODIS diária, para os dias 182-166 e MOD13 para os dias 177-161 e 193-161, avaliando a	

amplitude da diferença dos pixels em áreas de florestas e áreas desmatadas. Em (a): Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor ETM+: diferença (182-166); (b) Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor MODIS imagem diária: diferença (182-166); (c) Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor MODIS produto MOD13: diferença (177-161) e (193-161).....	148
4.31 – Porcentagem de desmatamento detectado com base em diferentes limiares. Em (a) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, produto MOD09; (b) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, produto MOD13, dia 177; (c) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, MOD13, dia 193.	150
4.32 – Imagens fração solo entre os dias 166 e 182, produto MOD09, utilizando dois limiares diferentes para separar pixels de floresta de pixels de áreas desmatadas. O gráfico apresenta dispersão dos pixels da imagem fração solo, para floresta e desmatamento, com os limiares em amarelo (valor “ideal”) e vermelho (valor que separa apenas os desmatamentos).	151
4.33 - Imagens Landsat selecionadas com as datas (calendário Juliano) do ano de 2002.	153
4.34 - Imagem Landsat com os pontos de controle utilizados para a realização do registro.	154
4.35 – Avaliação do registro entre as imagens ETM+ e MODIS. (a) em RGB parte da cena ETM+, e em monocromático, imagem fração solo MODIS; (b) Destacando uma região da cena e (c) imagem RGB ETM+ com a fração sombra da imagem MODIS, ressaltando uma área no curso de um rio.	155
4.36 – Dispersão em gráfico 2D espalhamento das imagens GR x BR, sendo possível deste modo verificar a similaridade entre as datas.	158
4.37 – Diagrama de dispersão das imagens Greenness e Brightness da imagem referência (vermelho) e da imagem antes da retificação (verde), e da imagem referência (vermelho) e imagem retificada (azul) para as quatro datas.	159
4.38 – Fluxograma geral das etapas desenvolvidas para a análise e validação do processo de desflorestamento detectado pelo sensor MODIS.	162
4.39 – Seleção das respostas dos componentes (sombra, solo e vegetação) para a geração do modelo único para as imagens ETM+.	163
4.40 – Composição colorida, modelo de mistura e máscara da área de validação (227/68) para evidenciar apenas as áreas de floresta após o PRODES 2001. Em (a) composição RGB de uma imagem MODIS com os limites da cena ETM+ da área utilizada para a validação do desmatamento; (b) Imagem fração solo com ajuste de contraste, da mesma data, com a aplicação da máscara (preto) para áreas de desmatamentos antigos e não-floresta, evidenciando as áreas de floresta após PRODES 2001 (em tons de cinza), e áreas desmatadas (em branco).	164
4.41 – Exemplo do procedimento de reedição da carta temática do PRODES 2002, para as datas 278 e 262. Em (a) observa-se um detalhe da cena 278, com o desmatamento detectado pelo PRODES 2002 (em vermelho), e em (b) a imagem correspondente ao mesmo dia. Em (c) é observado a carta temática	

reeditada para a data anterior (dia 262) sem parte dos polígonos de desmatamento, e a composição colorida da mesma data em (d).....	165
4.42 – Processo de edição para as imagens MODIS diárias. Em (a), segmentação da imagem fração solo com a máscara; (b) áreas detectadas como desmatadas (em azul) e em (c) composição RGB da mesma data (dia 262) mostrando a floresta; em (d) áreas detectadas como desmatadas (em azul) e em (e) composição RGB da mesma data (dia 278) mostrando o desmatamento.....	167
4.43 – Composição RGB das bandas da região do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho do produto MOD13 referente ao mês de junho, e parte dos polígonos das amostras de floresta, desmatamento e solo exposto.....	169
4.44 - Composição colorida mostrando alguns dos polígonos amostrais (retângulos em azul) selecionados na data 278 do sensor ETM+.	170
4.45 – Imagem fração sombra para do Estado do Mato Grosso referente ao mês de agosto. Em (a) Imagem fração sombra do dia 278, sensor ETM+; (b) Imagem fração sombra do dia 278, sensor MODIS. As setas vermelhas apontam alguns exemplos de áreas queimadas, que na imagem fração sombra apresentam-se mais brilhantes.....	171
4.46 - Proporção das imagens fração para cada um dos polígonos, na data 278, e para as composições nos meses de outubro e novembro. Em (a) proporção das imagens fração para a imagem do sensor ETM+; (b) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD09; (c) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD13, composição mensal de outubro; (d) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD13, composição mensal de novembro.....	172
4.47 – Dados do produto MOD14 mostrando problemas de georeferenciamento. Em (a) apresenta-se cena do produto MOD14, para o dia 166 na região norte do Estado do Mato Grosso com a área de validação (mesmo local da cena ETM+) em vermelho; em (b) observa-se o mesmo produto com a composição colorida de uma cena do sensor MODIS mostrando que em dois locais da cena existem distorções geométricas (circulado em vermelho), o que impossibilitou a análise destes dados.....	174
5.1 - Imagens classificadas a partir do algoritmo Isoseg, utilizando-se o limiar de 90% (dos itens a ao d), e 95% nos itens e e f, com diferentes combinações de cenas: (a) utilizou-se para a classificação as imagens fração e índice vegetação NDVI para as quatro datas selecionadas; (b) utilizou-se apenas as imagens fração referentes as 4 datas selecionadas; (c) utilizou-se as imagens fração do mês de agosto, (d) utilizou-se a imagem NDVI referente ao mês de agosto; (e) utilizou-se as imagens fração referente ao mês de agosto, e (f) utilizou-se as imagens fração das 4 datas.....	176
5.2 – Imagens classificadas utilizando-se o classificador pixel a pixel k-media com diferentes limiares: (a) classificação das imagens fração do mês de agosto, 40 temas e 10 iterações; (b) classificação das imagens fração do mês de agosto, 25 temas e 10 iterações; (c) classificação das imagens fração do mês de agosto, 10 temas e 10 iterações.....	177

5.4 – Porcentagem da contribuição de cada uma das classes mapeadas para a cobertura da terra do Estado do Mato Grosso.	180
5.5 - Ocupação da soja em áreas de savanas e floresta: (a) Mapa da cobertura da terra, mostrando apenas as formações savânica e a ocupação da soja sobre estas áreas; (b) Mapa da cobertura da terra, mostrando apenas as formações florestais e a ocupação da soja sobre estas áreas; (c) gráfico da porcentagem da ocupação da soja sobre áreas savânicas e florestais.	182
5.6 – Mapa da cobertura da terra exibindo, em linha vermelha, as áreas antropizadas localizadas entre as regiões de floresta e cerrado.	183
5.7 – Em (a) mapa da cobertura da terra para o ano de 2002, gerado a partir de dados MODIS; em (b) máscara de desflorestamento total do Estado do Mato Grosso até o ano de 2002, e circulado em cor preta, apresentam-se as áreas que foram classificadas como outro tipo de cobertura da terra no mapa gerado neste estudo.	184
5.8 - Análise visual do mapa da cobertura da terra para o ano de 2002 em relação aos mapas de altimetria e pluviosidade para a Formação Savana Parque: (a) Comparação dos limites entre Savana Parque (mapa de vegetação) e relevo com até 300 metros acima do nível do mar (detalhe sobreposto ao mapa de vegetação); (b) comparação entre os limites das áreas de baixa altitude (0-100m) no detalhe, e as áreas inundadas na época das chuvas mapeadas para o ano de 2002 (linha em vermelho) sobre o mapa de vegetação gerado; (c) mapa de pluviosidade sobre o mapa de vegetação, mostrando a taxa mais baixa encontrada no Estado, com base nos dados do ano de 2002.	185
5.9 - Mapa de altimetria do Estado do Mato Grosso (a) e o mapa com a cultura da soja mosaicada sobre ele (b).	185
5.10 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a classe Floresta Ombrófila Aberta para o ano de 2002.	188
5.11 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Floresta Ombrófila Aberta e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.	189
5.12 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para as classes Savana Gramíneo-lenhosa, Savana Parque, Savana Parque em áreas inundadas no período chuvoso de 2002, e Savana Arbórea Aberta, para o ano de 2002.	192
5.13 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Gramíneo-lenhosa e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.	193
5.14 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Arbórea Aberta e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.	194
5.15 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Parque e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.	195
5.16 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a classe Contato OE (Fl.Ombrofila-Savana) para o ano de 2002.	196

5.17 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de contato e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.....	197
5.18 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a classe Formação Pioneira para o ano de 2002.	198
5.19 - Resultado do Teste Tukey para áreas de Formações Pioneiras, e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.....	199
5.20 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a Soja, durante o ano de 2002.	200
5.21 - Resultado do Teste Tukey para áreas de Soja, e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.....	200
5.22 - Caracterização temporal das classes de vegetação mapeadas, em (a) através de dados EVI, e em (b) através de dados NDVI.....	202
5.23 – Evolução das áreas desmatadas para a cena 227/68, para o período analisado, detectado pelo sensor MODIS e ETM+.	203
5.24 – Evolução das áreas desmatadas em cada período pelo sensor MODIS, sobre a imagem fração solo.....	204
5.25 - Desmatamentos ocorridos em cada período (intervalo de 16 dias) entre junho e outubro de 2002 (a) e curva de precipitação, com base em três estações de medição localizadas dentro dos limites da cena (b).	205
5.26 - Número de polígonos detectados pelos sensores ETM+ e MODIS, distribuídos segundo três classes de tamanhos, para todo o período analisado. Em (a) número de polígonos detectados com área menor que 15 ha; (b) número de polígonos detectados com área entre 15 e 50 ha; (c) número de polígonos detectados com área entre 50 e 100 ha.	206
5.27 - Desmatamentos detectados pelos sensores ETM+ e MODIS. Em (a) Área desmatada com polígonos entre 100 e 200 ha; (b) Área total dos polígonos detectados para o dia 262; (c) Área desmatada com polígonos entre 200 e 500 ha; (d) Área total dos polígonos detectados para o dia 278.....	208
5.28 - Gráficos das análises dos polígonos com áreas superiores a 200 ha. Em (a) evolução temporal dos polígonos com área entre 200 e 500 ha; (b) evolução temporal dos polígonos com áreas entre 500 e 1000 ha; (c) divisão dos polígonos por classes de tamanho para o dia 262, por área total dos polígonos; (d) divisão dos polígonos desmatados por classes de tamanho para o dia 278, por área total dos polígonos.....	209
5.29 - Polígonos desmatados detectados pelo PRODES e pelo sensor MODIS. Em (a) imagem fração solo ETM+ com os desmatamentos detectados pelo PRODES para o ano de 2002; (b) imagem fração solo MODIS com os desmatamentos detectados pelo PRODES para o ano de 2002; (c) imagem fração solo MODIS com os desmatamentos detectados através da metodologia adotada mostrando a junção de polígonos, devido à especialização dos polígonos e resolução espacial do sensor.	210
5.30 - Análise geral da área e número de polígonos para os dados ETM+ e MODIS. Em (a) representatividade das áreas divididas por classe de tamanho detectado	

<p> pelo sensor ETM+; (b) representatividade das áreas divididas por classe de tamanho detectado pelo sensor MODIS; (c) representatividade do número de polígonos desmatados detectados pelo sensor ETM+; (d) representatividade do número de polígonos desmatados detectados pelo sensor MODIS..... </p>	211
<p> 5.32 - Teste de medida da taxa de subestimativa do sensor MODIS em relação ao sensor ETM+ para a detecção de áreas desmatadas. </p>	213
<p> 5.33 - Tamanho dos polígonos selecionados para a avaliação da detecção destes pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+. </p>	213
<p> 5.34 - Análise estatística de t-Student para as tendências de subavaliação da área detectada por polígonos grandes e pequenos pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+. </p>	214
<p> 5.35 - Resultado do teste de Tuckey para os índices de vegetação EVI e NDVI, com base nas amostras de solo exposto, floresta e desmatamentos. (*) indica diferença significativa..... </p>	216
<p> 5.36 - Gráfico de dispersão das imagens fração sombra ETM+ em relação ao produto MOD09. Em (a) apresenta-se todas as amostras coletadas; (b) amostras coletadas com área maior que 1 pixel do sensor MODIS. </p>	217
<p> 5.37- Resultados das análises das amostras adquiridas nas imagens fração sombra dos sensores MODIS e ETM+ em polígonos amostrais em áreas queimadas. </p>	218
<p> 5.38 - Resultados das análises entre os produtos MOD13 e ETM+ em polígonos amostrais em áreas queimadas..... </p>	219
<p> 5.39 - NDVI e EVI dos polígonos amostrados na data 278, com base na imagem ETM+. Para cada um dos meses, apresenta-se o valor médio das amostras, assim como o valor mais alto e mais baixo registrado por cada um dos índices..... </p>	221

LISTA DE TABELAS

2.1 - Especificações técnicas do satélite Terra/sensor MODIS.....	41
2.2 – Bandas espectrais do Sensor MODIS para o Estudo da Superfície Terrestre.....	43
2.3 - Comparação entre as resoluções espaciais dos sensores ASTER, ETM+, MODIS e AVHRR, utilizadas para o monitoramento terrestre.....	44
2.4 - Intervalos de revisita de alguns satélites de sensoriamento remoto.....	44
2.5 - Estimativas de biomassa queimada (tg/ano) para os trópicos.....	78
3.1 - Extensão Do Desflorestamento Bruto (Km ²) de Abril de 1988 A Agosto de 2000.....	106
3.2 - Taxa Média De Desflorestamento Bruto (Km ² /Ano) De Abril De 1988 A Agosto De 2000.....	107
4.1 - Seleção das melhores datas para realizar a classificação, segundo o número de imagens definidas a serem utilizadas, a partir dos dados NDVI e EVI. Em vermelho destacam-se as datas diferentes para os dois dados.....	120
4.2 - Resultados da aplicação do teste Tukey, para o NDVI e EVI, a partir das médias de cada uma das classes em que foi baseada a análise, para a seleção de 4 datas. Os números de 1 a 10 indicam cada uma das classes na seguinte ordem: (1) Floresta Ombrófila Aberta; (2) Contato Savana Arborizada- Floresta Ombrófila; (3) Contato Floresta Ombrófila Aberta-Floresta Estacional; (4) Floresta Ombrófila Densa; (5) Formações Pioneiras; (6) Savana Arborizada; (7) Savana Parque; (8) Savana Florestada; (9) Contato Savana Parque-Savana Estépica; e (10) Floresta Estacional. (* indica diferença significativa).....	122
4.3 - Erro de registro entre as imagens ETM+ e a imagem fornecida pelo PRODES..	154
4.4 - Ângulos de elevação do Sol para cada data, disponível no cd-rom das imagens.....	156
4.5 - Range da radiância espectral em watt/(m ² sr) para o sensor ETM+ para os dados após o dia 1 de julho de 2000, utilizados para a conversão da imagem de número digital para reflectância aparente.....	156
4.6 - Irradiância solar espectral para ETM+, utilizados para a conversão da imagem de número digital para reflectância aparente.....	157
4.7 - Valores dos alvos claros e escuros da imagem referência e das cenas retificadas.....	159
5.1 - Média mensal dos valores NDVI e EVI para a série temporal estudada, para a formação Floresta Ombrófila Aberta.....	188
5.2 - Média mensal dos valores NDVI e EVI para a série temporal estudada, para as formações Savânicas.....	190
5.3 - Média mensal dos valores NDVI e EVI para a série temporal estudada, para a formação de Contato.....	196
5.4 - Média mensal dos valores NDVI e EVI para a série temporal estudada, para formações Pioneiras.....	198
5.5 - Média mensal dos valores NDVI e EVI para a série temporal estudada, para as áreas de soja.....	199

5.6 - Taxas de erro e precisão (%) dos métodos de detecção de mudança utilizando o VCC e segundo os resultados obtidos nesta pesquisa, para a detecção de desmatamentos ocorridos no Brasil.	215
---	-----

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- 6S - Second Simulation of the Satellite Signal in Solar Spectrum
- AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer
- CPTEC - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
- DN - Número Digital
- ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus
- EOS - Earth Observing System
- EVI - Enhanced Vegetation Index
- fPAR - Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- JERS-1 - Japan Earth Resources Satellite
- LAI - Índice de Área Foliar
- LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
- MLME - Modelos Lineares de Mistura Espectral
- MSS - Multispectral Scanner Subsystem
- MT - Mato Grosso
- NASA - National Aeronautics and Space Administration
- NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
- PAR - Radiação Fotossinteticamente Ativa
- PI - Plano de Informação

PRODES – Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia

REM - Radiação eletromagnética

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SPOT - Satellite pour L'observation de la Terre

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas

TM - Thematic Mapper

UTM - Universal Transverse Mercator

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em uma escala global, a mudança do uso da terra e da cobertura vegetal está ocorrendo em passos acelerados, principalmente nos trópicos. Estas mudanças nos ecossistemas terrestres estão fortemente associadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico principalmente em países subdesenvolvidos, onde não se encontram planejamentos para a ocupação do território, nem projetos e estudos para explorar de maneira sustentável os recursos da terra, ou quando estes estudos existem, falta coordenação das ações e objetivos políticos. Segundo Lambin (1997) o conhecimento e o entendimento destes processos ainda estão muito fragmentados para avaliar e estimar o vasto impacto destas mudanças nos sistemas naturais e humanos.

Alterações da cobertura vegetal devido às atividades humanas, como a construção de represas, e aos processos naturais, como longos períodos de estiagem etc., exercem grande influência nos ciclos biogeoquímicos e climáticos do sistema terrestre. Os ecossistemas terrestres exercem um controle nos ciclos biogeoquímicos, o que por sua vez influenciam significativamente os sistemas climáticos através de propriedades radiativas dos gases de efeito estufa e outros gases reativos (Friedl et al., 2002). Além do mais, variações na topografia, rugosidade, albedo, cobertura vegetal, e outras características biofísicas da superfície terrestre, influenciam a circulação atmosférica podendo causar alterações no tempo e no clima (Sellers et al., 1997).

Em 1991 foi elaborado um projeto de longa duração pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), denominado Sistema de Observação da Terra (EOS-Earth Observing System) com suporte do governo dos Estados Unidos. Um dos principais interesses deste projeto é o estudo das relações entre as formações vegetais terrestres e os processos globais de larga escala, com o objetivo de entender o funcionamento da Terra como um sistema único e integrado. Isso requer o conhecimento da distribuição global dos tipos de vegetação assim como suas

propriedades biofísicas e estruturais, e suas variações espaciais e temporais (Huete et al., 2002).

Algumas ferramentas importantes para se detectar e mapear estas mudanças são os produtos do sensoriamento remoto obtidos por plataformas orbitais e os sistemas de informações geográficas. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante fonte de informações para monitorar os recursos naturais da Terra, devido à possibilidade de se adquirir dados sobre grandes extensões geográficas, e assim, os processos que ocorrem nestas áreas podem ser melhor compreendidos a partir destes monitoramentos.

Estudos de detecção de mudanças na cobertura da terra através do sensoriamento remoto são baseados no fato de que distúrbios, tanto naturais quanto de origem antrópica no meio ambiente, produzem variações detectáveis na resposta espectral do alvo ou do fenômeno estudado. No entanto, quando tratamos com imagens geradas a partir do sensoriamento remoto, a radiação detectada pelo sensor é causada pela combinação da resposta de diferentes alvos e dos efeitos atmosféricos, que podem causar alterações significantes nos dados. Os fatores relacionados a cada sistema sensor (diferença na resolução espacial, variações nas respostas radiométricas), e ao meio ambiente (absorção e espalhamento atmosféricos, quantidade de moléculas dispersas na atmosfera, presença de nuvens e suas sombras, variação na irradiância e ângulo solar, variações na fenologia vegetal e nos componentes do solo segundo as mudanças estacionais) podem também interferir nos resultados das detecções (Singh, 1989).

A comunidade científica tem utilizado amplamente os dados de sensores a bordo dos satélites Landsat (o primeiro foi lançado em 1972), SPOT (lançado em 1986), IRS 1 (lançado em 1988), e RADARSAT (lançado em 1996), para o estudo da vegetação em diferentes níveis e escalas, especialmente dos dois primeiros citados acima, devido à resolução espacial e espectral de seus sensores. Porém, a resolução temporal do Landsat (16 dias) e do SPOT (26 dias) têm limitado o estudo de fenômenos de grande dinâmica temporal (Rodriguez-Yi, 1998). Além disso, o alto custo financeiro destes dados e o recurso computacional necessário para o processamento também tem limitado o

monitoramento de áreas extensas. Assim, a aplicação desses dados fica, geralmente, restringida a estudos de caráter local, com uma extensão territorial de 185 km x 185 km para uma imagem gerada a partir dos sensores TM ou ETM+ a bordo dos satélites da série Landsat, e de 60 km x 60 km para uma imagem obtida pelo sensor HRV a bordo do satélite SPOT.

Portanto, no monitoramento da vegetação em níveis global, continental e regional a comunidade científica de usuários do Sensoriamento Remoto tem utilizado grandemente os dados fornecidos por satélites meteorológicos, em particular do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), a bordo dos satélites da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Com os lançamentos dos satélites do EOS, Terra em dezembro de 1999, e posteriormente, do satélite Aqua em abril de 2002, ambos portando o sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) dentre outros, melhorou a fonte de informações para estudos globais, devido principalmente a uma melhor qualidade na resolução espectral, espacial e temporal dos dados desse sensor.

Neste contexto, o mapeamento da cobertura vegetal e seu monitoramento mostram-se de extrema importância, e existe um esforço por parte da comunidade científica em melhorar a acurácia destes estudos (Hansen et al., 2002). Estes trabalhos visam observar as mudanças devido a fatores naturais e antrópicos (Zhan et al., 2002), buscar uma maior eficiência nas elaborações de planos de manejo de recursos naturais, assim como na análise da paisagem (Soares Filho, 2001), delimitar as áreas prioritárias para a conservação (Souza et al., 1998), ou ainda realizar estudos que envolvem tópicos sobre mudanças globais (Justice et al., 2002), modelagens de ciclos biogeoquímicos, estimativas de emissão de carbono (DeFries et al., 2002) dentre outros.

Estimativas recentes das mudanças que vem ocorrendo na cobertura vegetal e uso da terra apontam para a intensificação da agricultura, desmatamentos nos trópicos, expansão das áreas de pastagens e urbanização como as principais forçantes atuais.

Desta forma, é inquestionável a importância de se realizar um mapeamento acurado das diferentes formações vegetais, tanto como base para estudos de conservação, quanto

para estudos que envolvam questões relacionadas às mudanças globais, como alterações no clima, no ciclo do carbono e no balanço hídrico, devido à causas naturais e/ou antrópicas.

Este estudo foi proposto com base nos seguintes questionamentos:

- 1) É possível mapear mais detalhadamente as diferentes formações vegetais e definir melhor seus limites e áreas de transição na região Amazônica, que os mapas já gerados a partir de sensores de média e baixa resolução espacial como o SPOT-VEGETATION e o NOAA-AVHRR?
- 2) Quais os tipos de vegetação mais atingidos pelo processo de antropização?
- 3) A cultura da soja é uma forçante para as alterações nas áreas de savanas e florestas?
- 4) É possível desenvolver uma metodologia mais eficiente para monitorar as alterações antrópicas?

Desta forma formulou-se a seguinte hipótese:

Os dados do sensor MODIS, devido as suas melhores resoluções espacial, temporal e espectral em relação aos sensores semelhantes já existentes (por exemplo, NOAA-AVHRR e SPOT-VEGETATION), permitem melhorar a classificação da cobertura vegetal em uma escala regional e detectar mudanças na cobertura da terra causadas por desmatamentos e queimadas.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é realizar a classificação da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso, e detectar mudanças na cobertura vegetal e uso da terra, devido à fenologia e às atividades de desmatamento e queimadas, a partir de dados multitemporais do sensor MODIS.

Para se atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- 1) Gerar mosaicos multitemporais das imagens fração (vegetação, solo e sombra) para o Estado do Mato Grosso.
- 2) Avaliar as melhores datas para a classificação da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso, com base em uma série temporal de imagens índice de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI e Índice de Vegetação Melhorado - EVI) do sensor MODIS para o ano de 2002, visando a melhor distinção entre as diferentes classes de vegetação.
- 3) Gerar um mapa temático da cobertura da terra do Estado do Mato Grosso;
- 4) Avaliar os índices de vegetação NDVI versus EVI derivados dos dados do sensor MODIS como indicador de mudanças sazonais, para as diferentes formações vegetais classificadas.
- 5) Desenvolver um método de detecção de mudanças na cobertura da terra, devido a causas antrópicas (desmatamento e queimadas) utilizando dados do sensor MODIS.
- 6) Realizar a validação dos dados gerados para o desmatamento e queimadas obtidos do sensor MODIS, comparando com as imagens ETM+/Landsat obtidas nas mesmas datas e com as informações do projeto PRODES.
- 7) Monitorar o comportamento temporal das classes de cobertura da terra mapeadas.

Este documento foi organizado em 7 Capítulos e a descrição dos assuntos abordados em cada um deles encontra-se a seguir.

No Capítulo 2 é apresentada uma fundamentação teórica, visando oferecer um embasamento sobre os principais conceitos e aspectos relacionados à natureza desta pesquisa. Os seguintes tópicos foram abordados: aspectos relativos ao comportamento espectral da vegetação, os índices de vegetação, características do sensor a ser utilizado na dissertação, os processamentos de imagens que foram aplicados na pesquisa e a

revisão de trabalhos que utilizaram dados fornecidos pelo sensor MODIS em estudos de detecção de mudança na cobertura vegetal e uso da terra.

No Capítulo 3 é apresentada a área de estudo, onde são descritos os aspectos fisiográficos da região, além das atuais forças para a mudança da cobertura vegetal e uso da terra nesta região.

O Capítulo 4 apresenta a descrição da metodologia utilizada e também os resultados derivados das etapas intermediárias desenvolvidas.

No Capítulo 5 são apresentadas as análises e discussões dos resultados alcançados, e no Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões obtidas e as recomendações para a continuação de estudos nesta linha de pesquisa.

Finalmente no Capítulo 7 são listadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento dessa pesquisa.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as informações sobre os temas abordados nesta pesquisa: comportamento espectral da vegetação, um breve resumo sobre o sensor MODIS, técnicas de processamento de imagens (correção geométrica, retificação radiométrica, classificação da cobertura vegetal e detecção de mudanças). As considerações apresentadas neste capítulo visam oferecer um embasamento sobre dados e técnicas de Sensoriamento Remoto relacionados à natureza dessa pesquisa e sobre os fatores ambientais envolvidos.

Esta fundamentação tem por base o conceito de que as técnicas do Sensoriamento Remoto, tanto no nível terrestre, suborbital ou orbital, são baseadas na porção da radiação eletromagnética que é refletida e/ou emitida pelos diferentes alvos da superfície terrestre.

Em estudos da cobertura vegetal, a aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto é de grande relevância, pois a partir dos dados adquiridos é possível extrair informações sobre a distribuição dos diferentes tipos de vegetação, estrutura do dossel, estado fenológico, condições de estresse, carência de nutrientes, entre outros. Os diferentes ecossistemas participam dos processos de regulação do clima do planeta, através dos ciclos biogeoquímicos, como o armazenamento de carbono, e processos biofísicos, como a troca de água, energia e fluxo de momento com a atmosfera.

2.1 Comportamento Espectral da Vegetação

A fundamentação das técnicas do Sensoriamento Remoto, tanto no nível terrestre, aéreo, ou orbital, é baseada na porção da radiação eletromagnética que é refletida e/ou emitida pelos diferentes alvos da superfície terrestre.

A quantidade de energia refletida e/ou emitida pelos alvos, quando medida por um sistema sensor e transformada num produto que possa ser interpretado, mostra que esta depende do alvo e do comprimento de onda ou faixas de comprimentos de onda do espectro eletromagnético em que foi feita esta medida. Assim, cada alvo tem um comportamento espectral que lhe é peculiar, devido suas características físicas, químicas ou biológicas. Em outras palavras, o comportamento espectral é a variação da quantidade de energia refletida e/ou emitida pelo alvo, para cada comprimento de onda do espectro eletromagnético (Moreira e Shimabukuro, 2002).

2.1.1 Comportamento Espectral da Folha

A folha é o principal órgão absorvedor da radiação eletromagnética da vegetação. A medição da energia absorvida, como também da transmitida e refletida pelas folhas podem ser obtidas por sensores em laboratório, campo, aerotransportados ou orbitais.

A análise do comportamento espectral das folhas, que são os elementos da vegetação que mais contribuem para o sinal detectado por sensores remotos (Colwell, 1974), é influenciada principalmente por sua morfologia interna (distribuição, quantidade de tecidos e espaços intercelulares), tipo e quantidade de pigmentos fotossintetizantes, característicos de cada espécie (Kumar, 1974). Na Figura 2.1, observa-se a reflectância média típica de uma folha verde sadia na região do espectro eletromagnético de 0,3 a 2,5 μm , exibindo a faixa em que cada um dos elementos influencia na resposta medida.

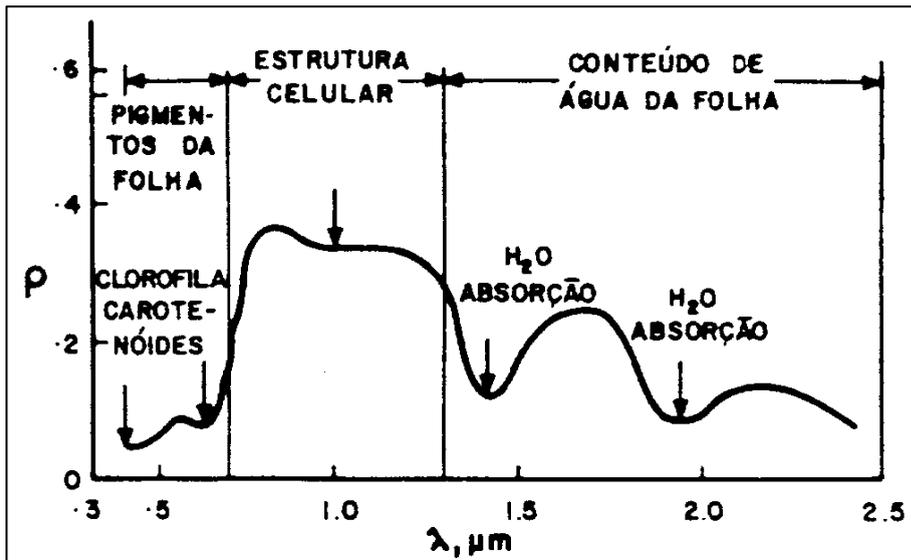


FIGURA 2.1 - Curva espectral média típica de uma folha verde sadia.

FONTE: Adaptado de material de aula de Comportamento Espectral de Alvos, INPE (2002).

A análise desta figura indica que podemos dividir esta região do espectro em três áreas (Ponzoni, 2001):

- Região do visível (0,4 a 0,7 μm): nesta região os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância espectral. Esses pigmentos (clorofilas, carotenos e xantofilas), geralmente encontrados nos cloroplastos variam de espécie para espécie (Figura 2.2), e segundo a maturidade da folha.

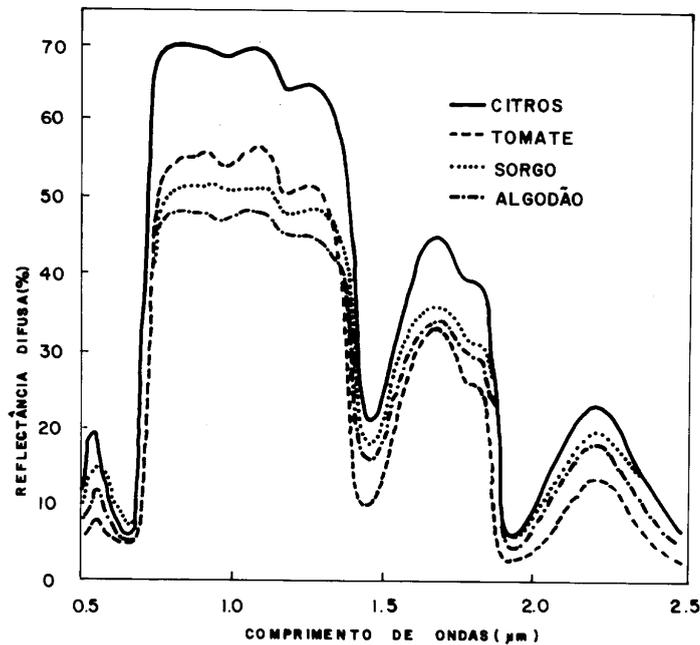


FIGURA 2.2 - Reflectância de folhas de diferentes espécies vegetais.

FONTES: Material de aula de Comportamento Espectral de Alvos, INPE (2002).

Na Figura 2.2 observa-se diferentes valores de reflectância para diferentes espécies vegetais, sendo que dentre as plantas utilizadas neste experimento, o algodão é que apresenta os menores valores e o citros é a que apresenta os maiores valores de reflectância.

- Região do infravermelho próximo (0,7 a 1,3 µm): nesta região existe uma pequena absorção da REM e um considerável espalhamento interno na folha. A absorção da água é geralmente baixa nessa região e a reflectância espectral é quase constante. De uma forma geral, quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior será o espalhamento interno da radiação incidente, e logo, será maior a reflectância.

- Região do infravermelho médio (1,3 a 2,6 µm): a absorção devido a água líquida predomina nessa região. A absorção da radiação nesta região é proporcional a quantidade de água presente na folha (Figura 2.3).

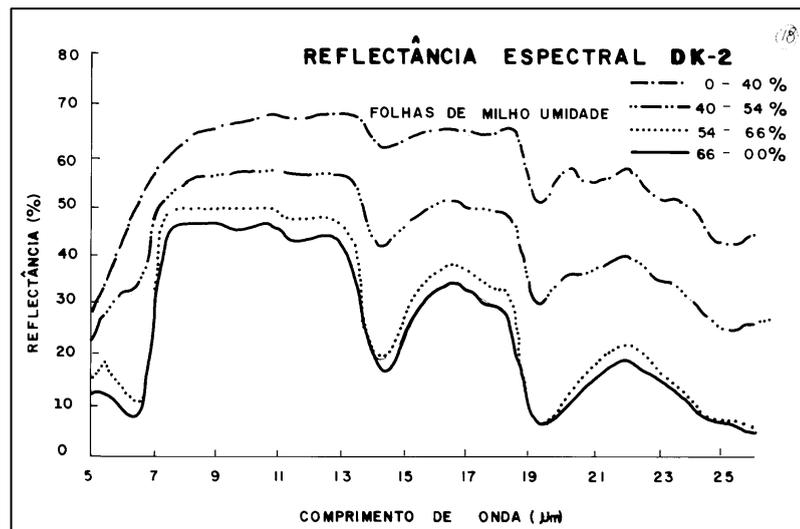


FIGURA 2.3 - Curvas de reflectância para folhas de milho com diferente conteúdo de água.

FONTE: Material de aula de Comportamento Espectral de Alvos, INPE (2002).

Na Figura 2.3 são mostradas as curvas de reflectância das folhas de milho com diferentes teores de umidade. Analisando os valores apresentados, pode-se observar o aumento da absorção da REM em função do aumento do teor de umidade e uma leve saturação para valores maiores que 54%.

2.1.2 Comportamento Espectral de Dosséis Vegetais

A aplicação das técnicas de Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação inclui a necessidade de compreender os processos de interação entre a radiação eletromagnética com todas as partes que compõem uma planta, e o ambiente em que ela se encontra.

Existe uma grande semelhança entre as curvas de reflectância de uma folha quando comparadas com as medições espectrais de dosséis. Essa semelhança permite que os padrões de reflectância, apresentados pelos dosséis vegetais em imagens multiespectrais, possam ser previstos, exatamente, de acordo com o padrão de reflectância da Figura 2.1. Nas imagens referentes à região do visível, em função da ação dos pigmentos fotossintetizantes, os dosséis apresentam tonalidade escura por causa da baixa reflectância da REM nessa faixa espectral. Nas imagens da região do infravermelho próximo, esses mesmos dosséis apresentam-se com tonalidade clara, enquanto que em imagens do infravermelho médio os tons de cinza são intermediários

entre o escuro das imagens do visível e o claro daquelas do infravermelho próximo (Ponzoni, 2001). De uma maneira geral, os valores de reflectância de uma folha isolada na região do visível são mais altos do que aqueles referentes ao dossel do qual a folha faz parte. Já na região do infravermelho próximo, devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética entre as camadas de folhas, os valores de reflectância de um dossel são mais altos que o de uma folha isolada.

A radiação solar que incide sobre um dossel pode ser dividida em duas partes: uma fração da radiação que não é absorvida ou espalhada pela atmosfera, denominada fluxo direto; e outra parte, denominada fluxo difuso, que é espalhada pela atmosfera na direção descendente que incide sobre o dossel que depende das condições atmosféricas e do comprimento de onda.

A partir desta radiação alterada e refletida que é interceptada pelo sensor a bordo de satélites ou aeronaves, relacionam-se às medidas de reflectância com as propriedades da vegetação.

O sensor recebe vários tipos de fluxos (Ponzoni, 2001):

- Fluxo espalhado por um elemento único da vegetação (espalhamento simples) num dado momento;
- Fluxo espalhado por diferentes elementos da vegetação em diferentes momentos de tempo (espalhamento múltiplo) que não atingiu o solo;
- Fluxo refletido pelo solo que não é interceptado por outro elemento da vegetação, ou se é interceptado, então é espalhado na direção do sensor.

Segundo Ponzoni (2001), a distribuição espacial dos elementos da vegetação, bem como suas densidades e orientações, definem a arquitetura da vegetação. A distribuição espacial depende de como foram arranjadas as sementes no plantio se for uma cultura agrícola, do tipo de vegetação existente e do estágio de desenvolvimento das plantas. Em vários modelos de reflectância da vegetação, um dossel é considerado como sendo composto por vários subdosséis, arranjados regularmente ou aleatoriamente no solo.

Para um dossel ou subdossel homogêneo, assume-se que a densidade dos elementos da vegetação é uniforme, o que é caracterizado pelo Índice de Área Foliar (LAI). Este índice representa a razão entre a área do elemento (folha) e a área do terreno, constituindo um dos principais parâmetros da vegetação, que é requerido em modelos de crescimento vegetal e de evapotranspiração, podendo ser relacionado à biomassa.

Existe um outro parâmetro que define a arquitetura do dossel, chamada Distribuição Angular Foliar (DAF), caracterizado por uma função de densidade de distribuição levando em conta a inclinação e azimute da folha. O DAF varia entre os diferentes tipos de dosséis, afetando qualitativamente a reflectância da vegetação, e influencia a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (FDRB). Dosséis compostos por folhas dispostas mais horizontalmente apresentam menor variabilidade na reflectância em função dos ângulos zenitais solar e de visada e apresentam as mais altas reflectâncias para todas as distribuições. Para dosséis compostos por folhas dispostas eretamente, a reflectância diminui com o aumento do ângulo zenital solar na região do visível, enquanto que na região do infravermelho próximo aumenta.

Outros fatores que influenciam a resposta espectral dos dosséis vegetais podem ser observados na Figura 2.4.

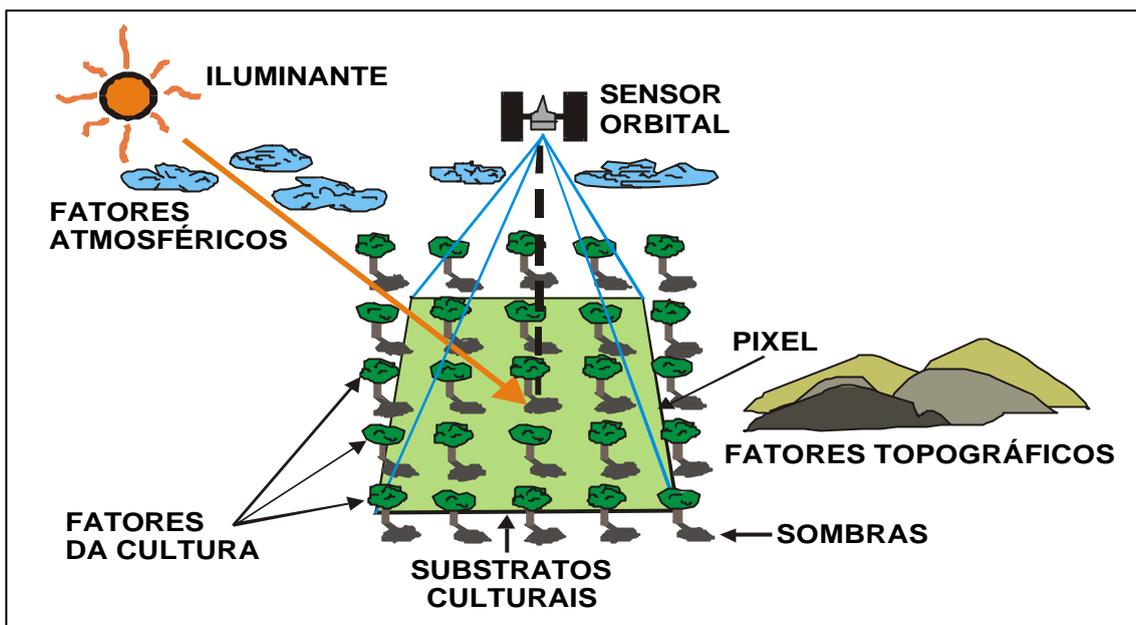


FIGURA 2.4 – Fatores que influenciam a resposta espectral dos dosséis.
 FONTE: Adaptada de INPE (2002).

Na Figura 2.4 podemos observar que fatores como a configuração do plantio, orientação das fileiras e tamanho das plantas, fatores topográficos, ângulo de iluminação e de visada, fatores atmosféricos, configuração da geometria de visada e o substrato da área que está sendo imageada influenciam a resposta espectral dos dosséis.

Como uma parte da REM pode atravessar o dossel e atingir o solo, o que reveste o solo influenciará a reflectância do dossel. Em geral, dosséis mais homogêneos, com grande quantidade de folhas verdes, apresentam-se altamente reflectivos na região do infravermelho próximo e refletem pouco na região do vermelho. Para dosséis menos densos, o efeito da camada inferior do dossel e das sombras deve ser levado em conta.

2.2 O Sensor MODIS

Os produtos gerados pelo sensor MODIS são os principais dados utilizados nesta dissertação. Por tratar-se de um sensor novo, foi elaborada uma breve descrição sobre este sensor e os produtos utilizados nesta pesquisa. Informações adicionais podem ser encontradas em Anderson et al. (2003), em que se relata o contexto e os principais objetivos da NASA em promover um projeto de longa duração, iniciando-se com o lançamento do satélite Terra, que transporta, dentre outros, o sensor MODIS.

Parâmetros técnicos mais detalhados sobre as características deste sensor, e os principais produtos gerados para estudos da superfície terrestre são também descritos.

O satélite Terra foi lançado em dezembro de 1999, começando a coletar dados em fevereiro de 2000, com o horário de passagem as 10:30 hs da manhã no equador. Dentre os sensores que este satélite transporta, o principal deles, o sensor MODIS, foi projetado para atender os requerimentos de três campos de estudos diferentes: atmosfera, oceano e terra. Este sensor apresenta bandas de resolução espectral e espacial selecionadas para o conhecimento de diferentes necessidades observacionais e para oferecer uma cobertura global quase diariamente (Justice, 2002). As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na Tabela 2.1.

TABELA - 2.1 - Especificações Técnicas do Satélite Terra/Sensor MODIS.

Órbita do satélite Terra	705 Km, síncrona com o Sol, polar; 10:30 am descendente
Cobertura de repetição do satélite Terra	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Cobertura dos imageamentos do sensor MODIS	± 55°; 2330 km ("scans" contínuos no nadir no equador)
Resolução espacial do sensor MODIS	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) no nadir
Precisão radiométrica do sensor MODIS	5% Absoluto, <3 µm; 1% Absoluto, >3 µm; 2% de reflectância
Alcance espectral do sensor MODIS	0,4 –14,4 µm
Quantização do sensor MODIS	12 bits
Taxa de Dados do satélite Terra	6,2 Mbps (média), 10,8 Mbps (dia), 2,5 Mbps (noite)
Força do satélite Terra	162,5 W (média para uma órbita), 168,5 W (pico)

FONTE: Adaptada de Justice et al. (2002a, p.4).

As 36 bandas espectrais deste sensor estão localizadas em função de um comprimento de onda, cuidadosamente escolhidos para a observação de feições das propriedades das nuvens, dinâmica e as propriedades da vegetação na cobertura terrestre, e a temperatura da superfície dos oceanos no mundo (Salomonson e Toll, 1990). Estas especificações têm como objetivo evitar as bandas de absorção atmosférica, além de outras feições (linha de Fraunhofer), durante a observação e monitoramento da superfície terrestre (Salomonson e Barker, 1992; Strahler et al., 1999).

As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 nm a 2155 nm, de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1360-1390 nm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético (3660nm a 14385nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (Barker et al., 1992).

a) Em Relação à Resolução Radiométrica:

As bandas desenvolvidas para o monitoramento da superfície terrestre têm uma herança do *Landsat Thematic Mapper* e NOAA/AVHRR (Figura 4.1), com capacidades melhoradas tanto nos menores comprimentos de onda quanto no infravermelho (Justice et al., 1998).

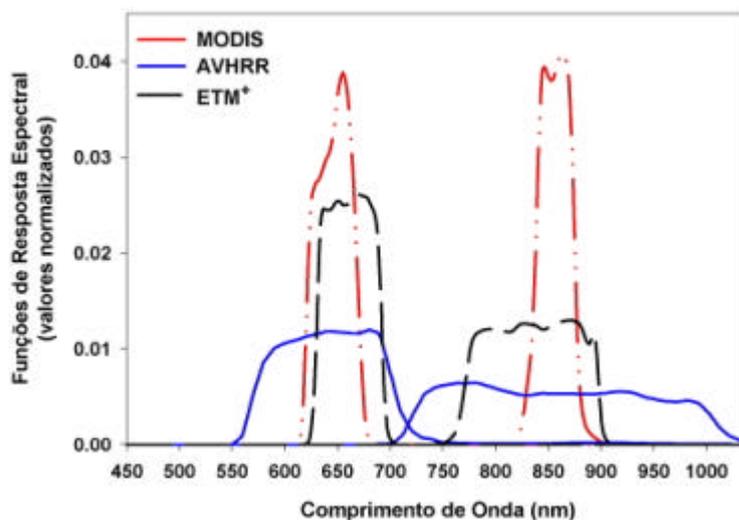


FIGURA 2.5 - Disposição e largura de bandas do sensor MODIS em relação aos sensores ETM+ e AVHRR.

FONTE: Adaptada de Justice et al. (1998).

A faixa espectral de cada uma das bandas e suas aplicações para o monitoramento da superfície terrestre podem ser observadas na Tabela 2.2. Pode-se afirmar que o sensor MODIS possui bandas espectrais finas, específicas para as necessidades da comunidade científica, que desenvolve pesquisas nas áreas continentais do planeta (Strahler et al., 1996).

TABELA 2.2 – Bandas Espectrais do Sensor MODIS para o Estudo da Superfície Terrestre.

Uso preliminar	Bandas	Largura da banda
Terra/ Nuvens / Limites de aerossóis	1	620-670
	2	841-876
Terra/ Nuvens/ Propriedade de aerossóis	3	459-479
	4	545-565
	5	1230-1250
	6	1628-1652
	7	2105-2155

FONTE: Adaptada do website <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specs.html>.

b) Em Relação às Resoluções Espacial e Temporal:

As bandas do MODIS para o estudo da superfície terrestre (*land bands*) possuem resolução espacial de 250 m (para os canais do vermelho e infravermelho próximo) e 500 m (para as bandas do azul, verde e infravermelho médio) que são os valores nominais para pixels no nadir. No limite da largura da área imageada (*swath*, que corresponde a 2.330 km), os pixels crescem com um fator de duas vezes na direção ao longo da linha de imageamento (*long-track*) e de um fator de cinco vezes na direção através da linha de imageamento, denominado *cross-track*.

Na Tabela 2.3, mostra-se uma comparação entre as resoluções espaciais entre dois sensores novos, presentes no satélite Terra, e os que vem sendo utilizados para estudos de monitoramento da parte continental do planeta.

TABELA 2.3 -Comparação Entre as Resoluções Espaciais dos Sensores ASTER, ETM+, MODIS e AVHRR, Utilizadas para o Monitoramento Terrestre.

BANDAS/RESOLUÇÃO ESPACIAL (em metros)	ASTER	ETM+	MODIS	AVHRR
Azul	-	30	500	-
Verde	15	30	500	-
Vermelho	15	30	250	1100
IVP	15	30	250	1100
IVM	30	30	500	-
IVT	90	60	1000	1100

FONTE: Adaptada do website: www.earthobservatory.nasa.gov.(2003).

Em relação à resolução temporal do satélite TERRA, é apresentado abaixo uma Tabela comparativa entre alguns sistemas sensores orbitais (Tabela 2.4).

TABELA 2.4 – Intervalos de Revisita de Alguns Satélites de Sensoriamento Remoto.

Sistema	Intervalo de Revisita (dias)	Passagem no Equador
Landsat/TM e ETM+	16	09:45h e 10:00h
SPOT/HRV	26 (ao Nadir); 4 a 5 (com apontamento ^a)	10:30h
Terra/MODIS	2	10:30h
Terra/ASTER	16	10:30h

(^a) – direcionamento da visada para a lateral.

FONTE: Adaptada de Schowengerdt (1997).

Nota-se que o sensor MODIS possui um intervalo quase diário para a revisita de uma área, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas tanto terrestres, quanto oceânicas.

c) Em Relação a Geolocalização:

A geolocalização (georreferenciamento) do sensor MODIS foi estabelecida através do uso de uma técnica paramétrica, onde pontos de controle foram aplicados somente para remover as direções tendenciosas. Sua orientação em relação a Terra é obtida através de sensores a bordo do satélite. Sua distância da Terra é medida por um giro inercial e por um sensor “star-tracking”, onde a posição é medida por um TDRSS (“Tracking Data

Relay Satellite System”) a bordo de um sistema de navegação (TONS) (Telles et al., 1995).

Os produtos de georreferenciamento do sensor MODIS definem as coordenadas geodésicas, elevação do solo (altitude), e ângulos zenitais solar e azimutal para cada amostra de 1 Km do MODIS. Esses dados são fornecidos como parte do banco de dados das radiâncias calibradas no nível 1B e os dados do nível 2, para permitir um processamento posterior, ou seja, estes dados serão, subseqüentemente usados para reamostrar espacialmente e compor temporariamente os produtos MODIS em grades georreferenciadas.

No momento do lançamento, o sensor MODIS apresentava uma precisão de geolocalização de 1.700 metros, e com o ajuste inicial dos algoritmos em maio de 2000, a precisão já era de 150 metros. Em dezembro de 2000, a acurácia de geolocalização atingiu 50 metros, conforme havia sido planejado pelo projeto.

2.2.1 Produtos Gerados pelo Sensor MODIS

A importante aplicação da informação precisa sobre a cobertura global da superfície está na inferência de parâmetros, que influenciem, 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 sensores, citando como exemplo, o próprio MODIS.

Nesse sentido, o objetivo dos produtos voltados para aplicações terrestres gerados pelo sistema MODIS está, basicamente, na quantificação e detecção das mudanças nos processos naturais e antrópicos, auxiliando assim, nos diversos modelos regionais e globais existentes (Strahler et al, 1999).

Neste item serão descritos os dois produtos utilizados nesta dissertação: produtos MOD09 e MOD13.

a) Produto MOD09

Este produto refere-se às imagens de reflectância espectral de superfície, para as bandas 1 a 7, centradas nos seguintes comprimentos de onda : 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, e 2130 nm (Justice et al., 2002), e é computado a partir dos níveis 1 A de processamento (Justice et al., 1998). É disponibilizado com resolução espacial de 250 e 500 metros, em resolução temporal diária e composições de oito dias, corrigidas atmosféricamente. O produto com 250 m de resolução espacial possui as bandas de resolução de 500 m reamostradas para 250 m através do método de duplicação do número de linhas e colunas, utilizando o interpolador vizinho mais próximo.

Os procedimentos de correção atmosférica deste produto foram criados a partir de um modelo desenvolvido por Tanré et al. (1986), denominado *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Radiative Code* (6S), o qual foi simplificado para uma aplicação mais operacional. A reflectância de superfície é um dado de entrada para a obtenção de diversos outros produtos relacionados aos estudos da superfície terrestre, tais como: BRDF/albedo, FPAR/LAI e Índices de Vegetação.

Em adição às bandas de reflectância da superfície, este produto vem acompanhado pelas informações de cada pixel garantindo a integridade de seus dados através da QA (Quality Assurance): integridade da estimativa da reflectância da superfície; sucesso da conclusão do esquema de correção; presença de nuvens (claro, nublado, parcialmente nublado, fechado); presença de nuvens Cirrus (sem cirrus, baixa, média e alta); fonte de informações de aerossóis: climatologia; presença de aerossol (baixo, médio e alto); fonte de informação de vapor d'água e ozônio: climatologia; e se o pixel é terra ou água.

b) Produto MOD13

O produto MOD13 se refere às imagens índices de vegetação (NDVI e EVI), incluindo as bandas utilizadas para a geração destes índices: azul, vermelho, infravermelho próximo, além de uma banda localizada na faixa do infravermelho médio (banda 7). Este produto apresenta estas imagens geradas automaticamente e disponibilizadas na forma de mosaicos quinzenais, mensais e anuais.

A aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento da cobertura vegetal tem respaldo na constante necessidade de avaliação e de acompanhamento dos recursos vegetais. O objetivo final pode ser o aumento da produção e da qualidade de alimentos, a preservação e o melhoramento das condições ambientais, etc. Para isso, diversos estudos têm sido realizados no sentido de otimizar a informação sobre estes recursos, mais especificamente para a identificação da sua composição, abundância, estado fitossanitário e produção.

Muitos trabalhos têm utilizado os índices de vegetação, que são combinações de dados espectrais de duas ou mais bandas, normalmente do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP), cuja operação matemática resulta em um valor adimensional. A importância destes índices (IV) está em sua estreita correlação com vários parâmetros biofísicos da vegetação, ou seja, na possibilidade de se estimar parâmetros como índices de área foliar (IAF), biomassa vegetal, produtividade e atividade fotossintética (Huete et al., 1988). Fensholt et al. (2004) estudando os índices de vegetação do sensor MODIS em uma região do semi-árido no Senegal em comparação com o fPAR (radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação) mostrou uma forte correlação linear, apesar dos dados fPAR do MODIS apresentarem uma tendência a superestimativa nos ecossistemas estudados. No entanto, existem algumas limitações relacionadas ao próprio fenômeno de interação entre a radiação e a vegetação, apresentando pontos de saturação em sua medição, enquanto observa-se um caráter contínuo em outros parâmetros, como na biomassa e LAI, sugerindo-se que para a utilização destes índices, os estudos sejam conduzidos cuidadosamente para uma maior confiabilidade nos resultados encontrados.

Alguns objetivos específicos dos índices de vegetação incluem: desenvolvimento de precisão de medidas empíricas da vegetação, descrevendo tanto as variações temporais quanto espaciais na composição da vegetação e sua condição e atividade fotossintética. Além disso, amplifica a sensibilidade da resposta da vegetação, fornecendo dados mais precisos para análises quantitativas e de estimativas de parâmetros biofísicos comparáveis para inserção em modelos climáticos e de biomas globais. Pela metodologia com que são gerados, os índices de vegetação maximizam o monitoramento da cobertura da terra, em escala global com resoluções espaciais e temporais mais acuradas possíveis dentro das características do instrumento e das propriedades da superfície imageada. Minimizam também os efeitos residuais das nuvens, sombra das nuvens e aerossóis atmosféricos, padronizando as variáveis do sensor como ângulo solar e de visada (efeitos da BRDF) de pixels livres de nuvens no nadir (Huete et al., 1988).

Além das características da vegetação estudada, outros fatores influenciam a determinação destes índices, como aqueles mais diretamente relacionados com a superfície, como, por exemplo, a influência do solo. Os fatores de origem externa envolvem a influência da atmosfera, da geometria de aquisição de dados, as características do sensor e o posicionamento e largura das bandas.

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é uma relação entre medidas espectrais (reflectância - ρ) de duas bandas, a do infravermelho próximo (700-1300 nm) e a do vermelho (600-700 nm), e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo do Sol e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica, observados para dados multitemporais. Os valores obtidos com o NDVI são contidos em uma mesma escala de valores, entre -1 e 1, utilizando-se a equação (equação 2.1):

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}) \quad (2.1)$$

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

(Azzali e Menenti, 2000), entretanto, estudos de monitoramento da vegetação utilizando este índice têm apresentado bons resultados (Batista et al., 1997, du Plessis, 1999).

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa e o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel, reduzindo assim as influências atmosféricas. O EVI é calculado através da seguinte equação (equação 2.2):

$$\text{EVI} = G (\text{NIR} - \text{Vermelho}) / (\text{L} + \text{NIR} + \text{C1 vermelho} - \text{C2 azul}) \quad (2.2)$$

Onde: L = fator de ajuste para os componentes abaixo do dossel (*canopy background*);

C1 e C2 = coeficientes para ajuste das resistências dos efeitos dos aerossóis da atmosfera; e G = fator de ganho.

Estes coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são: L=1, C1=6, C2=7,5 e G = 2,5 (Huete et al., 1994; Huete et al., 1997).

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 (IAF), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete et al., 2002).

Estes índices (NDVI e EVI) oferecem dados temporais e espaciais consistentes sobre as condições da vegetação, de modo a monitorar a atividade fotossintética em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e estudo da fenologia. Por exemplo, o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) tem sido relacionado com a cobertura de dossel (Gurgel e Ferreira, 2003), índice de área foliar, produtividade de biomassa (Boken e Shaykewich, 2002; Unganai e Kogan, 1998) e produtividade primária (Matsushita e Tamura, 2002), dinâmica do risco do fogo (Maselli et al., 2003), e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Ridao et al., 1998). Alguns estudos têm utilizado também o NDVI com o objetivo de avaliar a fenologia (Lu et al., 2003) e para desenvolver modelos fenológicos em escalas regionais (Seen et al., 1995) e globais. Análises no padrão do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para

florestas temperadas (Spanner et al., 1990, Duchemin et al., 1999) e florestas boreais (Royer et al., 1996) têm mostrado grande consistência com a resposta da vegetação à sazonalidade.

Myneni et al. (1997) apresentaram dados de NDVI de um período de 10 anos para florestas boreais, mostrando uma tendência de aquecimento da temperatura global por meio do alongamento da estação de crescimento das plantas, que havia se estendido por duas semanas. Tucker (1986) similarmente utilizou o NDVI para demonstrar as expansões e contrações da vegetação no Saara.

O produto índice de vegetação, do sensor MODIS, apresenta-se potencialmente consistente para análises temporais das condições da vegetação global, podendo ser utilizado para monitorar a atividade fotossintética da vegetação em suporte a detecção de mudança e interpretações biofísicas e da fenologia. Os objetivos dos índices de vegetação do MODIS são: gerar índices de vegetação em imageamentos sem nuvens, maximizar a cobertura global e temporal na resolução espacial mais fina possível, padronizar dados de acordo com a posição sol-sensor-alvo, assegurar a qualidade e a consistência dos dados, descrever e reconstituir dados de variações fenológicas e discriminar com precisão variações interanuais na vegetação.

Algumas considerações devem ser levadas em conta para a aquisição destes dados, como o tamanho do pixel, a sua distorção no final da geração da imagem, a padronização dos dados segundo visada ao nadir e problemas com saturação do índice de vegetação, decorrente das visadas fora do nadir e com ângulos zenitais solares elevados.

Os mosaicos gerados por este produto permitem a avaliação das variações temporais da atividade da vegetação. São gerados a cada 8, 16 e 30 dias, para um monitoramento preciso da sazonalidade. O produto é reamostrado para fornecer dados livres de nuvens, através da seleção de pixels com o máximo valor de NDVI. Estes dados apresentam-se também atmosféricamente corrigidos, e o produto é gerado levando-se em conta o ajuste no nadir para evitar distorções devido à compressão de dados nos pixels localizados nas

bordas das imagens. As resoluções espaciais disponíveis para este produto são de 250 m, 500 m e 1 Km.

O MOD 13 possui o índice da diferença normalizada (NDVI) e o índice de vegetação melhorado (EVI) (Figura 2.6). Além dos índices de vegetação, este produto também é composto pelas imagens de reflectância do azul, vermelho, IVP e IVM e dados de qualidade (QA) das composições.

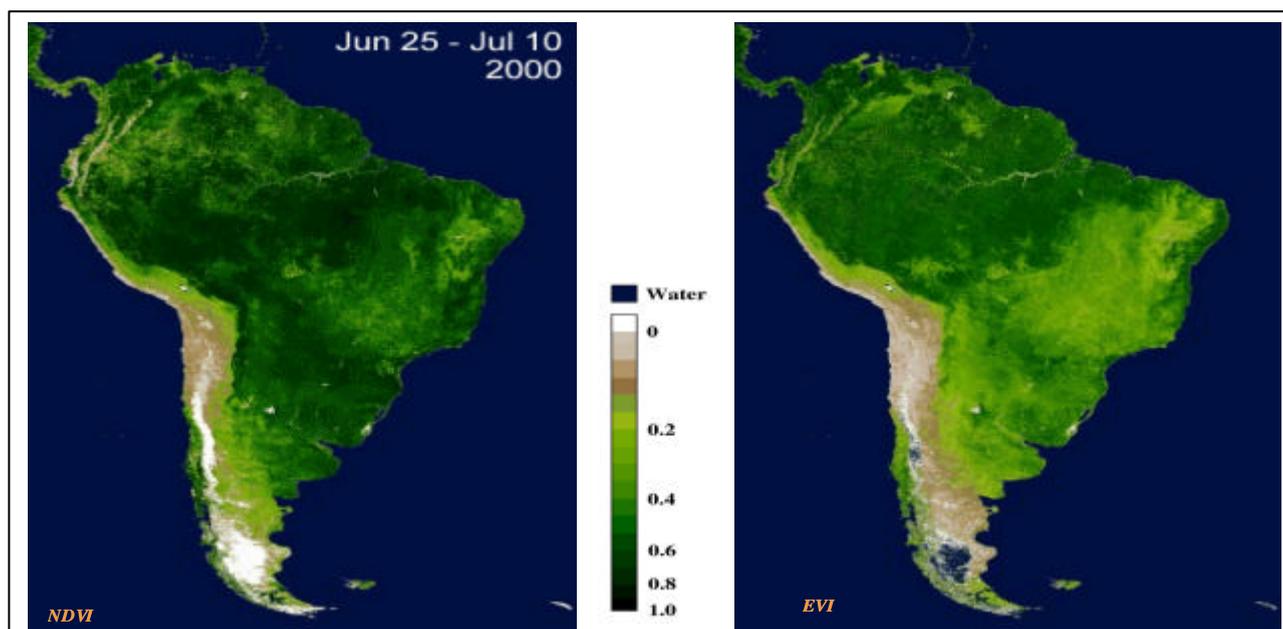


FIGURA 2.6 - Produto MOD13: NDVI e EVI, do período de 25 de junho a 10 de julho de 2000, com resolução espacial de 500m, abrangendo a América do Sul.
FONTE: Adaptada de http://tbrs.arizona.edu/cdrom/VI_Intro/VI_Introduction.html.

Estes dois índices se complementam em estudos globais da vegetação e fornecem informações sobre detecção de mudanças vegetais e parâmetros biofísicos do dossel.

2.3 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 pode 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 (Lillesand e Kiefer, 1994).

A detecção de mudanças em estudos de formações vegetais envolve o uso de imagens multitemporais para a discriminação das áreas que foram alteradas entre as duas datas de imageamento. Nos estudos multitemporais, onde há a comparação pixel a pixel em diferentes datas para o monitoramento de mudanças, as imagens orbitais necessitam da aplicação de correções, que normalizam todas as cenas sob os mesmos parâmetros (Lillesand e Kiefer, 1994).

2.3.1 Correção Geométrica e Registro de Imagens

No processo de imageamento e geração das imagens orbitais, estas estão sujeitas a diversas fontes de erros, os quais introduzem distorções geométricas, provocando desta forma uma certa imprecisão cartográfica, no que se refere ao posicionamento e localização dos objetos imageados.

As principais fontes de distorções geométricas que ocorrem em imagens de sensores remotos orbitais são devido a erros instrumentais, de rotação e curvatura da terra, instabilidade na plataforma (altitude, atitude e velocidade) e às relacionadas diretamente com a geometria de aquisição (Mather, 1999; Richards, 1993).

Muitas aplicações de dados de sensoriamento remoto requerem duas ou mais cenas, adquiridas em datas diferentes, e há a necessidade de que estas distorções sejam corrigidas. Deste modo, podem ser definidos alguns parâmetros, como a escala e a projeção geográfica, eliminando assim as distorções geométricas causadas pelo processo de imageamento. Segundo Mather (1999), esta transformação é conhecida como correção geométrica. Por exemplo, quando os interesses são as mudanças ocorridas em uma determinada área, as imagens registradas permitirão que uma comparação pixel a pixel seja feita (Richards, 1993).

Mather (1999) e Richards (1993) afirmam que o procedimento da correção geométrica envolve diretamente três etapas: primeiro a determinação da relação entre o sistema de

coordenadas geográficas de um mapa e a imagem; em seguida o estabelecimento de um conjunto de pontos de controle, para definir a posição dos pixels na imagem com as propriedades cartográficas do mapa; e por fim o cálculo dos valores de intensidade dos pixels na imagem corrigida, através de um algoritmo de interpolação das intensidades dos pixels da imagem original. A utilização de pontos de controle deve ser de alta qualidade de forma que a relação geométrica entre as imagens e o sistema de coordenadas tenha grande concordância, assim, no que se refere à correção geométrica, as imagens poderão ser analisadas temporal e espacialmente (Du et al., 2002). No caso do registro ser realizado entre imagens (pode utilizar-se uma imagem já registrada como base, ou realizar um registro imagem-imagem, quando o estudo não implica em uma correta geolocalização da área estudada) são necessários apenas dois passos, tornando o processo mais operacional (Richards, 1993).

Para modelar a transformação de coordenadas, utiliza-se um polinômio linear, que pode ser de primeira, segunda ou terceira ordem. Richards (1993) afirma que o grau do polinômio a ser aplicado dependerá do número de pontos de controle, e quanto maior o grau deste polinômio, maior será o número de pontos de controle que deverão ser coletados.

O método do vizinho mais próximo é um procedimento em que o interpolador atribui ao valor de nível de cinza do pixel da imagem corrigida, o mesmo valor do nível de cinza do pixel que se encontra mais próximo da posição a ser ocupada. Não há alteração no valor de nível de cinza. Segundo Mather (1999) e Crosta (1992), o método do vizinho mais próximo apresenta algumas vantagens, como o de ser um método simples, por preservar o número digital original e também por ser de rápido processamento. Entretanto, também apresenta algumas desvantagens, como a de gerar uma imagem pouco estética e por apresentar um deslocamento espacial de até meio pixel na imagem corrigida.

2.3.2 Correção e Retificação Radiométrica das Imagens

Além dos erros geométricos que podem estar presentes na imagem, podem ocorrer também erros relacionados aos valores de medida do brilho do pixel. Estes podem ser

devido ao instrumento utilizado para gravar os dados (satélites, sensores aerotransportados), e a efeitos atmosféricos (Richards, 1993). O processo de retificação radiométrica é necessário quando se deseja trabalhar com análises quantitativas multitemporais de um determinado sensor, ou quando se utilizam diferentes sensores.

Price (1987) relata sobre o início dos trabalhos que desenvolveram a capacidade de utilizar dados oriundos de sensores remotos, principalmente do Landsat Thematic Mapper (TM) para análises quantitativas. Segundo o autor, tais trabalhos só foram possíveis devido às informações quantitativas, que foram disponibilizadas poucos anos antes. Isto ocorreu devido a dois fatores: o primeiro é que as primeiras aplicações destes dados não requeriam a utilização da radiometria, como por exemplo, trabalhos de mapeamento da cobertura vegetal. O outro fator é em relação à fase de desenvolvimento das tecnologias de engenharia, em que a radiometria não era um ponto principal nos projetos de pesquisa da NASA. As principais complicações para os pesquisadores estavam relacionados à deficiência da documentação de calibração pré-lançamento, performance em vôo, estabilidade dos sensores a longo prazo, estimativa da acurácia e estimativa dos erros e verificação em campo para a validação dos resultados.

A partir do desenvolvimento de programas que visavam um monitoramento a longo prazo com o intuito de se estudar mudanças na cobertura e dos processos que ocorrem no meio ambiente e balanço global de energia, a calibração absoluta da radiometria dos sensores multiespectrais tornou-se fundamental (Slater et al., 1987).

Com a finalidade de obter resultados que representem quantitativamente os valores físicos reais de uma imagem gerada por sensores remotos, Robinove (1982) sugere que os valores em DN da imagem sejam transformados para valores de reflectância (ρ) pois esta minimiza a variabilidade provocada por diferentes condições de iluminação no comportamento espectral dos alvos (Bentz, 1990), permitindo realizar com maior precisão medições mais absolutas do alvo.

Markham e Barker (1987) desenvolveram um método para a transformação dos DN para reflectância aparente (ρ_a) em que os dados dos efeitos atmosféricos não são considerados. Nesta metodologia são discutidas três fontes de imprecisão que afetam os

dados: (1) padrões de calibração no pré-lançamento do sensor, (2) efeitos inerentes do sensor, e (3) efeitos do processamento. Os principais fatores limitantes para a precisão desta calibração são os parâmetros relacionados a etapa de pré-lançamento, e, além disso, as calibrações tendem a degradar após os primeiros anos de imageamento do sensor.

Singh (1989) faz uma revisão sobre as principais técnicas para a detecção de mudanças, baseado em dados de sensores remotos. Segundo o autor, a detecção de mudanças é o processo de identificar diferenças no estado de um objeto ou fenômeno através da observação em diferentes momentos. Nesta análise, o autor ressalta a importância da retificação geométrica, ou seja, o registro entre as duas imagens de datas diferentes deve estar bastante preciso, pois detectar as alterações envolve essencialmente a habilidade de quantificar efeitos temporais através de dados multitemporais. Para que estas mudanças possam ser detectadas, as alterações na cobertura devem resultar em alterações nos valores de radiância devido às próprias mudanças da cobertura de uma forma mais evidente que as mudanças devido a outros fatores.

Mas (1999), dez anos depois, faz uma nova análise para a comparação de técnicas de detecção de mudanças. Neste trabalho, o autor ressalta a importância de se realizar um ajuste para compensar a divergência radiométrica entre dados multitemporais, quando se deseja realizar uma análise quantitativa. Para isso, existem dois caminhos para alcançar esta compensação radiométrica: (1) através da calibração radiométrica, convertendo todos os dados de valores em DN para valores de reflectância do terreno, e (2) realizando a normalização radiométrica entre os multi-dados.

Hall et al. (1991) desenvolveram uma técnica na qual as imagens são retificadas com relação a uma imagem referência e devem parecer como se tivessem sido obtidas pelo mesmo sensor e nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação da imagem utilizada como referência, ou seja, compensa as diferenças de calibração entre sensores, a atmosfera e os diferentes ângulos de iluminação entre as imagens.

O princípio desta metodologia consiste na seleção de conjunto de pontos de controle, claros e escuros, que correspondem a alvos com baixa ou nenhuma variação em suas

reflectâncias médias (feições pseudo-invariantes), as quais são usadas para a calibração do modelo linear de retificação (Figura 2.13). Para a seleção destes pontos, os dados originais são submetidos a uma transformação linear conhecida como “Tasseled Cap”, onde um novo sistema de coordenadas exhibe os dados das diferentes bandas associados às propriedades biofísicas dos alvos. Os eixos relevantes para a seleção dos pixels invariantes são o brightness, associado às variações do solo, enquanto que o greenness é associado às variações da vegetação verde. Baseado na análise da dispersão dos pixels deste diagrama, é possível identificar uma amostra de pixels claros e escuros que representariam as feições que não variam entre as datas (Shimabukuro et al., 1998). Os pixels selecionados para a imagem referencia não precisam ser exatamente os mesmos pixels da imagem que se deseja retificar, mas sim, os extremos de solo exposto e água (para evitar os efeitos da resposta da vegetação ao meio) das imagens greenness e brightness, que são obtidos através do diagrama de dispersão Kauth-Thomas. A aplicação do modelo normaliza as respostas radiométricas das imagens nas diferentes bandas, quando o caso das distorções originadas é devido ao espalhamento atmosférico. O espalhamento atmosférico ocorre segundo a interação das partículas de aerossóis da atmosfera com diferentes amplitudes de comprimentos de onda, conhecidos como espalhamento “Rayleigh” e “Mie”, sendo que o efeito é diferente em cada banda, mais presente nas regiões do visível. Quando as distorções originadas nas imagens são devidas ao sensor, o problema está na não linearidade entre a entrada da radiação captada com o sinal de saída. Mather (1999) reforça a necessidade da realização da retificação radiométrica em estudos multitemporais, e os ângulos de elevação solar devem ser considerados e corrigidos, assim como o fator de degradação do sensor deve ser avaliado.

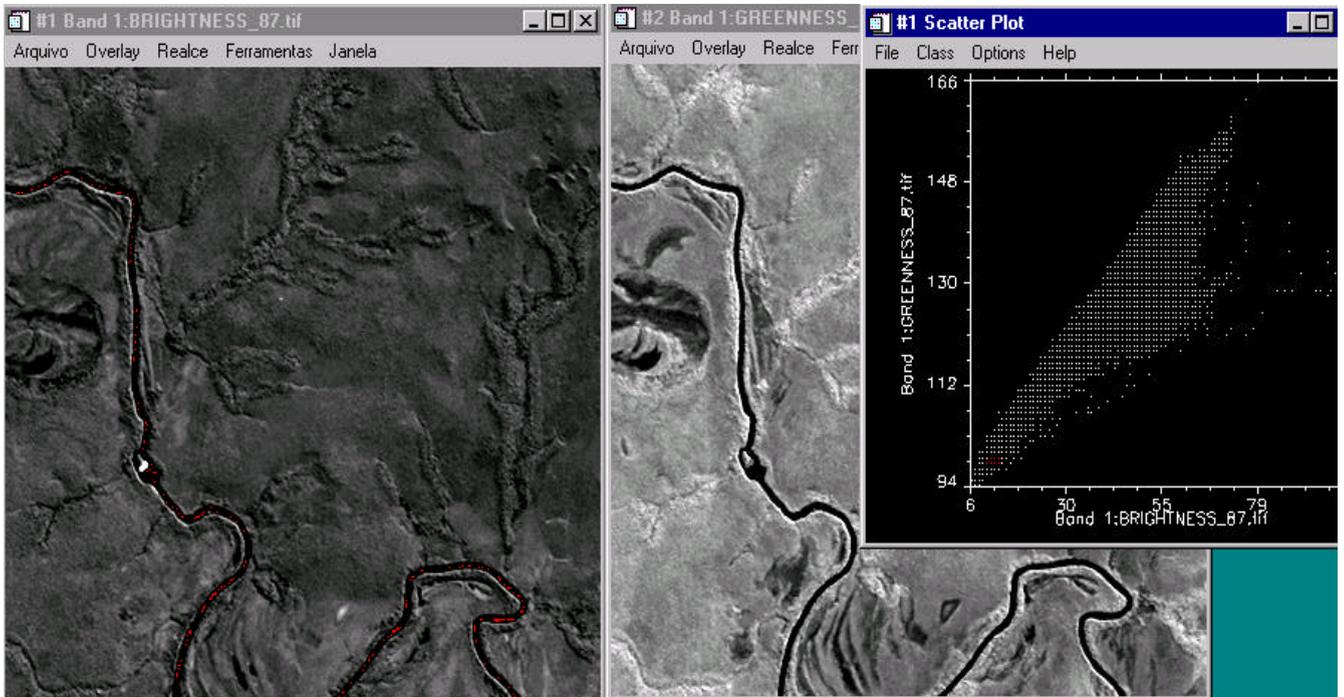


FIGURA 2.7 - Exemplo da seleção de pontos de controle escuros.

Este método desenvolvido por Hall et al. (1991) não requer a utilização de parâmetros dos sensores (ganho e offset) e das propriedades atmosféricas e corrige a imagem em relação à cena utilizada como base de uma forma relativa e não absoluta devido às dificuldades de se obter dados sobre as condições atmosféricas e de calibração dos sensores no momento da aquisição das imagens. O modelo matemático que melhor descreve a normalização entre duas ou mais imagens de uma mesma área, adquirida em diferentes datas envolve o uso da regressão (Du et al., 2002), assumindo que pixels amostrados em um momento 2 é linearmente relacionado aos pixels de mesma localização no momento 1. Segundo este autor, a chave para o método de regressão é a seleção dos pontos de controle ou feições pseudo-invariantes, que em trabalhos anteriores (Hall et al., 1991; Coppin e Bauer, 1996; Burns e Joyce, 1981; Singh, 1989) tratou-se de uma seleção bastante subjetiva. Apesar dos resultados obtidos com estas metodologias serem bastante satisfatórios, Du et al (2002) desenvolveram uma

metodologia estatística para a seleção dos pontos invariantes. Além disso, segundo o autor acima, na normalização radiométrica se o ganho calculado é menor que uma unidade ou o offset é menor que zero, a imagem corrigida perderá resolução radiométrica comparada com a data original.

Para a aplicação do método de Hall et al. (1991), são considerados os parâmetros de pós-calibração do sensor (radiância mínima $L_{\min\lambda}$ e radiância máxima $L_{\max\lambda}$), a distância entre o Sol e a Terra (d) e o valor do ângulo zenital solar (θ_s).

A Equação 2.1 mostra a conversão do número digital (ND) para radiância (L_λ), e em seguida, na Equação 2.2, a radiância (L_λ) é convertida para reflectância aparente (ρ_a).

$$L_\lambda = L_{\min\lambda} + (L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}) * QCAL / QCAL_{\max\lambda} \quad (\text{Equação 2.1})$$

$$\rho_a = (\pi L_\lambda d^2) / (E_{\text{sun}\lambda} \cos \theta_s) \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde:

ρ = reflectância exo-atmosférica;

L_λ = radiância espectral no detetor em $\text{mw}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$;

d = distância Terra-Sol em unidades astronômicas;

$E_{\text{sun}\lambda}$ = irradiância espectral média no topo da atmosfera, em $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$;

θ_s = ângulo zenital solar, em graus;

$QCAL$ = radiância calibrada e escalonada para o intervalo 0 a 255, em unidades de número digital;

$QCAL_{\max\lambda}$ = amplitude de variação dos níveis digitais.

Nesta pesquisa, utilizou-se a metodologia desenvolvida por Hall et al. (1991), de forma que houve uma normalização radiométrica entre as imagens (Mass, 1999).

2.3.3 Classificação e Interpretação da Cobertura Vegetal

Nos últimos anos, houve um crescimento da utilização de pesquisas baseadas em dados de sensoriamento remoto para melhorar a precisão das classificações da cobertura da terra nas diferentes distribuições geográficas, em escalas regionais e globais (DeFries et al., 1998).

Segundo Mather (1999), os processos utilizados para a classificação possuem dois estágios. O primeiro é o reconhecimento de categorias de objetos no mundo real. No contexto do sensoriamento remoto de superfícies terrestres, estas categorias podem incluir, por exemplo, florestas, corpos de água, e outros tipos de cobertura, dependendo da escala geográfica e da natureza do estudo. O segundo estágio no processo de classificação é o rotulamento das entidades, geralmente pixels, a serem classificados. Na classificação digital de imagens, estes rotulamentos são numéricos, então um pixel que é reconhecido como pertencente a classe “água”, por exemplo, pode ser rotulado como “1”, floresta pode ser classificado como “2”, e assim sucessivamente. O processo de classificação de imagem requer que o usuário siga os seguintes passos:

- determinação a priori do número e natureza das categorias em termos de quais tipos de cobertura serão classificados, e
- atribuição de rótulos numéricos aos pixels, baseado em suas propriedades, utilizando algum procedimento de decisão.

Dependendo do processo de classificação, os classificadores podem ser divididos em dois tipos: classificadores pixel a pixel e classificadores por região. Os classificadores pixel a pixel utilizam apenas a informação espectral isoladamente, de cada pixel, para achar regiões homogêneas. Estes 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 de informação espectral de cada pixel, a informação espacial que envolve a relação entre os pixels e seus vizinhos. Estes classificadores procuram simular o comportamento de um foto-intérprete, ao reconhecer áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais da

imagem. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar as regiões e as propriedades espaciais e espectrais que irão unir áreas com mesma textura (INPE, 2003).

A classificação pode ser realizada de forma automática, em que o computador realiza a tarefa de analisar atributos numéricos de um pixel. A fotointerpretação é feita por analista humano, retirando da imagem informações na inspeção visual. A classificação automática é mais precisa, pois utilizam-se dados matemáticos e trata cada pixel isoladamente, podendo também utilizar mais que três bandas para realizar a classificação. A classificação automática pode ser supervisionada e não-supervisionada. Na classificação não-supervisionada, o usuário não precisa de um conhecimento prévio da área que será classificada, nem das classes que estão presentes na região. O classificador presente no aplicativo deve ser capaz de dividir o espaço de atributos em regiões diferentes, cada uma representando uma classe. O classificador, portanto, deve ser capaz de definir a fronteira de decisão entre classes que particionam uma imagem em classes de acordo com o conhecimento sobre o conjunto de padrões (INPE, 2003).

A classificação supervisionada é realizada tendo o usuário conhecimento prévio da área, selecionando na imagem as classes de interesse, que são descritas por parâmetros estatísticos que a identificam. Através de amostras coletadas na imagem são realizados treinamentos onde se utilizam os parâmetros descritos anteriormente, para a decisão de classificação de determinado pixel ou região (Mather, 1999).

Price (2003) comparou os dados ETM+ e MODIS para a classificação de diferentes tipos de cobertura da terra em áreas extensas. Segundo este autor, medidas espectrais em escalas orbitais, podem sofrer ambigüidades matemáticas devido à proporção de mistura dos diferentes tipos de superfície, influenciando os classificadores. Isto não significa que medidas espectrais derivadas de dados orbitais sempre falham ao produzir estimativas em áreas heterogêneas. Ao contrário disso, seu estudo demonstrou que as imagens MODIS com 500 metros de resolução espacial podem produzir essencialmente os mesmos resultados para alguns tipos cobertura de superfície que os dados ETM+ de 30 metros de resolução espacial.

Nesta dissertação utilizaram-se dois classificadores por regiões: o Ioseg e o Histograma, e um classificador pixel a pixel, o k-média (disponíveis a partir da versão 4.0 do aplicativo SPRING). A seguir encontra-se uma breve descrição de cada um destes classificadores (Sant'anna, 2004).

- Ioseg: este algoritmo agrupa regiões a partir de uma certa similaridade entre elas. Esta similaridade consiste na distância de Mahalanobis entre a classe e as regiões que podem ser classificadas como pertencentes a esta classe. Os atributos estatísticos utilizados por este classificador são: matriz de covariância e vetor de médias (Bins et al., 1993).
- Histograma: para este algoritmo, é fornecido pelo usuário o número de classes que se deseja classificar a imagem. O critério de similaridade para o agrupamento das regiões em torno das classes é baseado na diferença entre os histogramas acumulados da classe e da região.
- k-média: os centros das classes são distribuídos no espaço de atributos visando minimizar o erro quadrático médio.

2.3.4 Mapeamento da Cobertura Vegetal

As imagens derivadas de produtos do sensoriamento remoto são uma excelente fonte de dados para produzir mapas de cobertura vegetal e uso da terra. Estes mapas geralmente são gerados a partir de técnicas de processamento de imagens, derivados de produtos da classificação digital.

Até recentemente, o AVHRR era o único instrumento viável para fornecer dados para o mapeamento global da vegetação. Enquanto que muitos estudos foram desenvolvidos baseados nos dados AVHRR, com a disponibilidade dos dados MODIS, que possui os atributos espectrais, espaciais e geométricos mais finos, abre-se uma nova possibilidade de pesquisas e desafios para a geração de mapas baseados em dados de sensoriamento remoto (Friedl et al., 2002).

Friedl et al. (2002) estão desenvolvendo um mapa global da cobertura da terra utilizando dados MODIS, através da metodologia de classificação supervisionada e algoritmo MLCCA (classificação supervisionada baseada no método de árvore de decisão). O principal objetivo da pesquisa destes autores é a geração de um produto que ofereça uma resolução espacial suficientemente fina para a utilização deste mapa pela comunidade científica que desenvolve trabalhos com modelagem. O segundo objetivo, é a realização deste produto anualmente, de forma que possa analisar as dinâmicas da cobertura da terra a partir da geração de mapas em anos consecutivos. Os resultados preliminares obtidos mostraram grande evidência que o suporte da qualidade radiométrica do MODIS fornecem melhoras significativas em termos de qualidade com relação ao AVHRR.

Hansen et al. (2002) utilizaram dados IKONOS para realizar o treinamento dos dados, para a aplicação do método de análise de árvores de regressão (DeFries et al., 1997) com o objetivo de estimar para as imagens ETM+ a porcentagem da camada de cobertura de árvores. Foram realizados trabalhos de campo na área de estudo com o objetivo de avaliar a consistência dos dados gerados. Um mapa de resolução de 250 metros foi gerado, a partir do agregamento dos dados ETM+ com as classes gerais fornecidas pelo GOF (Global Observations of Forest Cover). Com o objetivo de testar a habilidade do sensor MODIS para gerar mapas de porcentagem de cobertura de árvores, agregou-se às imagens MODIS de 250 m de resolução ao mapa de 250 metros gerado. Os resultados encontrados na pesquisa de Hansen et al. (2002) mostraram que as bandas MODIS 250 metros produziram um mapa consistente com os dados de campo coletados nas descrições das porcentagens da cobertura de árvores.

2.3.5 Modelo de Mistura Espectral

Em imagens de sensoriamento remoto, o tamanho do pixel, em geral, pode incluir mais de um tipo de cobertura do terreno. Quando estes sensores observam a superfície da Terra, a medida da radiância é a integração da radiância de todos os objetos que estão contidos num pixel, implicando nos problemas denominados problemas de mistura espectral (Aguiar et al., 1999). Estes problemas são ainda mais freqüentes em imagens

de baixa e média resolução espacial, devido ao tamanho da área imageada, sendo mais difícil encontrar pixels puros.

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes, tais como solo, sombra e vegetação, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas, gerando imagens fração solo, vegetação e sombra (Shimabukuro e Smith, 1991). O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$r_i = a*veg + b*solo_i + c*sombra_i + e_i \quad (2.3)$$

Onde r_i é a resposta do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; veg_i , $solo_i$ e $sombra_i$ são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente; e_i é o erro na banda i e i indica a banda a ser utilizada (Shimabukuro et al., 1997).

Shimabukuro e Smith (1995) geraram as imagens fração, derivadas do modelo de mistura linear através do método de mínimos quadrados com restrição (método mais simples e rápido, aplicável quando o número de componentes é igual a três. A restrição pode ou não ser aplicada nos dados TM (endmember conhecido) para estimar as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra para os dados MSS (menor resolução espacial), através de um método de regressão. Neste estudo, os autores chegaram ao resultado que há uma boa possibilidade de encontrar um pixel puro em dados de sensores de baixa resolução espacial, através de sensores de alta resolução espacial e com diferentes resoluções espectrais. As proporções dos componentes nas imagens geradas são representadas pela variação de um nível de cinza escuro (pequena quantidade do componente) a um nível de cinza brilhante (grandes proporções do componente).

A aplicação do modelo linear de mistura espectral para dados de baixa resolução espacial tem sido utilizada com êxito. Rodriguez-Yi (1998) utilizou imagens AVHRR para a classificação da cobertura vegetal no Estado do Mato Grosso. Os resultados obtidos demonstraram que a utilização do modelo de mistura apresenta-se vantajoso, por se trabalhar no nível de subpixel em imagens de baixa resolução espacial. A

classificação das imagens-fração foi superior que a classificação das bandas do sensor AVHRR.

Carreiras et al. (2002) aplicou o modelo de mistura espectral em imagens do sensor SPOT-VEGETATION (1 km de resolução espacial no nadir), com o objetivo de avaliar mudanças na cobertura vegetal, em escalas regional e global. Os resultados obtidos mostraram um aumento das áreas desmatadas de 1993, detectadas pelo sensor AVHRR/NOAA (Shimabukuro e Rudorff, 2000), para o ano de 2000, data das imagens SPOT-VEGETATION.

Os resultados apresentados nos trabalhos acima citados encorajaram a utilização da técnica do modelo de mistura espectral, para a classificação da cobertura vegetal e a detecção de mudanças na cobertura da terra, em imagens do sensor MODIS de resolução espacial moderada. Para o produto MOD13, assim como para o produto MOD09 utilizou-se quatro bandas: azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio (no produto MOD09 utilizou-se a banda 7, devido a similaridade com a faixa espectral do sensor ETM+).

2.4 Alterações na Cobertura da Terra Devido a Ações Antrópicas

Os sistemas terrestres respondem as alterações antrópicas, causando mudanças em seus ciclos, que de volta influenciam as atividades humanas. Neste último século, os principais agentes de tais mudanças são os gases de efeito estufa, com destaque para o gás carbônico (Cox et al., 2000; Fearnside, 1996). As estimativas globais de emissões de carbono devido a alterações na cobertura da terra indicam um range de +0,6 a +2,5 GtCyr⁻¹ para a década de 80 (Schimel et al., 2001) e o equivalente a +0,8 a +2,4 GtCyr⁻¹ para a década de 90 (Houghton, 2000; Schimel et al., 2001).

Muitos cientistas vêm estudando as práticas de uso da terra (desmatamento, intensificação das áreas de pastagens e agricultura) como fatores que podem afetar o clima regional, ecossistemas, e o clima global, devido a mudanças na composição química da atmosfera (Stohlgren et al., 1998; Bounoua et al., 2003).

Nas últimas décadas, os processos de mudança na cobertura vegetal do planeta vêm ocorrendo de forma mais intensa, principalmente nos trópicos. O carbono estocado na vegetação, principalmente nas florestas tropicais afetam as emissões dos gases de efeito estufa, a partir do momento em que há uma alteração na cobertura da terra (Fearnside, 1996), como o desmatamento e queimadas.

A floresta tropical úmida ocorre em uma faixa entre 30 graus de latitude Norte-Sul em todos os continentes. Quando a quantidade de chuva é mais ou menos 1500 mm por ano, com uma estação seca menor que seis meses, a vegetação normal é a floresta tropical úmida (Rizzini, 1997).

O desflorestamento da floresta tropical é uma ameaça potencial à sustentabilidade ecológica e ao desenvolvimento socioeconômico a longo prazo (Myers, 1980). Com a tendência atual deste processo na floresta tropical, uma pergunta emerge: quanto dano este ecossistema frágil pode resistir e ainda recuperar-se? As razões para a preocupação com o desflorestamento estão agrupadas em duas grandes categorias: primeiro, a floresta tropical exibe a maior diversidade de espécies da maior comunidade biológica, então sua destruição implicaria numa extinção em massa e um atentado aos recursos genéticos do planeta e a sua própria sustentabilidade, e, segundo, pela provável mudança climática, como o efeito estufa que o desflorestamento poderia estar contribuindo (Rudel, 1989).

A destruição da floresta tropical resulta de uma complexa combinação de causas sociais, econômicas e biológicas que afetam à flora, fauna e os estilos de vida das populações indígenas (Nations, 1988). Para a ocorrência do desflorestamento existe um número significativo de variáveis que influenciam o modelo de uso da terra, principalmente as características da área, como qualidade do solo, tipo de vegetação e os fatores que afetam os custos de transporte, como rodovias pavimentadas, dimensão dos rios e distância dos mercados consumidores. A principal exploração da floresta tropical é mais recente, incentivada por vários episódios econômicos e de sobrevivência nos inícios do século XIX e acelerado nas últimas décadas (Houghton, 1994).

A floresta tropical está sendo ameaçada por inúmeros fatores que estão levando a sua rápida degradação. Há um acordo geral entre os pesquisadores que, 15 milhões de quilômetros quadrados da floresta tropical no mundo que pode ter existido, segundo dados bioclimáticos, ao menos 9 milhões já foram perdidos (Myers, 1988). As causas do desflorestamento e das mudanças da cobertura da terra são os objetivos de muitas investigações, variando de ciências florestais e ecológicas a estudos econômicos, sociais, e antropológicos. Estas mudanças afetam a hidrografia, clima global e os ciclos biogeoquímicos, e elas têm significantes efeitos sobre a biodiversidade e a qualidade de vida humana (Mendoza e Anderson, 2002).

Outro agente que causa grandes mudanças na cobertura vegetal é o fogo. Muitas queimadas ocorrem naturalmente, enquanto que outras são resultados das atividades humanas. Segundo Galindo et al. (2003), para o México é estimado que cerca de 80% das queimadas que ocorreram em 1998 foram devido a intervenções humanas, tanto acidentais quanto por ações deliberadas, e cerca de 20% dos fogos foram associados ao aquecimento anormal e seca devido às condições atmosféricas devido ao El Niño e La Niña.

2.4.1 Região Amazônica

Segundo Rudel (1989), países que possuem uma pequena área de floresta, como Haiti ou Ruanda, o crescimento populacional foi o maior responsável pelo desflorestamento, enquanto que em países com grandes extensões de florestas, como o Brasil, os maiores agentes do desflorestamento são os investimentos econômicos nas fronteiras destas florestas. Atualmente a maior extensão destas florestas ocorre na bacia do rio Amazonas, entretanto a destruição da floresta primária nesta região foi de aproximadamente 12% entre 1970 e 1997.

Moran et al. (1994) apontam que a maior forçante para o desmatamento na região Amazônica é a expansão agrícola. Os padrões do desmatamento que ocorrem nesta região consistem na somatória de diversos tipos de transição da cobertura da terra: conversão de florestas primárias, áreas agrícolas abandonadas (que iniciam um processo de sucessão secundária) e reabertura de áreas em processo de sucessão vegetacional em

dinâmicas e padrões espaciais e temporais que afetam processos biogeoquímicos e outros processos físicos (Skole et al., 1994).

A região Amazônica apresenta diferentes padrões regionais de desflorestamentos, devido a uma série de fatores combinados, mudando em diferentes escalas de tempo. Por exemplo, a longa duração da transição de diferenças demográficas e fatores tecnológicos, assim como medidas políticas, como a implementação de uma nova lei sobre a exploração e uso da terra são importantes para explicar os processos de desflorestamento (Lambin et al., 2003).

O novo modelo de desenvolvimento da Amazônia (plano Brasil em Ação, implementado em 1995) revela uma manutenção das políticas para o desenvolvimento desta região que vinham sendo empregadas desde a década de 60: os maiores beneficiários não são as populações locais, mas os setores industriais e agrícolas, principalmente no Mato Grosso e Rondônia (Carvalho et al., 2002). Segundo estes autores, o desenvolvimento da Amazônia ainda está baseado nas políticas de construção de rodovias e extração dos recursos naturais, como a indústria madeireira e de mineração. Estas medidas estimulam a expansão da fronteira agrícola, e logo o desflorestamento acelerado. Este fato pode ser verificado através das taxas de desmatamento para o Estado do Mato Grosso no período de 2002-2003: 2,6 milhões de hectares, a taxa mais alta dos últimos dez anos.

Dentre os grãos cultivados na região Amazônica, a soja vem apresentando um aumento significativo na produção e área plantada nos últimos 10 anos. A falta de diretrizes políticas e ações governamentais no sentido de se realizar práticas sustentáveis podem comprometer o meio ambiente. Segundo Fearnside (2001), a soja representa a maior ameaça a biodiversidade do Brasil. Entre os custos ambientais da implementação desta cultura na Amazônia, pode-se citar a perda da biodiversidade, os impactos severos devido aos sistemas de transporte, erosão do solo, os efeitos dos produtos químicos utilizados nesta cultura, como herbicidas e adubos, que se dispersam no ambiente, expulsão das populações tradicionais para regiões mais afastadas, ocasionando a abertura de novos desmatamentos, e etc.

2.5 Mudanças da Cobertura da Terra

Os processos de mudança do uso e na cobertura da terra entraram nas discussões globais de meio ambiente há algumas décadas, a partir do conceito de que processos que ocorrem na superfície do planeta influenciariam o clima. A partir de estudos que demonstraram a relação entre a modificação do albedo terrestre devido a mudanças na superfície influenciavam a troca de energia entre a superfície-atmosfera em escala local, estudos apontando os ecossistemas terrestres como fonte e armazenador de carbono podendo influenciar o clima global e estudos relacionados à contribuição da evapotranspiração no ciclo da água como outro grande fator de impacto tanto em escalas local quanto regional, vieram a tona, e ainda hoje são alvos de muitos trabalhos (Lambin et al., 2003).

A partir de dados de Sensoriamento Remoto é possível monitorar tais mudanças, no entanto, extrair informações deste tipo de dados requer o desenvolvimento de técnicas e metodologias eficazes e automatizadas.

Existe uma discussão emergente a respeito de qual deve ser a escala mais apropriada para analisar a conversão da cobertura da terra. Malingreau e Tucker (1988) mostraram eficácia de 4-8 Km de dados GAC (Global Área Coverage) para delimitar os grandes tipos de fisionomias globais. A utilização de dados 8-15 Km para a classificação da cobertura da terra e sua fenologia, foram também demonstrados como persistentes por outros autores (Tucker et al., 1985), mas é demasiadamente grosseira para monitorar mudanças na cobertura da terra e para detectar conversões de 1 Km de área ou mais finas. Estas observações são suportadas por análises detalhadas do desmatamento tropical, que sugerem que 1 Km pode ser grosseira demais para detectar e quantificar desmatamentos em algumas regiões (Strahler et al., 1999; Achard et al. 2002).

Diversas aproximações da correção de proporções do tipo de cobertura foram exploradas na literatura. Estas variam desde métodos simples de regressão em que as resoluções mais finas são associadas as variáveis espectrais de dados com resolução mais grosseira, até métodos que utilizam modelos de previsão de árvores de regressão para prever as variáveis espectrais de um modelo de escala mais fino. Mayaux e

Lambin (1995) examinaram a determinação da área de florestas através dos dados LAC (Local Area Coverage) do AVHRR, fornecendo um procedimento de dois passos para estimar, através do índice de Matheron, o limite para a área de uma classe dentro de uma unidade, e estimar uma regressão para interceptar as resoluções mais finas e mais grosseiras. Estenderam recentemente seu trabalho à calibração inversa de proporções da cobertura usando diversas medidas de texturas espaciais, incluindo uma simulação do MODIS em 1 Km com uma medida da textura do desvio padrão derivada de uma faixa de 250-m (Mayoux e Lambin, 1995). Neste estudo chegaram a conclusão que a resolução de 250 m é a mais eficaz, com um erro de menos de 9% na classificação (Strahler et al., 1999).

Entretanto, estes dados relativamente grosseiros são freqüentemente inadequados para detectar as mudanças causadas por fatores antropogênicos. As análises de muitos tipos de mudanças nas coberturas vegetais indicam que estas são relativamente pequenas no tamanho devido à natureza inerente das conversões antropogênicas locais. Conseqüentemente uma proporção muito grande das mudanças é somente detectável em definições espaciais finas.

Muitas das mudanças no uso e cobertura da terra que ocorrem devido a ações antrópicas possuem uma escala espacial próxima de 250 m (Townshend e Justice, 1988), e as bandas mais apropriadas para a detecção destas mudanças estão localizadas na região do visível e infravermelho próximo.

Dados de 250 m de resolução têm sido utilizados para a detecção de conversão da cobertura vegetal causado tanto por ações antrópicas, como desmatamento de florestas, quanto por processos naturais, como queimadas e inundações e estudos recentes têm utilizado os algoritmos de detecção de mudanças, como VCC (Conversão da Cobertura Vegetal) para produzir produtos de mudanças na superfície (Zhan et al., 2002).

A detecção de mudanças é um processo para identificar diferenças no estado de um objeto ou fenômeno através de sua observação em tempos diferentes, levando-se em consideração alguns aspectos, como identificar a natureza da mudança, medir a extensão da mudança e avaliar o padrão espacial da mudança.

Carreiras et al. (2002), estudaram a utilização de imagens fração, derivadas do SPOT-4 VEGETATION para avaliar mudanças na cobertura da terra para o Estado do Mato Grosso. Foram utilizadas composições das imagens fração derivadas dos dados do sensor VEGETATION, atmosféricamente corrigidas, e a utilização do NDVI mensal para o ano de 2000, seguindo a metodologia de critério de máximo valor, geralmente utilizada para os dados AVHRR. Os dados foram comparados com as imagens AVHRR, para o ano de 1993. As composições coloridas derivadas do modelo linear de mistura espectral, de 1993 (AVHRR) e 2000 (VEGETATION), mostram um aumento do desflorestamento no norte do Estado, comprovando a utilização deste sensor de baixa resolução espacial em fornecer dados para o monitoramento de mudanças na cobertura da terra.

Zhan et al. (2002), testaram a aplicação do algoritmo VCC em uma metodologia modificada a dados MODIS com resolução de 250 metros. Este produto, que ainda não está operacionalmente implementado, identificará locais onde mudanças na cobertura da terra atribuídas a atividades humanas e eventos naturais extremos ocorreram. Regiões onde ocorreram queimadas, inundações e desmatamento foram analisados. Foram testados diferentes métodos de detecção de mudanças, e a estratégia de integrar múltiplos métodos para o produto VCC mostrou-se efetivo. Isto indica que os métodos selecionados são complementares uns aos outros. Os resultados indicaram que as aplicações de resultados integrados de metodologias de detecção de mudanças podem oferecer uma melhor acurácia que aqueles derivados apenas por um algoritmo.

2.5.1 Fenologia das Formações Vegetais

A distribuição da vegetação e sua fenologia estão largamente associadas com os fatores climáticos, as características fisiográficas do terreno e as atividades humanas. Assim como muitos dos fenômenos ecológicos, estas se apresentam fortemente relacionadas a expressão dos genes e ao ambiente, e vem sendo estudada tanto em nível de organismos individuais, quanto em modelos de escalas regionais e globais (Chuine et al., 2000). O conhecimento da distribuição dos tipos de cobertura vegetal e suas variações fenológicas são hoje um aspecto indispensável para o planejamento de uma política

coerente e eficiente de desenvolvimento sustentável, assim como para a compreensão e avaliação objetiva da convivência de diferentes ecossistemas, sejam naturais, semi-naturais, agrícolas ou industriais. A análise das variações fenológicas em nível regional e sua interligação com os diferentes componentes do meio geográfico (clima, solo, relevo, geologia, etc.) formam parte das informações necessárias para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas em escala global (Shimabukuro et al., 1999).

Um melhor entendimento destas respostas é crucial para prever o funcionamento em longo prazo da dinâmica e da estabilidade de um ecossistema. Mudanças interanuais na temperatura e precipitação podem influenciar profundamente o status da fenologia, como o período de crescimento, a taxa de acumulação de biomassa e o período e taxa de senescência (Lee et al., 2002). A resposta dos ecossistemas a esta variabilidade é bastante grande, especialmente em áreas semi-áridas, onde a água é um fator limitante.

Em uma comunidade vegetal, tanto a fenologia, quanto à produtividade primária bruta são funções da disponibilidade espacial e temporal da água e da radiação, sendo que o monitoramento da produtividade primária em uma escala regional deve ter uma precisão bastante acurada das diferentes formações vegetais que compõe o ambiente. Garcia e Ustin (2001) discutem a existência de uma forte relação entre o padrão de precipitação e a produtividade primária de ecossistemas savânicos que, além disso, é dependente também da ecofisiologia das espécies e do micro-habitat.

Variações sazonais na precipitação, temperatura, energia incidente, comprimento do dia, cobertura de nuvem, e elevação do Sol têm mostrado influências nos padrões fenológicos dos diversos tipos de formações vegetais. Segundo Meinzer (1999) muitas florestas tropicais que passaram por um período prolongado da estação seca com pouca ou nenhuma chuva, apresentaram uma grande perda da primeira camada de solo. Foi sugerido que a competição por recursos limitados, como a água, pode ser minimizado, se houver um aumento na diversidade através do particionamento espacial e temporal dos recursos. Na sazonalidade de florestas tropicais, o principal mecanismo para retenção de água parece consistir de diferenças nos padrões de raízes, suas atividades e a fenologia das plantas.

Nos últimos anos, estudos relacionados à fenologia tiveram um aumento na importância devido ao contexto de mudanças climáticas. Estas mudanças podem alterar o início das fases fenológicas, como o período de crescimento da vegetação, e a distribuição de plantas e animais. Por outro lado, mudanças fenológicas da vegetação, como as mudanças na amplitude da distribuição de espécies, podem ser utilizadas como parâmetros para se entender as mudanças climáticas (Menzel et al., 2001).

Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer a relação entre os padrões de precipitação e as diferentes formações vegetais, através da utilização de imagens de satélite, pois oferecem uma possibilidade para monitorar continuamente os processos dinâmicos da vegetação, suas mudanças e os impactos que isso pode implicar ao meio ambiente.

Os monitoramentos da vegetação em níveis globais, continentais e regionais, nas últimas décadas têm sido realizados com a utilização de dados fornecidos pelo sensor “Advanced Very High Resolution Radiometer” - AVHRR (Rodriguez Yi, 1998) com resolução espacial de 1 km no nadir, a bordo dos satélites da série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Outro importante sensor para este tipo de pesquisa é o SPOT-VEGETATION, que vêm obtendo bons resultados (Carreiras et al., 2002).

Geralmente estes estudos utilizam-se de índices de vegetação, como o NDVI e o EVI. Alguns estudos têm utilizado o NDVI com o objetivo de avaliar a fenologia regional (Lu et al., 2003, Seen et al., 1995) e para desenvolver modelos fenológicos em escalas globais. Análises no padrão do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para florestas temperadas (Spanner et al., 1990, Duchemin et al., 1999) e florestas boreais (Royer et al., 1996) têm mostrado grande consistência com a resposta da vegetação a sazonalidade.

2.5.2 O Desmatamento

O Brasil é considerado um país único na avaliação da cobertura florestal da parte da Amazônia compreendida em seu território. Esta singularidade está associada à

frequência e extensão geográfica abrangida dos desmatamentos observados. Na maior parte dos países tropicais, o monitoramento de suas florestas é feito a cada cinco ou 10 anos, e de forma não necessariamente abrangente. O Brasil gera estimativas anuais da taxa média e da extensão do desflorestamento bruto da Amazônia a partir da análise de imagens de satélite que cobrem toda a região (Krug, 2001).

Adams et al. (1995) estudaram a utilização de imagens Landsat para a avaliação de desmatamentos na região amazônica. Através da história espectral de cada pixel e considerando-se o contexto espacial da área estudada, obtiveram resultados que mostraram a possibilidade de detectar mudanças na cobertura vegetal que se estendam além do que seria viável detectar através de medidas de campo.

Além da utilização de imagens Landsat, alguns estudos analisam a viabilidade de integração dos sensores TM/ETM+ com outros sistemas sensores, objetivando uma maior disponibilização de imagens da região amazônica, para o monitoramento dos processos de desmatamento. Por exemplo, Almeida-Filho e Shimabukuro (2002) integraram o uso de imagens Landsat-5 TM e JERS-1 SAR para mapear e monitorar áreas de alterações antrópicas em uma região no estado de Roraima. A partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral às imagens TM, os resultados mostraram no período estudado um crescimento de 341 hectares para 1.986 hectares, devido a atividades agropastoris em áreas de florestas, e um crescimento de 94 hectares para 537 hectares devido às atividades de garimpo. As imagens JERS-1 SAR foram utilizadas nos anos em que havia cobertura de nuvens, e foi possível detectar os desmatamentos, mas não as áreas abertas devido ao garimpo. Alves (2001) utilizou mapas derivados de cenas TM e MSS para estudar padrões de desmatamento nos anos 70 e década de 90 na Amazônia Legal. Cerca de 90% dos desmatamentos ocorreram em até 100km de distância das estradas principais, sendo que áreas maiores que 50 e 200 hectares representaram respectivamente 74 e 50% do total do desmatamento ocorrido no período. Dobson et al. (2001) utilizaram cenas Landsat e SAR para a identificação de áreas de exploração madeireira e rebrota, e Kux et al. (1998) estudaram a potencialidade de usar o Radarsat para a detecção de mudanças no Estado do Acre.

Outros estudos analisaram a utilização de sensores de resolução espacial menor e maior resolução temporal com o objetivo de detectar desmatamentos na Amazônia. Por exemplo, Batista (1994) utilizou AVHRR para estimar o desmatamento no Estado do Mato Grosso, e Amaral (1992), analisou a possibilidade de utilizar os dados AVHRR para detectar desmatamentos, avaliando os resultados com base nos dados provenientes do sensor TM. Carreiras et al. (2002) testou a utilização de imagens SPOT-VEGETATION para detectar no Estado do Mato Grosso, a partir de análises de mistura espectral, obtendo resultados que indicam a potencialidade destes dados.

Todos os trabalhos citados acima objetivaram o monitoramento dos desmatamentos na região amazônica, com base em diferentes metodologias e sensores. O grande desafio destes trabalhos visa à detecção de mudanças na cobertura vegetal em uma região em que há uma grande taxa de cobertura de nuvens, o que dificulta seu monitoramento. Os sensores TM/ETM+ possuem uma resolução espacial bastante adequada para a detecção e estimativa de áreas desmatadas, no entanto, com um período de revisita da mesma área de 16 dias, dificulta a aquisição de imagens livres de nuvens para um monitoramento constante. Já os sensores AVHRR e SPOT-VEGETATION com um imageamento quase diário, aumentam o número de imagens disponíveis para esse tipo de estudo. No entanto, com uma resolução espacial de 1km, torna-se difícil à detecção de novas áreas em processo de desmatamento.

Zhan et al. (2002) desenvolveram o algoritmo VCC para detectar desmatamentos a partir de dados do sensor MODIS, que possui uma resolução espacial de 250 m e imageamento quase diário, o que abre uma nova perspectiva no monitoramento do desmatamento na região amazônica. Os resultados encontrados por eles mostraram a potencialidade deste novo sensor para a detecção em tempo quase real de processos de desmatamento, devido suas características espacial, espectral e principalmente temporal.

Nesta dissertação, estuda-se a potencialidade da utilização do sensor MODIS, com base na aplicação do modelo linear de mistura espectral, para monitorar desmatamentos em uma série temporal de imagens, e avalia-se o resultado segundo os dados ETM+, utilizados como verdade terrestre.

2.5.2.1 Monitoramento do Desmatamento na Amazônia

Nos últimos 50 anos, a ocupação da Amazônia Legal ocorreu no contexto de um projeto de integração nacional, que incluiu o estabelecimento dos chamados “eixos” e “pólos” de desenvolvimento, apropriação de terras para projetos agropecuários, reforma agrária, mineração e, nas últimas duas décadas, produção e exportação de grãos. Segundo Becker (2001), no final da década de 60, o Estado tomou a si a iniciativa de um novo ciclo amazônico, num projeto geopolítico para a modernidade acelerada da sociedade e do território nacionais. Nesse projeto, a ocupação da Amazônia assumiu prioridade por várias razões. Foi percebida como solução para as tensões sociais internas decorrentes da expulsão de pequenos produtores do Nordeste e do Sudeste pela modernização da agricultura. Além disso, foi percebida como prioritária devido à possibilidade de se desenvolverem focos revolucionários nesta região. Ao nível continental, haviam duas preocupações: a migração nos países vizinhos para suas respectivas Amazônia, e, a construção da “Carretera Bolivariana Marginal de la Selva” significando a possibilidade de vir a capturar a Amazônia continental para a órbita do Caribe e do Pacífico, reduzindo a influência do Brasil no coração do continente.

A partir da década de 70, o processo de ocupação acelerou-se devido aos incentivos fiscais para a implementação de projetos agropecuários, e milhões de hectares de florestas foram derrubados. O processo de migração foi tão volumoso e acelerado que levou o INCRA a perder completamente o controle, gerando como consequência, o surgimento de conflitos fundiários nas áreas cortadas pelas estradas implementadas (SUDAM/IPEA, 2001).

Ainda na década de 70, a Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia (SUDAM) solicitou ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) um estudo da utilização de imagens de satélite para a avaliação e acompanhamento destes projetos agropecuários que estavam sendo implementados pelo governo na Amazônia. Em seguida, foi firmado um convênio entre o INPE e o antigo IBDF, em que o principal objetivo foi identificar e avaliar as áreas alteradas, conhecido como Subprojeto do desmatamento, em que a área estudada foi o atual Estado de Rondônia. A viabilidade

dessa técnica foi inicialmente comprovada pelos estudos realizados por Tardin e Cunha (1989), que utilizaram imagens do instrumento Landsat/MSS para mapear as áreas desflorestadas em dois períodos da década de 70. Devido aos resultados encorajadores encontrados, foi dada a continuação do projeto, em 1979, para toda a Amazônia Legal (INPE, 1989).

No final da década de 80, mais especificamente em 1988, o projeto de levantamento dos desmatamentos passou a ser conhecido como PRODES (Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia). O objetivo deste projeto é estimar as taxas de desflorestamento bruto e a extensão do desflorestamento bruto, anualmente. Um exemplo dos resultados obtidos por este projeto pode ser observado na Figura 2.8.

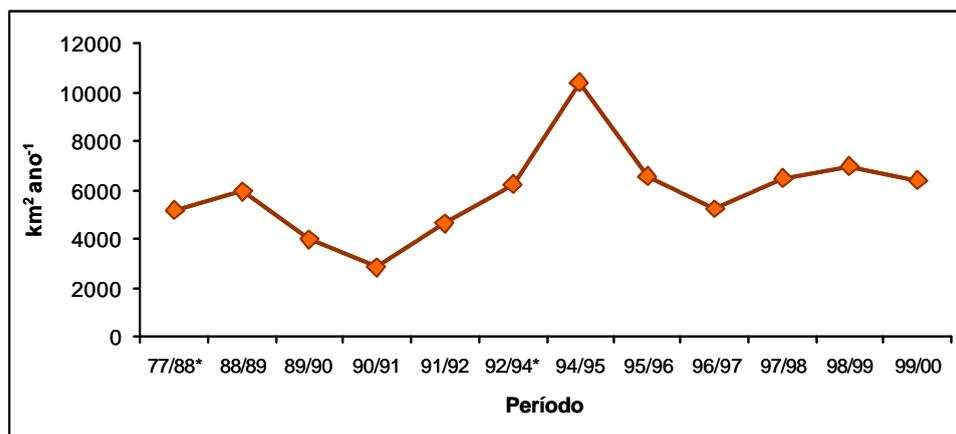


FIGURA 2.8 – Taxa média do desflorestamento para a unidade federativa do Mato Grosso, estimada pelo INPE. (*) esta relacionada à média bianual.
FONTE: Adaptada de INPE (2002).

Tardin e Cunha (1989) recomendaram a implementação de um sistema de vigilância permanente, a partir de imagens orbitais, principalmente em áreas críticas com altas taxas de desmatamento. Esses autores apontaram também para a importância de se desenvolver um sistema utilizando-se dados orbitais na forma digital, tratados em um SIG, permitindo assim a integração com outros tipos de dados. Desta forma, estes mapeamentos constituíram uma base de dados sobre a evolução anual dos desflorestamentos para a Amazônia Legal, podendo ser utilizada para estudos de

análises dos complexos padrões de ocupação da terra na Amazônia e o desflorestamento.

Inicialmente, a metodologia utilizada pelo PRODES era baseada em mapeamentos a partir de imagens de satélite em papel, na forma de composições coloridas dos canais 5 (infravermelho médio), 4 (infravermelho próximo) e 3 (vermelho) do Landsat/TM na escala 1:250.000, comparadas em anos consecutivos para a detecção e o mapeamento de novas áreas desflorestadas. A partir de 1997, as estimativas do projeto PRODES começam a ser realizadas com base em um novo procedimento metodológico denominado PRODES Digital. Esta nova abordagem está fundamentada em técnicas que utilizam o modelo linear de mistura espectral, segmentação das imagens por crescimento de regiões, classificação não-supervisionada em imagens Landsat/TM e ETM+. Após esta etapa são realizadas uma auditoria e edição das classificações com o objetivo de garantir a qualidade das interpretações. Este novo procedimento automatiza o monitoramento e estimativa anual visando à combinação de diversos tipos de dados, permitindo análises das tendências do desflorestamento e definição das áreas críticas aonde esta atividade vem ocorrendo mais intensamente.

Em 1999, com o lançamento do satélite TERRA, e a disponibilização das imagens fornecidas pelo sensor MODIS a partir de 2001, abriu-se uma nova perspectiva no que diz respeito à avaliação das mudanças na cobertura e no uso da terra. Estes dados, de alta qualidade, disponibilidade gratuita, resolução espacial moderada, mas com alta resolução temporal proporcionam a oportunidade de avaliar os processos de mudanças na cobertura do solo.

Neste contexto surge a possibilidade de estruturar uma metodologia que visa auxiliar os órgãos responsáveis sobre as novas áreas em processo de desflorestamento na região amazônica, possibilitando assim um maior controle sobre a abertura de novas áreas, tanto em regiões de florestas, quanto de outras fisionomias vegetais.

2.5.3 As Queimadas

A queima de biomassa representa diretamente uma grande perturbação da química atmosférica global, através da liberação de gases de efeito estufa e aerossóis (Sá et al., 2003; Sousa et al., 2003; Page et al., 2002), e afeta diretamente o ciclo do carbono por representar um papel central nos processos de conversão da cobertura vegetal dos sistemas terrestres, tanto a partir de causas antrópicas, quanto de processos naturais, pois diversos ecossistemas convivem com a dinâmica do fogo. Das emissões de dióxido de carbono, metano e monóxido de carbono antropogênicos, 40%, 16% e 43% do total são devidos à queima de biomassa (Houghton et al., 1995, citado por Gregoire et al., 2003), enquanto que de 79 a 90% das emissões totais de carbono são devido a outras fontes. Esta liberação de carbono para a atmosfera causa impacto direto nas trocas radiativas na superfície, influenciando nas mudanças do clima global. Aproximadamente 90% das emissões desses gases liberados em eventos de queimadas são composta por CO₂, enquanto que cerca de 10% é de CO, e os outros gases constituem somente 1 a 2% (Levine et al., 1991). Segundo Lashof (1996), o CO₂ é o gás de efeito estufa de maior impacto na elevação da temperatura global, enquanto o CH₄ aparece em segundo lugar.

As incertezas das estimativas das mudanças dos ecossistemas e do clima aumentam ainda mais quando as áreas queimadas são convertidas para uma quantificação de biomassa queimada. Barbosa et al. (1999) relatam as estimativas de biomassa queimada em áreas tropicais (Tabela 2.5) que variam de 3260 a 10450 Tg/ano.

TABELA 2.5 – Estimativas de Biomassa Queimada (Tg/Ano) para os Trópicos.

	Seiler e Crutzen (1980)	Hao et al. (1990)	Crutzen e Andreae (1990)	Andreae (1991)	Hao e Liu (1994)
Desmatamento	550-880	280-560	440-1560	420	510
Pecuária	900-2500	750-940	1110-220	840	1310
Incêndios em savanas	480-1900	3690	670-3560	3690	2670
Madeira combustível	620	680	670-1330	1260	620

Continua

TABELA 2.5 - Conclusão

Resíduos de agricultura	de 710	660	1110-1780	1360	280
Total	3260-6610	6060-6530	4000-10450	7570	5390

FONTE: Adaptada de Barbosa et al. (1999), citada por Grégoire et al. (2003).

Para quantificar a magnitude da queima de biomassa em escala global, é necessária a disponibilidade de dados oriundos de sensores remotos, que permitem também o monitoramento temporal e a espacialização destes eventos (Grégoire et al., 2003).

Pereira et al. (1997) fizeram uma revisão sobre a utilização do sensoriamento remoto para o monitoramento de queimadas. Segundo estes autores, a identificação adequada do espaço espectral (uni ou multidimensional) para detectar e mapear áreas queimadas depende de uma clara caracterização das propriedades espectrais, não só das superfícies queimadas, mas também das características e estrutura do tipo de vegetação encontrada no local do evento.

A quantificação de áreas queimadas em escala continental pode ser realizada baseada em numerosas fontes de informações, derivadas de um grande número de metodologias, como: análise visual, fatiamento de um único canal (geralmente para sensores de microondas), índices de vegetação, análises de principais componentes, mistura espectral e etc.

Lombardi (2003) utilizou análise visual e mudanças espectro-texturais para estudar os fenômenos de recorrência de queimadas e permanência das cicatrizes do fogo em diversos tipos de formações de cerrado a partir de imagens do satélite TM/Landsat. A metodologia utilizada mostrou-se bastante satisfatória. A utilização de um sensor com maior resolução temporal poderia permitir um melhor monitoramento dos fenômenos estudados, no entanto, seria necessário adotar sensores com média ou baixa resolução espacial, o que implicaria na perda de precisão nas análises.

O sensor AVHRR é um dos sensores de baixa resolução espacial mais utilizados para a detecção de queimadas. Pereira e Setzer (1996) levantam a problemática da superestimativa de área queimada devido ao baixo limiar de saturação da banda 3 do

sensor AVHRR, o qual é sensível à radiação solar refletida por solos expostos para ângulos específicos de reflexão, podendo apresentar a mesma assinatura que os fogos ativos.

Domenikiotis et al. (2002) compararam a utilização de NDVI gerado a partir de imagens NOAA/AVHRR com o mesmo índice, gerado para dados Landsat/TM e dados de campo para mapear áreas de florestas queimadas. Com base na metodologia utilizada, o NDVI gerado para os dados AVHRR mostrou-se bastante sensível a mudanças abruptas entre antes e depois da ocorrência do fogo, havendo uma boa concordância entre os mapas gerados para os dados TM (97,2%) e AVHRR (85,9%).

O sensor MODIS foi desenvolvido para incluir características necessárias e específicas para a detecção de queimada, sendo que é uma experiência melhorada em relação aos sistemas NOAA/AVHRR e do GOES. A seguir encontram-se alguns exemplos de trabalhos que vem utilizando dados do sensor MODIS para detecção e mapeamento de áreas queimadas.

Roy et al. (2002) desenvolveram um modelo aplicável a dados de satélite com alta frequência temporal, capaz de mapear a localização e o dia aproximado em que ocorreu uma mudança da cobertura da terra. Este modelo, baseado em dados multitemporais de reflectância de superfície (500 m de resolução espacial), e fornece expectativas e incertezas de observações subseqüentes ao longo do tempo. Aplicaram este modelo aos dados fornecidos pelo sensor MODIS com o objetivo de mapear áreas queimadas utilizando dados de média resolução espacial. Os resultados obtidos mostraram grande correspondência com o produto MODIS de detecção de focos de calor (Justice et al., 2002c), que utiliza dados oriundos dos canais termais deste sensor, e mostraram coerentemente o progresso das queimadas espacial e temporalmente.

O algoritmo desenvolvido por Justice et al. (2002) baseia-se em múltiplos canais para detectar anomalias termais do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, que incluem uma base pixel a pixel aliado a pontos com altas temperaturas. Segundo o autor, para a maioria dos regimes de incêndios, a hora e a extensão espacial da queimada não pode ser estimada como uma área onde esta ocorrendo um foco de

incêndio, devido ao satélite não ter passagens repetidas sobre a região no momento em que o fogo esta ocorrendo e à presença de nuvens. Os resultados preliminares encontrados encorajaram a implementação de um sistema operacional de disponibilização dos dados, com resolução espacial de 1 km, para a comunidade que utiliza estas informações para o monitoramento de queimadas.

Zhan et al. (2002) desenvolveram o algoritmo VCC para detectar mudanças na cobertura da terra, com resolução espacial de 250 m. Para a detecção de áreas queimadas, a metodologia utilizada, que integra o particionamento das bandas da região do vermelho e infravermelho próximo, mudança de vetor destas mesmas bandas, modificação dos limiares do espaço delta, análise de textura e feição linear, mostrou-se bastante eficiente. Na área de estudo, dos 1.139.579 acres queimados, segundo os dados da United States Department of Agriculture Forest Service (USFU) utilizados como verdade terrestre, foram estimados 1.208.101 acres a partir da utilização do VCC, ou seja, uma diferença de 6%.

Estes estudos mostraram a grande potencialidade da utilização dos dados do sensor MODIS para o monitoramento e mapeamento de áreas queimadas, tanto devido ao grande número de bandas voltadas para estudos da superfície, quanto as sua resolução espacial e qualidade de geolocalização.

CAPÍTULO 3

ÁREA DE ESTUDO

3.1 Descrição da Área de Estudo

A área de estudo proposta para a realização deste trabalho é o Estado do Mato Grosso, localizado na região Centro-oeste do Brasil, entre as coordenadas $06^{\circ} 00'$ e $19^{\circ} 45'$ de latitude sul e $50^{\circ} 06'$ e $62^{\circ} 45'$ de longitude oeste, com uma extensão territorial de cerca de 900.000 km^2 (Figura 3.1). Esta região apresenta uma grande diversidade de tipos de formações vegetais, e além disso, nesta área vem ocorrendo uma alta taxa na conversão da cobertura vegetal, devido à utilização da agricultura mecanizada e pecuária nas áreas de cerrado, bem como o desmatamento e queimadas nas áreas de floresta. Neste contexto, o Mato Grosso mostra-se extremamente interessante para os fins deste estudo.

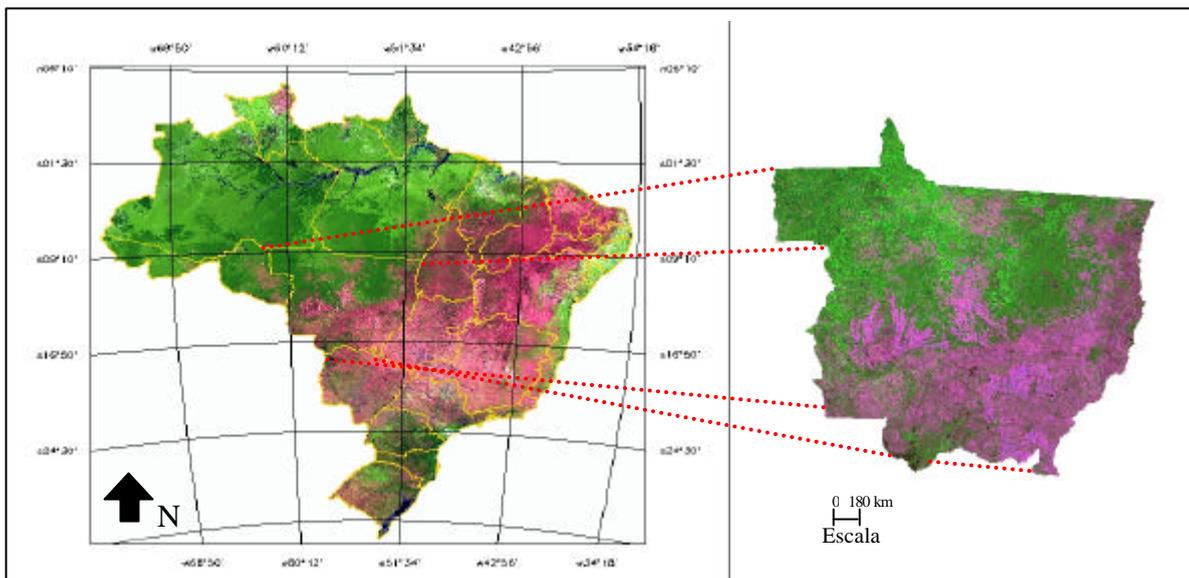


FIGURA 3.1- Localização geográfica da área de estudo.

3.2 Aspectos Fisiográficos

A distribuição e estrutura básicas dos ecossistemas têm uma história onde as variáveis abióticas (clima, pedologia, relevo, disponibilidade de nutrientes, etc.) estão associadas a variáveis bióticas (variabilidade ecológica, competição, predação, simbiose, endemismos, etc.) para produzir um padrão natural de biodiversidade, resultado de um longo processo de coevolução da parte viva e não viva do planeta, onde o clima é a principal variável na distribuição da vegetação.

Decorrentes de uma série de fatores geográficos (posição continental, extensão latitudinal e relevo) e dinâmicos (sistemas de circulação atmosférica), o comportamento da temperatura na região Centro-oeste é muito variado. A continentalidade, impedindo a interferência das influências marítimas, permite que a variação da latitude seja responsável pela temperatura cerca de 26°C no extremo norte e de 22°C no extremo sul da região. O relevo, através da altitude, faz com que as mais altas chapadas sedimentares e superfícies cristalinas do centro-sul da região possuam temperatura média anual entre 22°C e 20°C. Portanto, apesar de suas latitudes predominantemente tropicais, esta região apresenta uma importante variação de temperatura ao longo do espaço geográfico. Este fato se deve a variação de latitude, à sua posição no interior do continente e as diferentes intensidades de participação de frentes polares (Nimer, 1977).

Segundo Nimer (1977), as características da altura do relevo e do regime de chuvas nessa área se devem quase exclusivamente aos sistemas de circulação atmosférica. A influência da topografia sobre a distribuição da precipitação ao longo do espaço geográfico é de tão pouca importância que não chega a interferir nas tendências gerais determinadas pelos fatores dinâmicos. Em razão da pouca significância da topografia sobre a pluviosidade, a quantidade média da precipitação durante o ano sobre o território apresenta um padrão de distribuição característico. Distingue-se um núcleo mais chuvoso ao norte do Mato Grosso, onde a pluviosidade anual atinge valores muito elevados, superiores a 2.700 mm, com estes valores decrescendo para o leste e sul atingindo 1.250 mm (Figura 3.2 e Figura 3.3).

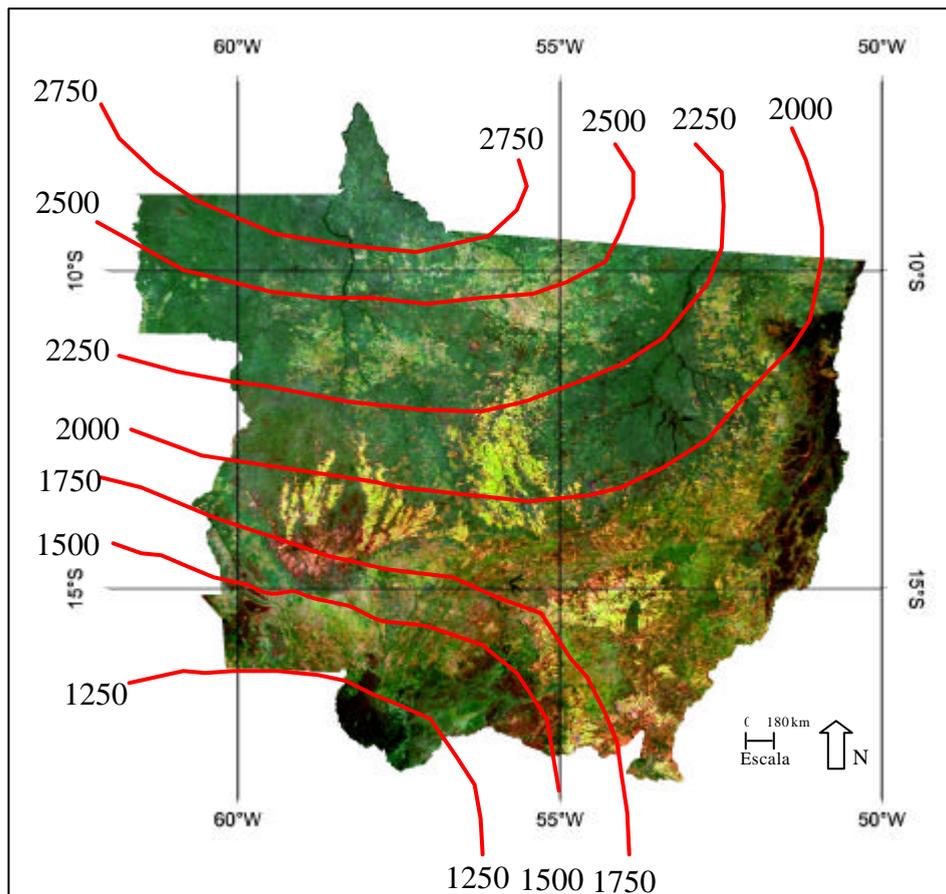


FIGURA 3.2 - Isoietas anuais em mm do Estado do Mato Grosso sobre uma imagem MODIS referente a época chuvosa, composição RGB das bandas 1,2 e 7. FONTE: Adaptada de Nimer (1977).

Entretanto, essas precipitações não se distribuem igualmente através do ano. Seu regime é caracteristicamente tropical, com máxima no verão e mínima no inverno. Mais de 70% do total de chuvas acumuladas durante o ano se precipita de novembro a março, sendo geralmente mais chuvoso o trimestre janeiro-março no norte do Estado, dezembro-fevereiro no centro e novembro-janeiro no sul. Durante esses trimestres chove em média 45 a 55% do total anual. Em contrapartida, o inverno é excessivamente seco. Nessa época do ano as chuvas são muito raras, ocorrendo em média de 4 a 5 dias por mês (Figura 3.3).

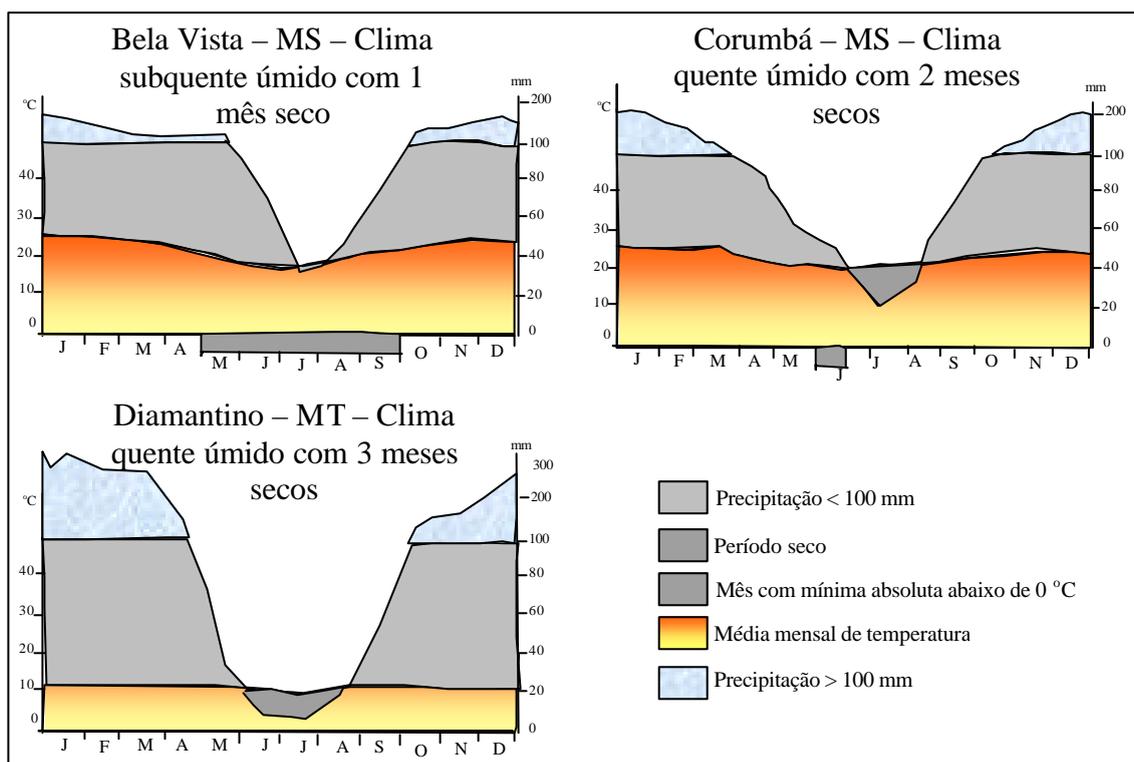


FIGURA 3.3 - Curvas de precipitação de algumas localidades na região Centro-oeste.

FONTE: Adaptada de Nimer (1977).

A Figura 3.3 apresenta as curvas de precipitação e temperatura para algumas cidades na região Centro-oeste. Observa-se a distribuição desigual da precipitação durante o ano, marcando duas estações bem definidas e as altas temperaturas. Estes dados podem ser especializados para a região juntamente com o clima (Figura 3.4).

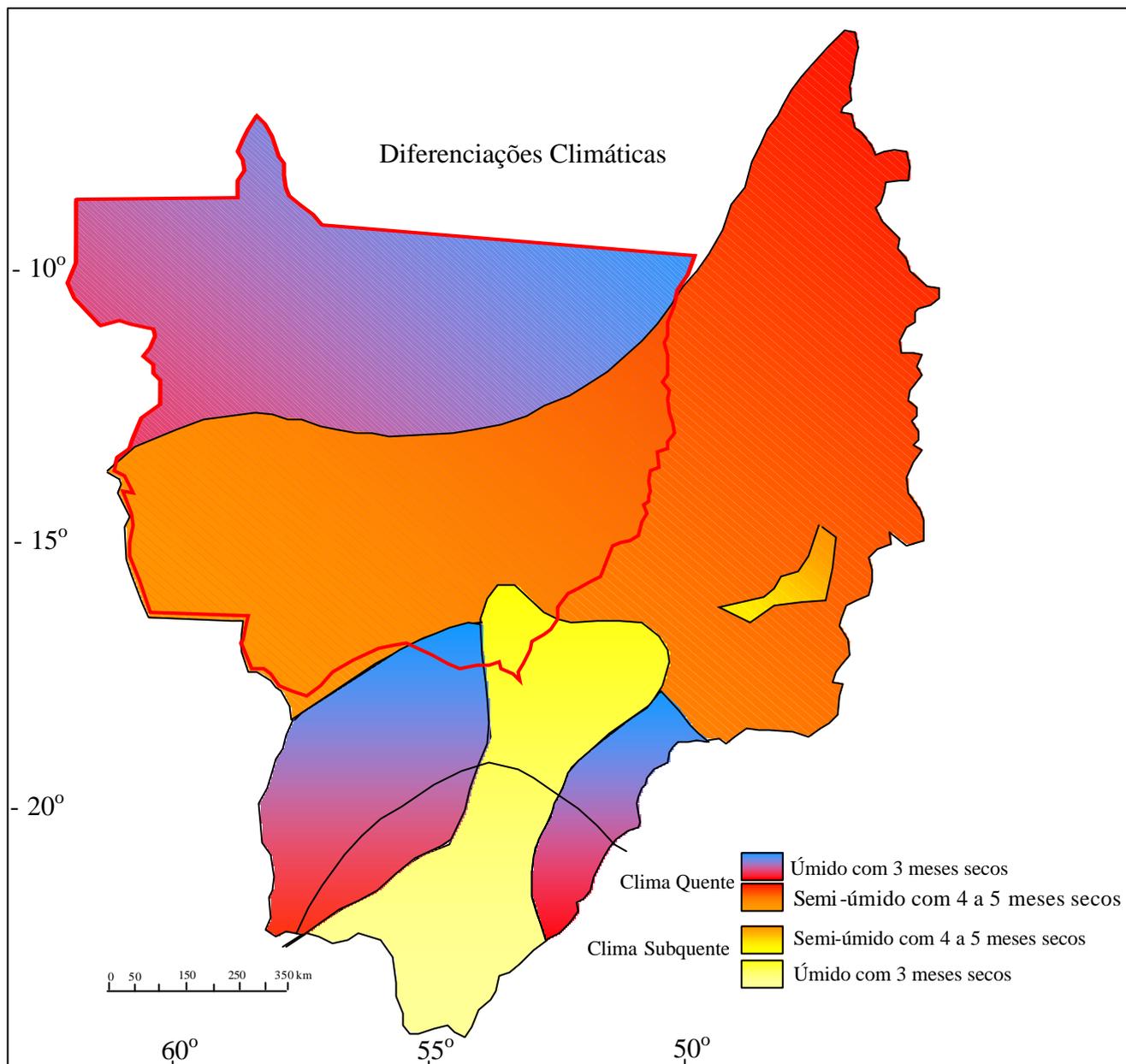


FIGURA 3.4 - Mapa climático da região Centro-oeste, com o limite político do Estado do Mato Grosso.

FONTE: Adaptado de Nimer (1977).

O relevo nesta região repousa sobre a porção do escudo brasileiro denominada de Maciço Central, Maciço do Brasil Central, ou ainda, Maciço Mato-Grossense. Este representa um vasto conjunto de áreas de escudo exposto, exibindo complexas estruturas geológicas, sobre as quais vieram a se depositar sedimentos. O Maciço Mato-Grossense é limitado ao norte pelas Bacias amazônicas, a leste pela Bacia do São Francisco, a oeste pela borda oriental andina e ao sul-sudeste, pela Bacia de sedimentação do Paraná. Este Maciço apresenta-se soerguido para o sul, onde são

encontradas suas maiores altitudes: 800-1200 metros na Serra Azul e 500-800 metros na Chapada dos Guimarães (Figura 3.5).

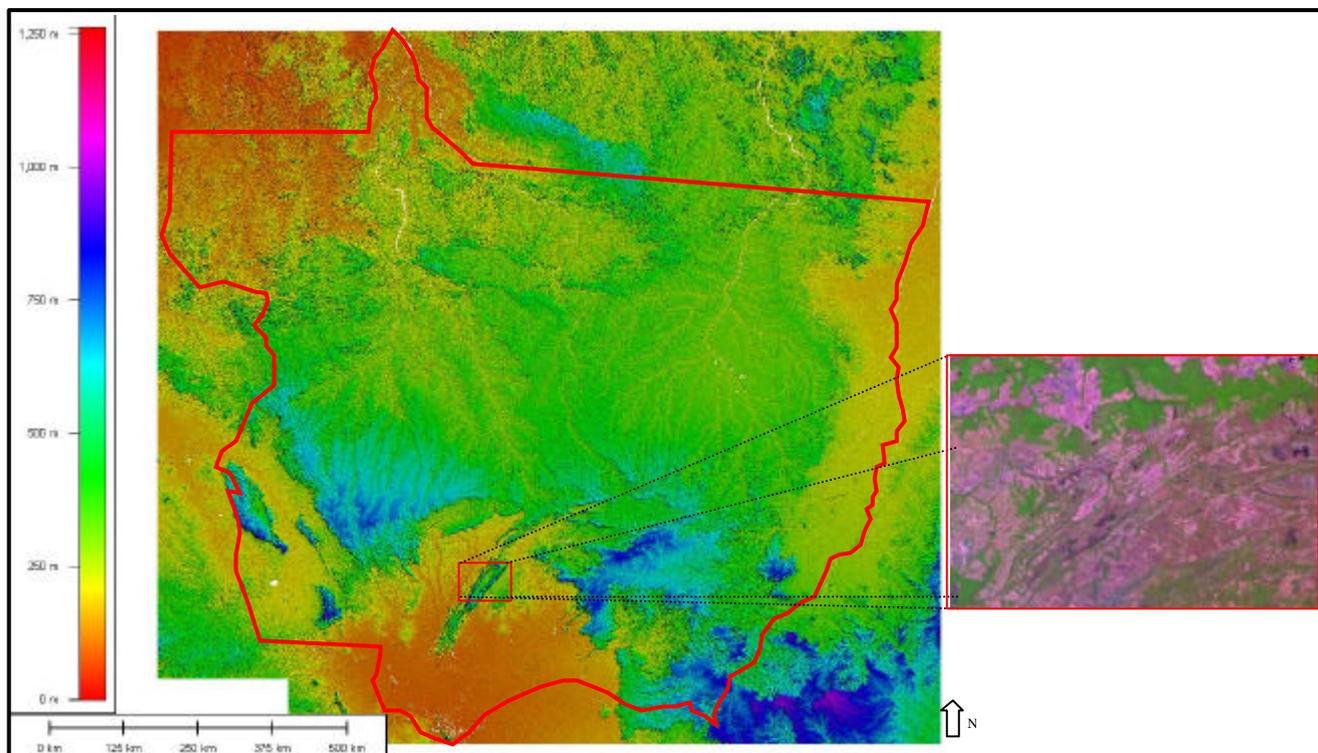


FIGURA 3.5 - Imagem SRTM do relevo do Estado do Mato Grosso, separado por classes a cada 250 metros de altitude. No detalhe, imagem Landsat abrangendo parte da Serra Azul e Chapada dos Guimarães.

Para o norte, o grande conjunto Pré-cambriano inclina-se em direção da Bacia Amazônica, apresentando altitudes médias de 200-500 metros, quebrados pelos relevos divisórios (500-800 metros) dos rios que correm para o Amazonas, tais como: a Serra Formosa, no divisor das bacias dos rios Xingú- Teles-Pires; Serra dos Caiabis-Apiacás, dos rios Teles-Pires -Arinos; Serra do Tombador, dos rios Arinos-Jurema e a serra do Norte, separando as bacias dos rios Jurema-Aripuanã (Moreira, 1977).

As rochas deste complexo incluem formações muito antigas, profundamente metamorfisadas, dobradas, falhadas e penetradas por rochas eruptivas graníticas e graniodioríticas. Filitos, quartzitos e xistos são aí encontrados, formando o embasamento das seqüências sedimentares Paleozóicas e Mesozóicas que se dispõem sobre uma face geossinclinal – área da superfície terrestre (bacia) na qual se acumulam pacotes vulcano-sedimentares com espessura de milhares de metros (Moreira, 1977).

Na região Centro-oeste, como decorrência das condições do quadro morfológico, a sua hidrografia vê-se representada, na maior parte, por rios de planalto que se caracterizam por apresentar, ao longo de seus cursos, um certo número de quedas d'água, corredeiras e travessões rápidos e baixos. As planícies desta região apresentam área bem inferior se comparada à dos planaltos, todavia, os rios que nela desenvolvem os seus cursos também figuram como artérias de grande importância, não só pelas feições que eles imprimem na paisagem regional, como também pelas perspectivas que oferecem de utilização pelo homem (Innocêncio, 1977).

3.3 Aspectos Vegetacionais

As informações apresentadas neste item foram adaptadas do projeto RADAMBRASIL (1980, 1982). A folha SC.21 - Juruena (1980) foi selecionada com intuito de fornecer informações sobre a vegetação da região norte do Estado; a folha SD.21 - Cuiabá (1982) foi utilizada para se obter informações dos tipos de vegetação presentes na região central da área de estudo; e a folha SE.21 - Corumbá (1982a) foi utilizada para a aquisição de dados relativos a vegetação presente na região sul do Estado do Mato Grosso.

3.3.1 A Região Norte do Estado

A vegetação nesta área constitui-se de quatro classes de formação originadas de vários domínios florísticos (Flora Amazônica), com adaptações ecológicas xeromórficas e hidromórficas.

A savana encontra-se em solos de condições extremas de lixiviação, com maior expressão nos arenitos do Pré-Cambriano. Esta região caracteriza-se por um bioclima bem marcado por um período seco que se acentua nos solos de textura arenosa e temperaturas médias variáveis (acima de 18° C). Nesta área, a savana ocorre na forma de quatro diferentes fisionomias. Ela aparece ocupando grandes extensões de terreno, mas na forma de contatos, formando interpenetrações com encaves de outras regiões.

- Formação Arbórea Densa (Cerradão): as árvores geralmente apresentam pouco mais de 5 metros de altura, densamente dispostas, cujas copas não se tocam, sem um nítido

estrato arbustivo e com um tapete gramíneo ralo, em tufos, podendo ocorrer palmeiras anãs intercaladas e plantas lenhosas rasteiras (RADAMBRASIL, 1980). Estas áreas quase sempre encontram-se intercaladas com os agrupamentos da formação de fisionomia Arbóreo Aberta.

- Formação Arbórea Aberta (Campo Cerrado): as árvores apresentam-se esparsadas, com uma altura variando de 2 a 5 metros, esgalhadas e bastante tortuosas, dispersas sobre um tapete contínuo de hemicriptófitas (gramíneas, principais produtoras primárias com alta rebrota após a queima), intercaladas de plantas arbustivas baixas e outras lenhosas rasteiras, geralmente provida de xilopódios (RADAMBRASIL, 1980).

- Formação Gramíneo-Lenhosa (Campo Limpo): Essa formação caracteriza-se por um tapete gramíneo e ralo em mistura com arbustos eretos e decumbentes, sendo comum à ocorrência de palmeiras anãs.

A região da Floresta Ombrófila Densa Tropical ocorre sempre em locais com características bioclimáticas de curto período seco (de 0 a 2 meses) e temperatura acima de 25° C. Sua área de ocupação é diminuída em grandes proporções a medida que avança para o sul. Esta região ocupa uma área de cerca de 26.618 Km², e é constituída de árvores com alturas entre 20 e 30 metros, troncos retos e bem copados que representam os estratos dominantes e co-dominantes. Apresentam um grande número de espécies, muitas de excelente propriedade e de ótima potencialidade de madeira por unidade de área, e está representada por duas formações:

- Aluvial: em que as formações dominam as planícies aluviais, e com constituições pedológicas distintas;

- Submontana: corresponde a mais de 80% da cobertura total da área e é fisionomicamente caracterizada por árvores emergentes e floristicamente bem heterogêneas. De acordo com as formas do terreno, esta região apresenta características ambientais múltiplas.

A região da Floresta Ombrófila Aberta Tropical ocupa grandes extensões de terreno com diferentes aspectos fisiográficos e litológicos. Ela caracteriza-se por um bioclima

de período seco pouco pronunciado (2 a 3 meses) e altas temperaturas (acima de 22° C – Tropical Equatorial Amazônico), com predomínio de espécies fanerófitas ombrófilas rosuladas e lianas lenhosas. Na formação Submontana a fisionomia é diferenciada pelas subformações com cipós, com palmeiras e com bambu.

•Formação Submontana: apresenta uma cobertura vegetal com fisionomia de subformação com cipó, às vezes palmeiras, podendo estar interrompida por pequenas áreas com predomínio de Floresta Densa.

A região da Floresta Estacional Decidual Tropical compreende uma vegetação que ocupa cerca de 5.140 Km², sobre solos deficientes de areia quartzosas, localizado entre o contato da Floresta Estacional com uma vegetação de aspecto fisionômico de savana. É caracterizada pela formação Submontana com dossel emergente, em que em épocas desfavoráveis, mais de 60% perdem suas folhas e há um grande número de epífitas. Possui um grande número de plantas graminóides e espécies decíduas, cerca de 50 a 60 por hectare, sobre uma espessa camada de material orgânico não decomposto. A fisionomia de emergentes decíduas é de uma certa homogeneidade de determinadas espécies.

As áreas de Formações Pioneiras são aquelas que ocorrem ao longo dos cursos dos rios e ao redor de depressões fechadas que acumulam água, onde se observam vegetações campestres herbáceas lenhosas de terófitas, geófitas, e às vezes, hemicriptófitas, que podem passar por um processo de sucessão natural. Estas formações ocupam áreas pedologicamente instáveis, com sedimentos pouco consolidados, sob o processo de acumulação fluvial ou lacustre.

Outras formações que ocorrem nesta região são as Áreas de Tensão Ecológicas, que possuem características diversas, dependendo entre quais tipos de vegetação está ocorrendo o contato. As várias formas de relevo traduzem uma litologia também muito complexa. A ocorrência da Savana está de certa forma correlacionada às formas de dissecação em que se acham os relevos. A predominância de colinas e cristas reflete um desenvolvimento maior de Floresta Estacional com encaves de Savana. O Cerradão tem acentuada presença nas encostas, sendo sucedido por uma vegetação florestal cuja

deciduidade cresce a medida que as elevações se tornam mais íngremes. As interpenetrações da savana nas formações florestais obedecem a algumas variações pedológicas.

Representações esquemáticas dos perfis de vegetação, que caracterizam a distribuição das diferentes formações vegetais em três importantes regiões da área de estudo podem ser visualizadas na Figura 3.6.

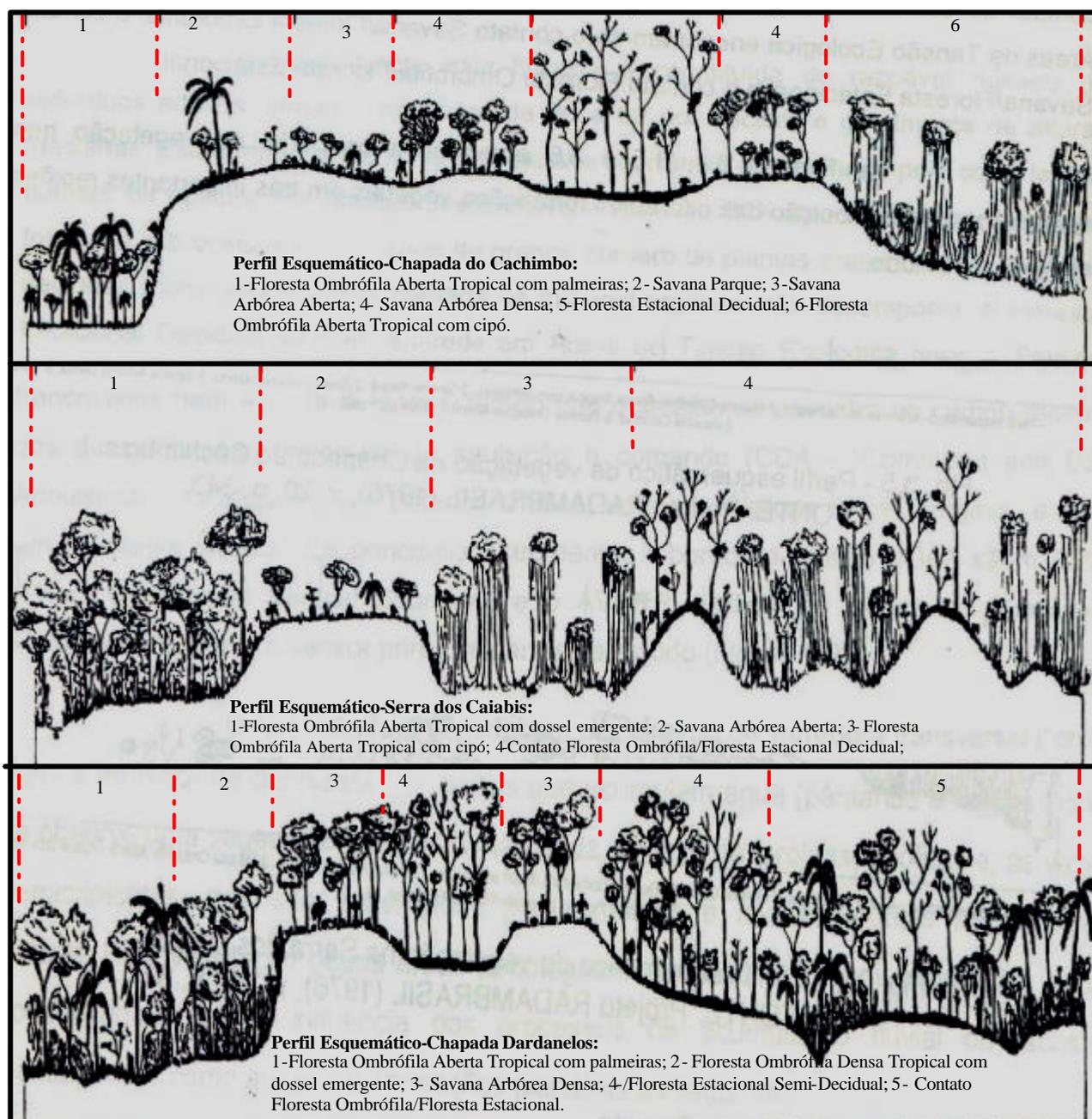


FIGURA 3.6 - Perfil esquemático de vegetação em três regiões do Estado do MatoGrosso.
 FONTE: Adaptada de RADAMBRASIL (1980).

3.3.2 A Região Central do Estado

Na região Central do Estado foram descritas cinco regiões fitoecológicas: Savana, Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual.

Dentre estas regiões fitoecológicas, a Savana é a que melhor caracteriza a cobertura vegetal, representando mais de 57% da área, e cerca de 30% fica para o domínio da Floresta Estacional, com o restante para as demais formações.

A Savana ou Cerrado é caracterizada pela dominância de fanerófitas (plantas com brotos acima do solo protegidos com escamas coriáceas), caméfitas (plantas herbáceas ou lenhosas adaptadas a condições desfavoráveis, com brotos em talos rasteiros), hemicriptófitas (plantas com os brotos semi-enterrados) e poucas geófitas (possuem rizoma - órgão subterrâneo que podem ser utilizados para a reprodução ou como fonte de reservas). Os fatores ecológicos naturais proporcionam a variação que vai desde uma vegetação constituída por espécies lenhosas e herbáceas (Savana Arbórea Aberta, Savana Parque e Savana Gramíneo-lenhosa), geralmente serpenteado de floresta de galeria, até o clímax do tipo arbóreo: Savana Arbórea Densa (Figura 3.7). É constituída de arvoretas relativamente baixas, com troncos e galhos retorcidos, disseminadas entre numerosas e variadas plantas lenhosas anãs e herbáceas. Em toda a região Fitoecológica da Savana, o clima é tropical com duas estações bem distintas: a estação chuvosa durante o verão e a estação seca durante o inverno (maio a setembro). As quatro formações das fisionomias de Savanas estão descritas no item 3.5.1 (região Norte do Estado).

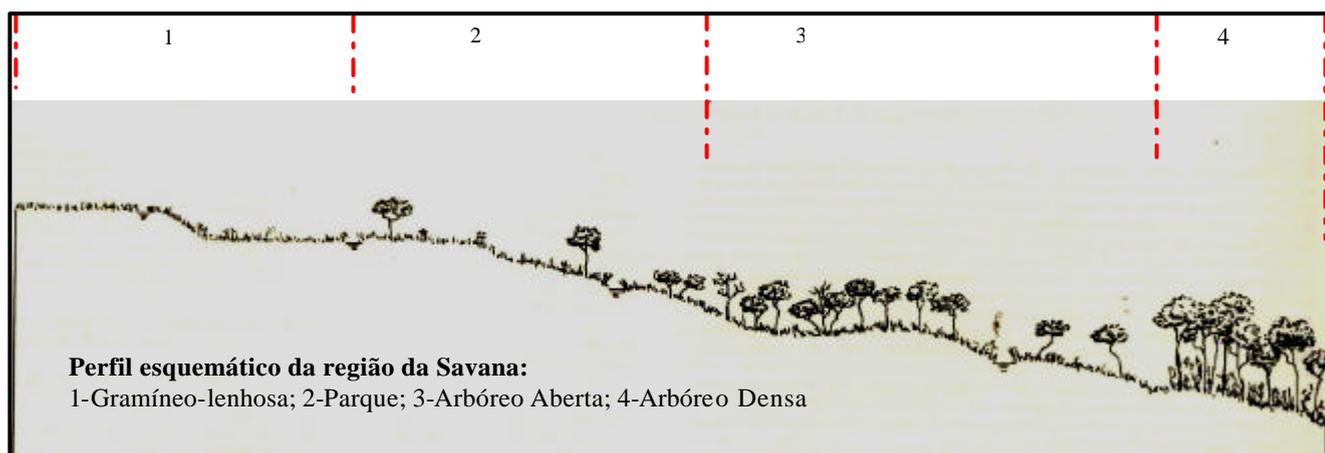


FIGURA 3.7 - Perfil esquemático da região de Savanas.

FONTE: Adaptada de RADAMBRASIL (1982a).

Das outras formações vegetais presentes nesta região (Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual), apenas as características da Floresta Estacional Semidecidual ainda não foram descritas. As descrições destas formações vegetais estão no item 3.5.1 deste estudo, e a descrição da Floresta Estacional Semidecidual encontra-se a seguir.

A região da Floresta Estacional Semidecidual cobre uma superfície bastante expressiva. Possui duas subformações: Aluvial com dossel emergente e Submontana com dossel emergente, que estão descritas no item 3.5.1.

- Subformação Floresta Estacional Semidecidual Aluvial com dossel emergente: aparece nas planícies aluviais dos principais rios, e de um modo geral, as espécies florestais que compõem esta estrutura não atingem grandes alturas, ficando as emergentes na faixa dos 20 metros. De uma maneira geral, não são encontradas palmeiras nem cipós nas suas sfisionomias.

3.3.3 A Região Sul do Estado

Nesta região Sul do Estado, quatro regiões fitoecológicas podem ser diferenciadas: Savana (Cerrado), Savana Estépica (Vegetação Charquenha), Floresta Estacional Decidual e Floresta Estacional Semidecidual.

As descrições destas formações vegetais podem ser encontradas nos itens 3.5.1 e 3.5.2., com exceção da Savana Estépica ou Savana Parque (Figura 3.8), que se encontra a seguir.

- Formação Savana Estépica ou Savana Parque: ocorre geralmente em relevo plano, com altitudes que não ultrapassam 200 metros do nível do mar, com exceção dos testemunhos com bases calcáreas que se distinguem em meio aos terrenos alagáveis, onde se fixam as formações vegetais densas. A vegetação dominante é a graminóide, seguida de esparsos agrupamentos de vegetação densa, sob um regime de longo período de encharcamento do solo.

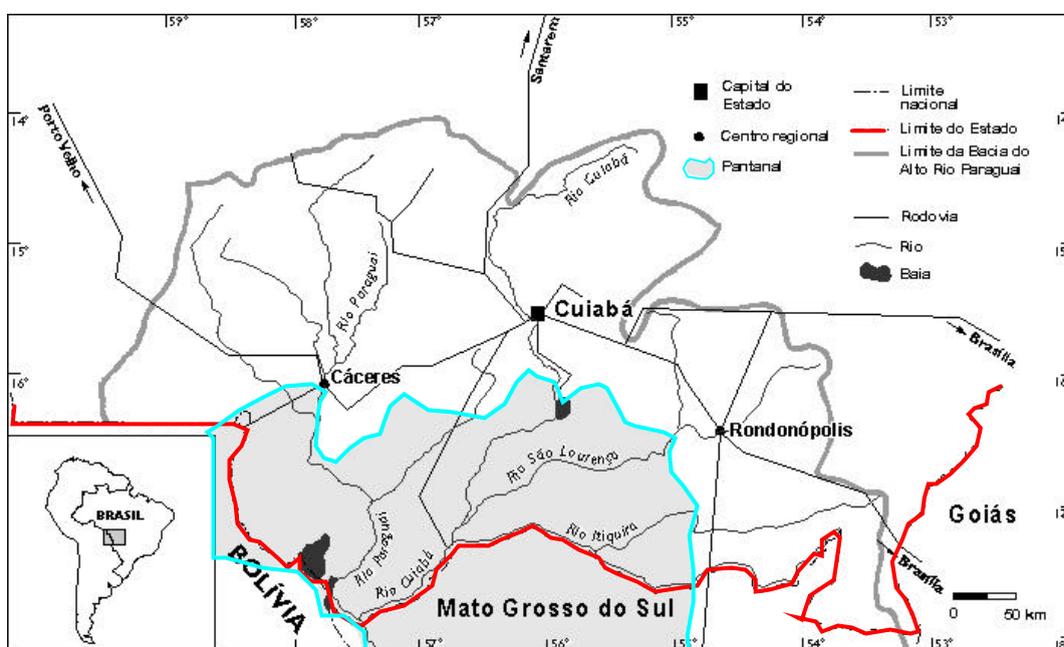


FIGURA 3.8 - Localização das áreas que fazem parte do Pantanal brasileiro.

FONTE: Adaptada de

<http://www.uni-tuebingen.de/geography/fla/pantanal/bapmappt.html>

3.4 Uso da Terra no Estado do Mato Grosso

O Mato Grosso vem ganhando espaço no cenário nacional econômico e político, devido a um grande aumento na produção agropecuária, e relacionado a questões de conservação do ambiente. Serão analisados a seguir os principais fatores que têm contribuído para a mudança no uso e na cobertura da terra para esta região, divididos em três itens: a agropecuária, as queimadas e o desmatamento.

3.4.1 A Agropecuária

As empresas colonizadoras públicas e privadas têm contribuído para a história recente do desenvolvimento do norte do Mato Grosso, tendo como papéis principais, projetos agropecuários, extração madeireira e o aumento do garimpo.

Soares Filho (2001) realizou um estudo relatando os fatores que levaram à fragmentação da paisagem nesta região. Segundo ele, a ocupação da região teve início em meados da década de 70, com a abertura da estrada BR-163, que liga Cuiabá a Santarém no Pará. Logo no início das obras, a região foi invadida por colonizadores espontâneos que vieram a se fixar ao longo da faixa marginal da rodovia. Simultaneamente, começaram a abertura das extensas glebas de pastagens nas fazendas do Complexo Agropecuário Cachimbo. No início da década de 80, a ocupação da região ganhou um tremendo impulso a partir da instalação dos projetos de colonização, formados principalmente por cooperativas de colonos do sul do Brasil. Outro fator foi à influência do ciclo do garimpo de ouro, encontrado em grandes quantidades nos depósitos aluvionares do Rio Peixoto de Azevedo e seus afluentes. Este fato levou a uma situação particular, caracterizada pela participação ativa dos colonos na atividade garimpeira que se desenvolvia próximo ou mesmo dentro de suas propriedades rurais. Na década de 90 houve um rápido declínio do garimpo, resultando num retorno à atividade rural por parte de muitos colonos. Ocorreram também migrações internas das áreas de garimpos para as cidades. Como consequência deste processo, geraram-se novas pressões para invasões de terra e o êxodo da população local para outras regiões da Amazônia. Neste contexto, pode-se afirmar que a ocupação da região ocorreu de diversas formas, tanto pela aquisição de terras por grandes companhias agropecuárias ou por uma série de projetos de colonização, e ainda pela ocupação espontânea (invasão) de terras públicas e privadas.

Hoje, os resultados da ocupação no Estado do Mato Grosso representam um impacto devastador no seu meio ambiente original. Este processo gerou uma paisagem modificada, na qual destacam-se manchas de áreas agrícolas e de pastagens, distribuídas em lotes de 50 a 1000 ha, que se dispõem ao redor das grandes propriedades de

companhias agropecuárias, e em meio a áreas de remanescentes florestais (Soares Filho, 2001).

Silveira Júnior et al. (2001) realizaram um estudo investigando a relação entre a expansão das áreas desflorestadas e das áreas de pecuária para os municípios do Estado do Mato Grosso, chegando as seguintes conclusões:

- Área 1 ou Regime 1: caracterizado por municípios que apresentam valores medianos das densidades de desflorestamento e de rebanho bovino;
- Regimes 2 e 3: municípios que possuem a maior parte ou mesmo todo seu território constituído pelo cerrado, portanto, apresentam pouco ou nenhum desflorestamento. O Regime 3 é diferente do 2 porque seus municípios possuem altas densidades de rebanho bovino, o que pode caracterizar áreas de atividade pecuária intensiva.
- Regime 4: formado por municípios que apresentam baixa densidade de rebanho bovino e alta taxa de desflorestamento. Isso induz a questionamentos sobre a capacidade de suporte do ambiente ou mesmo que outras variáveis poderiam ser a causa deste desflorestamento.
- Regime 5: compreende os municípios que apresentam altas taxas de desflorestamento e de aumento de rebanho bovino.

A Figura 3.9 representa a espacialização desta ocupação, com base nos regimes descritos acima (Silveira Júnior et al., 2001):

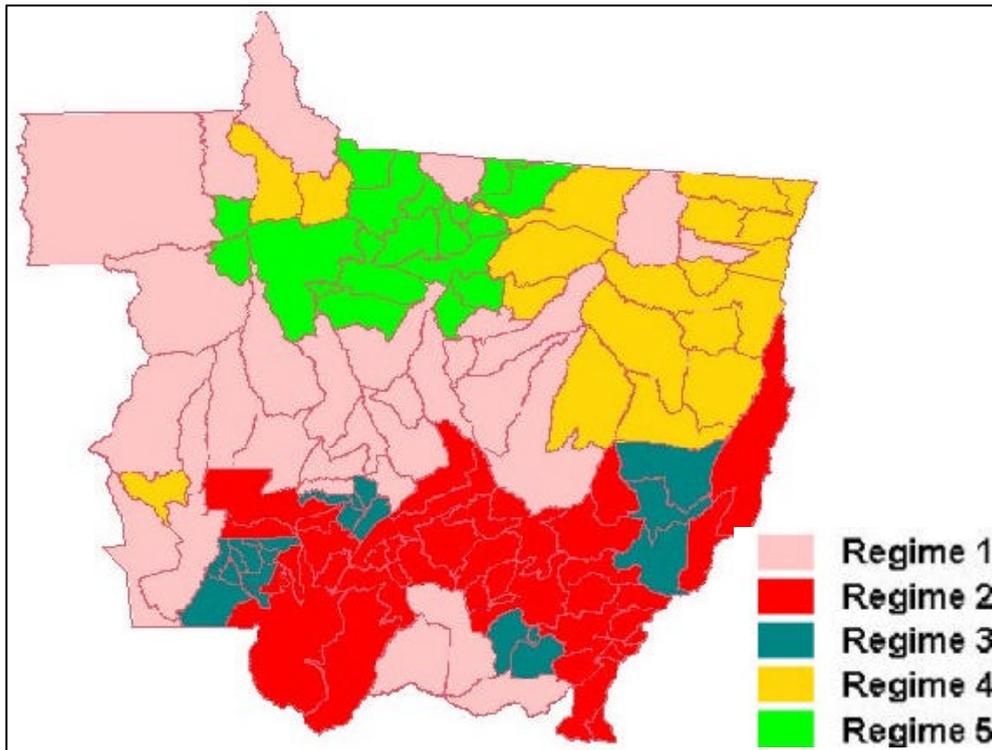


FIGURA 3.9 - Regimes espaciais agrupados segundo padrões de desmatamento e efetivo do rebanho.

FONTE: Adaptada de Silveira Júnior et al. (2001).

Souza et al. (1998) realizaram um estudo na região da Chapada dos Parecis, chegando a conclusão de que as reservas indígenas estudadas sofreram diferentes tipos de pressão por parte do entorno agrícola: primeiramente, as fronteiras de reservas indígenas próximas as de agricultura ostensiva em grandes propriedades não sofreram invasão, e segundo, as fronteiras de reservas indígenas estabelecidas nas vizinhanças de propriedades pequenas ocorreram efetivamente invasões. Segundo estes autores, os vetores desta pressão e mesmo da invasão são as estradas.

Assunção (1987), Anderson et al. (2003) e Derenne et al. (2001) realizaram estudos na região de cerrados do Estado do Mato Grosso, chegando a resultados de incremento das áreas preparadas e plantadas para culturas agrícolas, principalmente de soja e milho.

A soja, em meados da década de 80, destacou-se pela incorporação dos Cerrados tropicais no sistema produtivo agrícola nacional. A estabilidade climática dessa região e as condições topográficas favoráveis contribuíram para o desenvolvimento da agricultura. Com solos quimicamente pobres, foi fundamental a contribuição das

pesquisas desenvolvidas nessa região, pela Embrapa Cerrados (Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados). Estas pesquisas viabilizaram a produção sustentável de grãos. A utilização da soja na abertura de áreas nos Cerrados, em substituição ao arroz, bem como a obtenção de cultivares brasileiros altamente adaptados a essa região, fez com que a soja tivesse um considerável aumento de área de cultivo. O principal incremento da produção de soja ocorreu na região Centro-Oeste, onde passou de 8,8 milhões para 13 milhões de toneladas, ou seja, passou de 7,2 para 25,3 mil t/dia. Esta região está destinada a ser a maior produtora de soja em um curto prazo de tempo (EMBRAPA, 2000).

Em 2000, o Mato Grosso já representava o segundo maior produtor (a produção foi menor somente que a do Rio Grande do Sul), com 2,9 milhões de ha (Figura 3.10). Os principais obstáculos à expansão desta leguminosa nesta região são os problemas relacionados ao escoamento, armazenagem precária e deficiências de comercialização. Entretanto, a realização de investimentos, como o Corredor de exportação de Santarém, composto pela rodovia Cuiabá-Santarém, pela hidrovia Tapajós e pelo porto de Santarém, contribuíram para a implementação de novas áreas desta cultura.

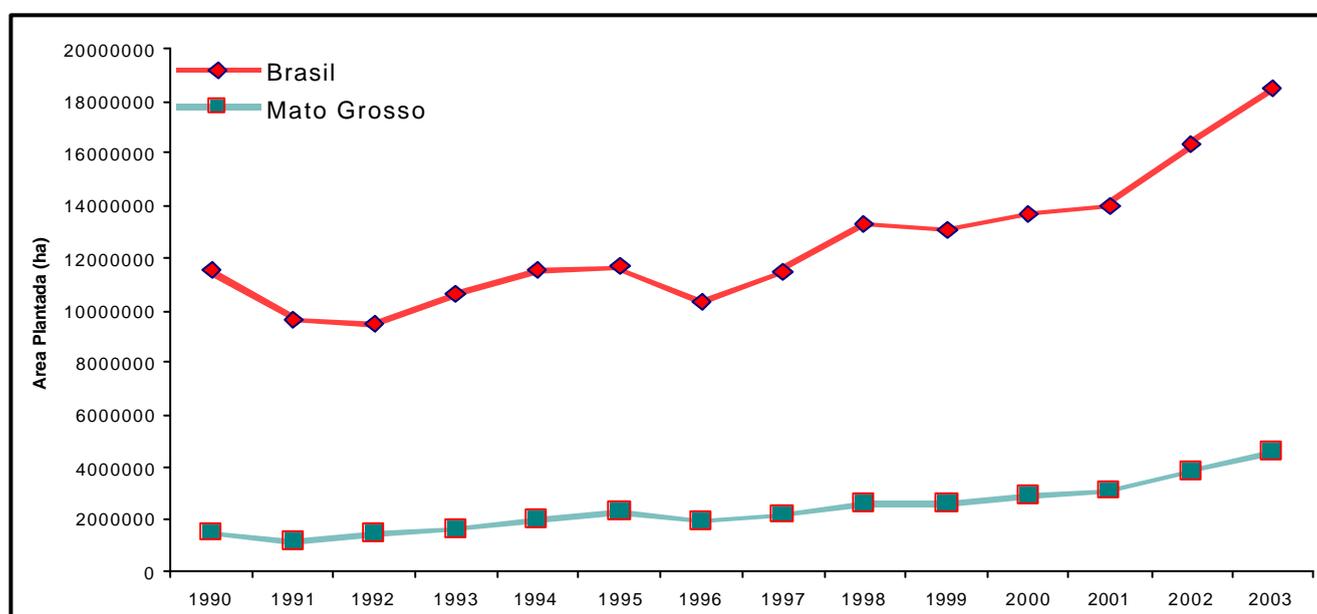


FIGURA 3.10 - Incremento da área plantada de soja para o Estado do Mato Grosso em relação à área total plantada para o Brasil.
 FONTE: Adaptado de IBGE/SIDRA (2003).

Na Figura 3.11, observa-se a dinâmica do crescimento da produção da cultura da soja em toneladas no Estado do Mato Grosso, entre 1990 e 2001, com base nos dados fornecidos pela SIDRA/IBGE (2003).

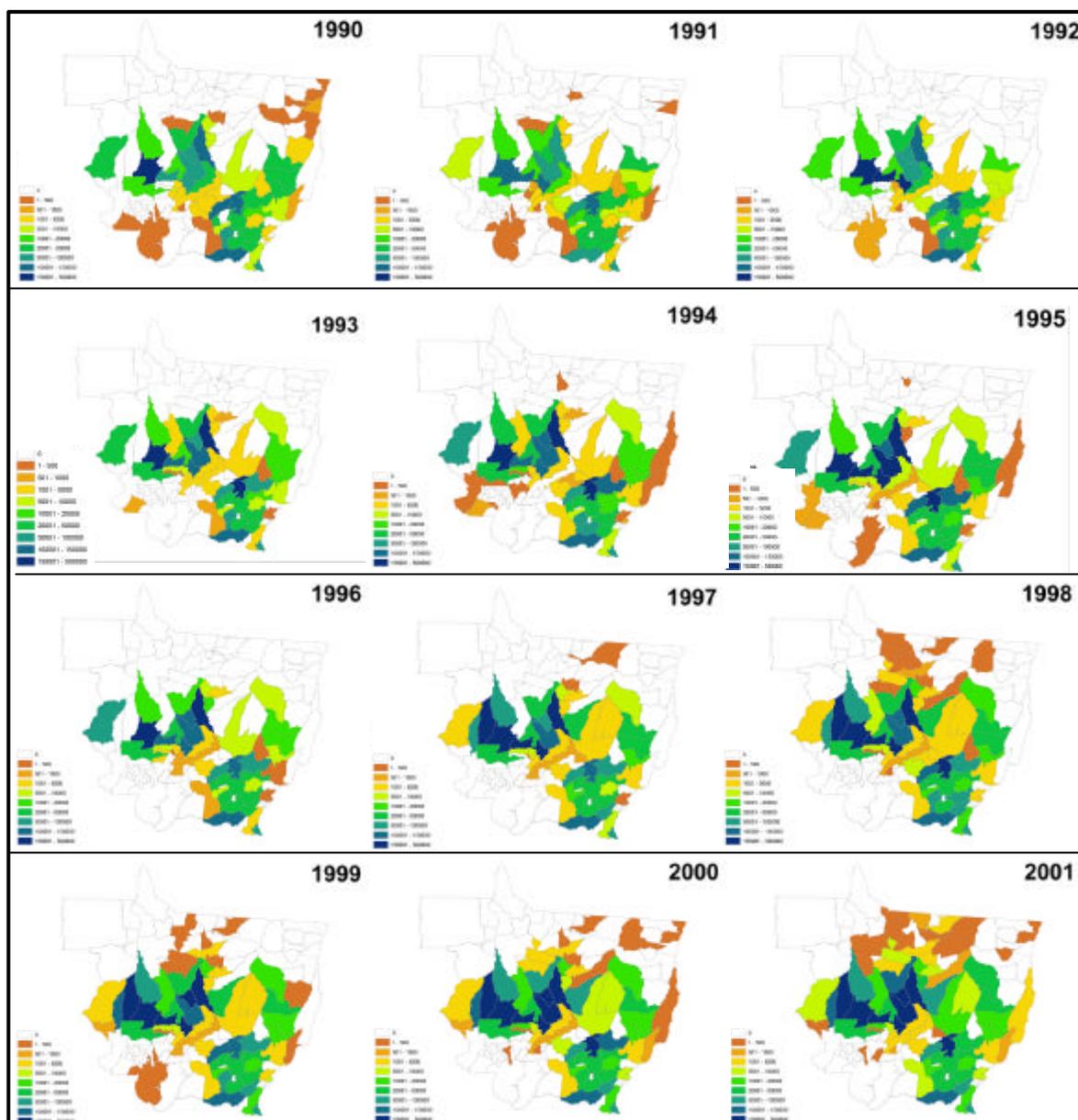


FIGURA 3.11- Dinâmica da produção de soja (em toneladas) nos municípios do Estado do Mato Grosso, para o período de 1990 a 2001.
FONTE: Adaptada de IBGE/SIDRA (2003).

3.4.2 As Queimadas

Outro importante fator de pressão para a mudança da cobertura vegetal é a queimada. Na região do cerrado a maior parte das queimadas ocorre durante a estação seca ou no início da estação úmida, em intervalos de 1 a 5 anos. Em geral estas atingem o estrato herbáceo (formado principalmente por gramíneas), e são normalmente superficiais, com chamas de baixa altura. A intensidade das queimadas depende principalmente da quantidade e da umidade do material combustível, além das condições meteorológicas (temperatura, umidade relativa do ar, e velocidade e direção do vento). Adicionalmente, as áreas com maior concentração de queimadas ocorrem principalmente nas unidades de vegetação com ação antrópica (Cunha, 1994).

O acúmulo de focos de calor mensal detectado pelo satélite NOAA-AVHRR para o Estado do Mato Grosso pode ser visualizada na Figura 3.12. Nesta Figura nota-se que esta região é extremamente sensível a queimadas, destacando a importância da realização de um monitoramento e levantamento das áreas queimadas e de risco utilizando dados sensoriados de melhor qualidade.

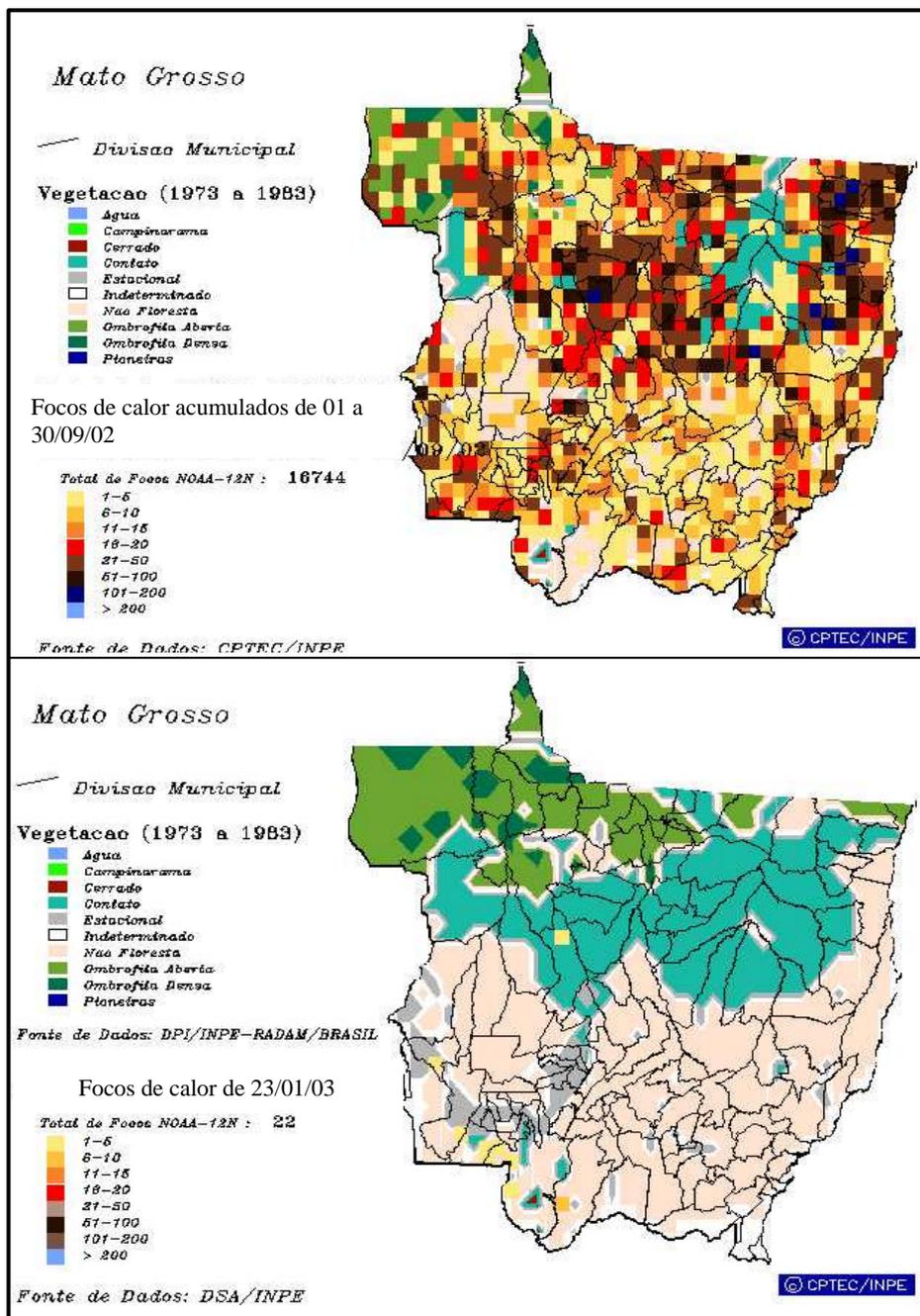


FIGURA 3.12 - A imagem superior mostra uma composição dos focos de calor acumulados do mês de agosto de 2002, para o Estado do Mato Grosso, enquanto que a imagem inferior mostra uma composição do mês de janeiro de 2003. Estes dados são gerados com base nos dados do satélite NOAA/AVHRR.

FONTE: INPE/CPTEC (2003).

Na Figura 3.13, apresenta-se a participação do Mato Grosso em relação ao Brasil, que para o ano de 1999 o percentual foi de 39%, em 2000 foi de 30%, e em 2001 caiu para 22,57%. Segundo a FEMA (Fundação Estadual do Meio Ambiente), esta queda é devido ao sistema de identificação de Focos de Calor, e ao trabalho conjunto da própria FEMA, prefeituras, IBAMA, ONGs e trabalhos de educação ambiental nos entornos das áreas de conservação.

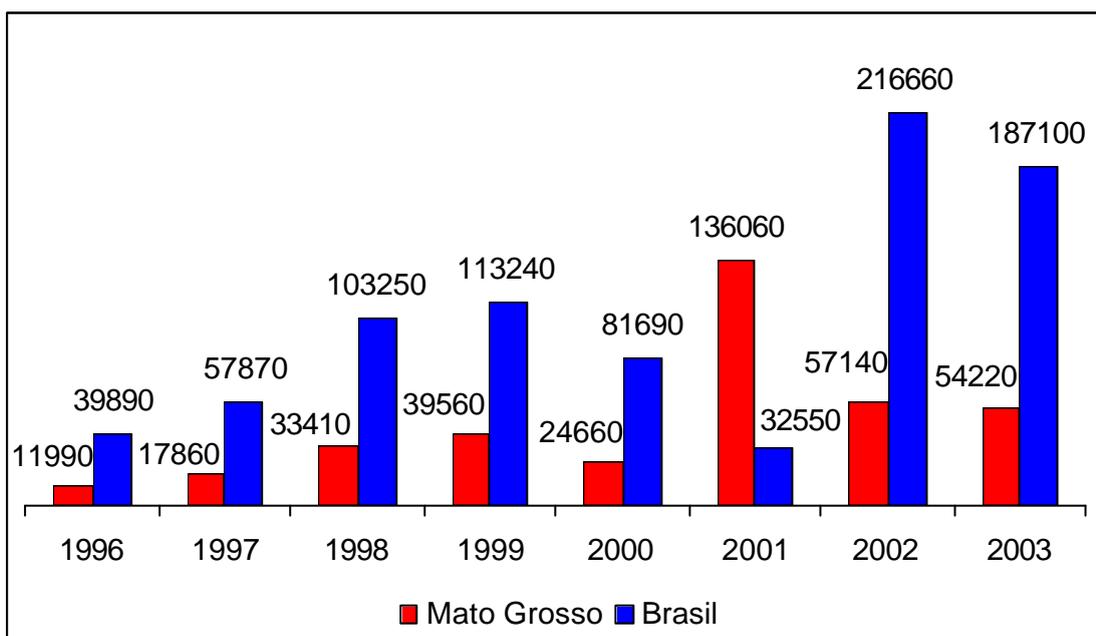


FIGURA 3.13 - Focos de calor no Estado do Mato Grosso em relação a ao Brasil, para o período de julho a setembro.
 FONTE: Adaptada de FEMA/COGEO/INPE (2001).

Com período de estiagem hídrica, a vegetação se torna uma alta fonte de propagação de fogo, sendo o homem o maior responsável pelas queimadas. Todas as regiões do Mato Grosso se tornam áreas de alto risco para ocorrência de queimadas e incêndios florestais de grande proporção. Para o ano de 2001, verificou-se que nos municípios de Sorriso ocorreram 1.520 focos, em Ipiranga do Norte, ocorreram 1.250 e de Vera ocorreram 1.016 focos (FEMA, 2004). Estes municípios pertencem a Mesoregião Norte, e se destacaram com números superiores a mil focos, sendo que mais de 75% dos focos detectados nesses municípios foram nos meses em que as queimadas estavam autorizadas.

No período de proibição da queima, que corresponde aos meses de julho, agosto e setembro, a Microregião que se destacou no ano de 2001 foi a do Alto-pantanal, com o município de Cáceres apresentando 727 focos, mais da metade dos focos identificados para esta região em 2001. Em Barão de Melgaço, foram identificados 491 focos e em Poconé, 440 focos. A base econômica desses municípios é a pecuária, ocupando extensas áreas do Pantanal Mato-grossense (FEMA, 2001). A prática da queimada para limpeza e renovação de pasto é muito usada pelos pecuaristas desta região.

Na Figura 3.14, observa-se a distribuição dos focos de calor por Mesoregiões no Estado do Mato Grosso no período de 1996 a 2002. Na Mesoregião Norte, observou-se um aumento no número de focos de incêndio, provavelmente relacionados à expansão do desmatamento nesta região.

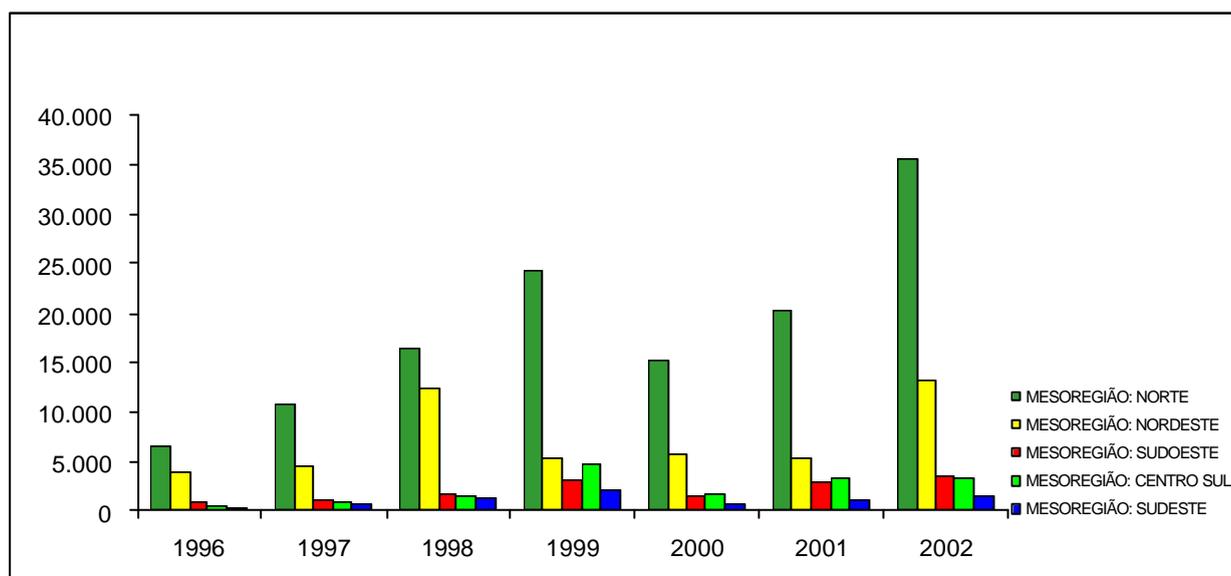


FIGURA 3.14 - Focos de calor nas Mesoregiões do Estado do Mato para o período 1996 a 2002.

FONTE: FEMA/COGEO/INPE (2004).

3.4.3 O Desmatamento

Batista e Tucker (1994) realizaram um estudo sobre o desmatamento no Mato Grosso, utilizando imagens do sensor AVHRR/NOAA e TM/Landsat. Segundo os autores, as maiores taxas de desmatamento estavam concentradas nas fronteiras sul e leste da floresta tropical com as zonas de cerrado. Foi ressaltada também a importância de discriminar a região de cerrado da floresta, devido a diferenças na biomassa, composição florística e regimes climáticos destes dois tipos de vegetação. O desmatamento nas florestas implica em uma quantidade maior de biomassa sendo convertida em gases que são liberados diretamente para a atmosfera, se comparado com as queimadas que ocorrem nas regiões de cerrado.

Amaral (1992) estudou duas regiões, localizadas no norte do Mato Grosso, que foram caracterizadas pelo padrão típico de desmatamento causado pela instalação de projetos agropecuários, em geral de grande escala, em regiões de floresta ombrófila e de transição. Neste estudo utilizaram-se imagens do sensor NOAA-AVHRR e Landsat-TM, indicando a possibilidade da utilização destes dados para a diferenciação de áreas de floresta e cerrado, assim como as áreas de desmatamento.

Os dados fornecidos pelo Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia (PRODES) – INPE/MCT, indicam uma alta taxa de desflorestamento nas regiões de contato entre diferentes tipos florestais e nas áreas de Floresta Ombrófila Aberta.

No período de 1999/2000, mais de 80% da taxa média do desflorestamento bruto da Amazônia se concentraram nas denominadas áreas críticas, que correspondem a 49 cenas do satélite Landsat (17 cenas estão localizadas no Estado do Mato Grosso), representando aproximadamente 21% do total das cenas que recobrem toda a região da Amazônia legal (229 cenas) (Figura 3.15).

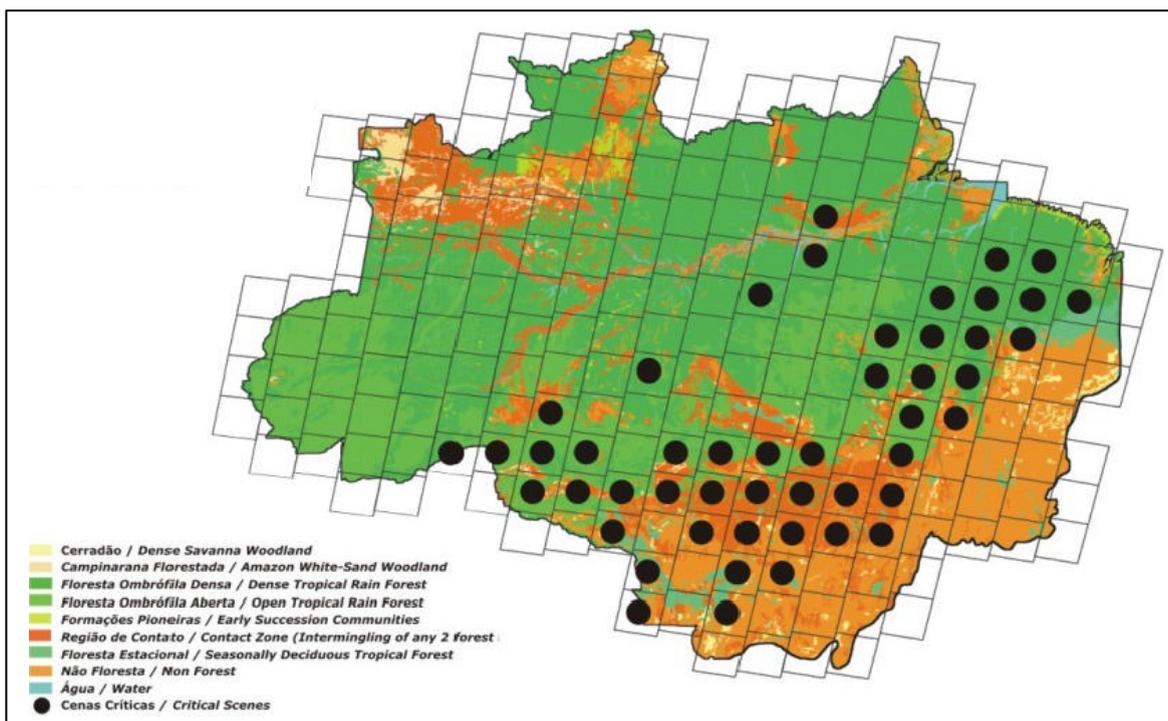


FIGURA 3.15 - Cenas TM/Landsat consideradas na geração da estimativa da taxa média do desflorestamento bruto das áreas críticas para o período de 2000/2001.
 FONTE: INPE/PRODES (2002).

O Estado do Mato Grosso está localizado dentro do chamado arco do desflorestamento, e as taxas de extensão do desflorestamento bruto estão apresentadas na Tabela abaixo (Tabela 3.1), mostrando o incremento na extensão total para o Estado no período de 1978 a 2000.

TABELA 3.1 Extensão do Desflorestamento Bruto (Km²) de Abril de 1988 a Agosto de 2000.

Ano	jan/78	ab/88	ag/89	ag/90	ag/91	ag/92	ag/94	ag/95	ag/96	ag/97	ag/98	ag/99	ag/00
MT	20000	71500	79600	83600	86500	91174	103614	112150	119141	125023	131808	137610	143930

FONTE: INPE/PRODES (2002).

As taxas médias de desflorestamento bruto (Tabela 3.2) estão apresentadas abaixo:

TABELA 3.2 Taxa Média de Desflorestamento Bruto (Km²/Ano) de Abril de 1988 a Agosto de 2000.

Meses	77/78	88/89	89/90	90/91	91/92	92/94	94/95	95/96	96/97	97/98	98/99	99/00
MT	5140	5960	4020	2840	4674	6220	10391	6543	5271	6466	6963	6369

FONTE: INPE/PRODES (2002).

Entende-se por desflorestamento bruto, além das áreas de conversão de fisionomia florestal primária por ações antrópicas em áreas de atividades agrosilvopastoris, as áreas em processo de sucessão secundária ou de recuperação florestal (PRODES, 2002).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo encontram-se descritos as metodologias e os materiais utilizados para a classificação da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso, a sua variação sazonal, e as mudanças ocorridas devido às atividades de desmatamento e queimadas. Este trabalho propõe o uso de imagens multitemporais do sensor MODIS para a classificação e mapeamento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso. As mudanças que estas formações vegetais sofreram até o ano de 2002, devido a ações antrópicas como o desmatamento e queimadas, resultando na mudança da cobertura da terra, são também analisadas. Além disso, a variação fenológica das formações vegetais classificadas foi analisada com relação aos dados de precipitação. Os resultados das etapas intermediárias são também apresentados neste capítulo.

4.1 Classificação Digital da Cobertura Vegetal

Elaborou-se a hipótese de que devido às melhores características das resoluções espacial e radiométrica do sensor MODIS, em relação aos sensores de baixa/média resolução largamente utilizados, como o NOAA-AVHRR e SPOT-VEGETATION, é possível mapear de forma mais exata as diferentes fisionomias vegetais e definir melhor seus limites e áreas de transição. Para isso, utilizou-se como base as imagens do produto MOD13 disponibilizadas na forma de mosaicos a cada 16 dias, com resolução espacial de 250 m, para todo o ano de 2002. Este produto inclui as imagens índice de vegetação NDVI e EVI, e as imagens reflectância de superfície das bandas do azul (B), vermelho (R), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR). A principal técnica para o processamento destas imagens foi a aplicação do modelo de mistura espectral e utilização das imagens fração resultantes, que já apresentou resultados consistentes para sensores de baixa resolução espacial (Carreiras et al., 2002; Rodriguez Yi, 1998). O objetivo final desta etapa foi a geração de um mapa da cobertura vegetal mais exato em

relação ao número de classes e mais preciso em relação aos limites entre as formações vegetais que os mapas já gerados.

Portanto, para o desenvolvimento desta etapa foram utilizadas 144 mosaicos MODIS cobrindo o Estado do Mato Grosso. Os produtos MODIS são disponibilizados segundo um sistema de referenciamento realizado em relação a uma grade determinada pelos planos horizontal e vertical (Figura 4.1), também denominado “Tile”. Desta forma, são necessárias 6 cenas para compor 1 mosaico do Estado do Mato Grosso. Essas cenas são listadas a seguir:

- H 11 V 9 e H 11 V 10;
- H 12 V 9 e H 12 V 10;
- H 13 V 9 e H 13 V 10;

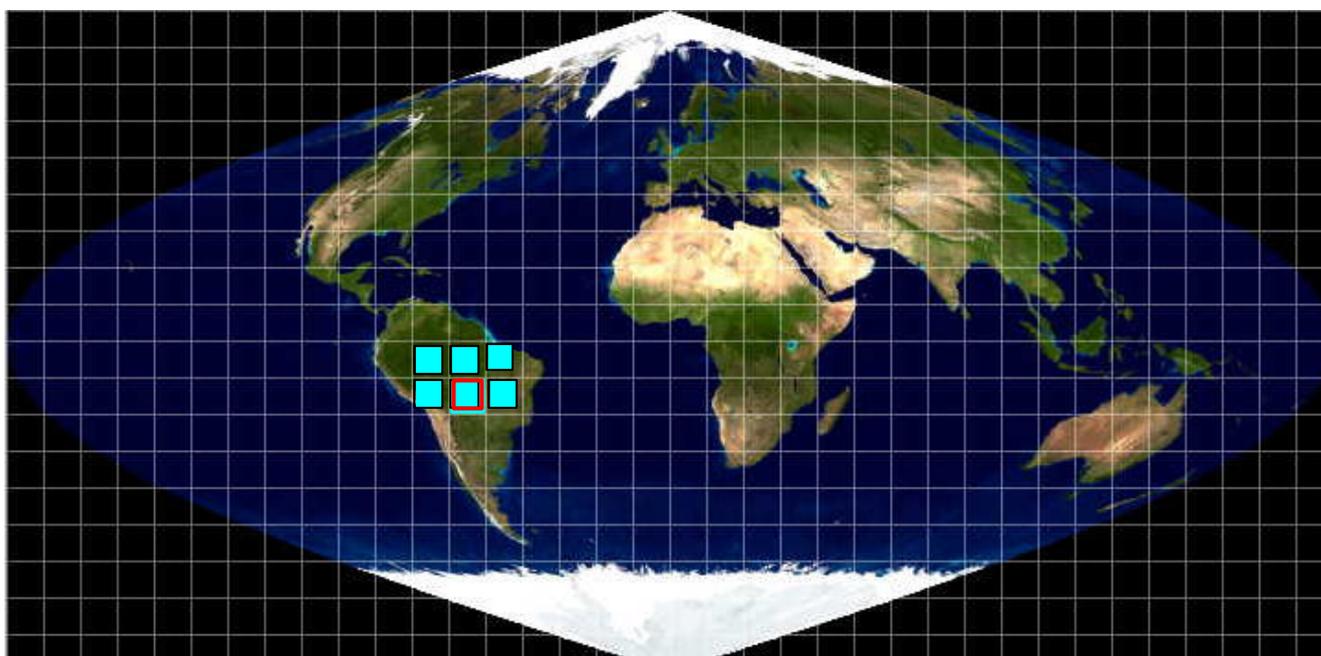


FIGURA 4.1 - Cenas do sensor MODIS utilizadas no processo de classificação da vegetação, na grade de referenciamento das imagens. Em vermelho apresenta-se a cena utilizada para a análise do processo de desflorestamento.

FONTE: Adaptada do Programa MRT (2002).

Estes dados foram obtidos através de um ftp da NASA. Existem diversos websites que disponibilizam os produtos MODIS, e o endereço utilizado foi o <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>.

As imagens MODIS necessitam passar por uma série de pré-processamentos antes de serem importadas para o banco de dados no programa SPRING.

O fluxograma das etapas seguidas para o processamento dos dados orbitais para a geração do mapa final da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso é mostrado na Figura 4.2.

4.1.1 Pré-tratamento dos Dados MODIS

Pode-se observar no diagrama da Figura 4.2 as etapas necessárias seguidas para a aquisição e processamento dos dados MODIS para a importação no aplicativo SPRING.

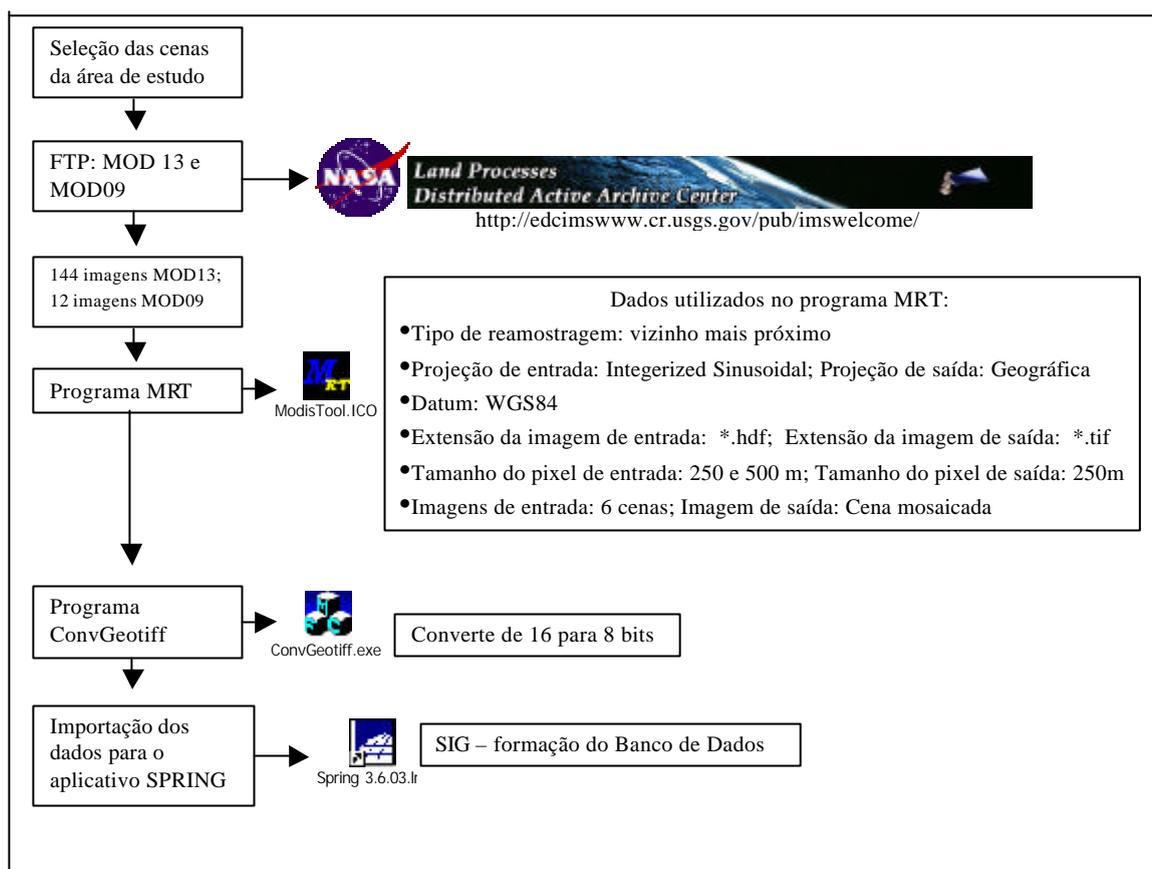


FIGURA 4.2 - Diagrama dos passos necessários para o tratamento dos dados MODIS para a importação para o Sistema SPRING.

Os dados MODIS são disponibilizados no formato HDF (“*Hierarchy Data Format*”), com um nível de quantização de 16 bits, nas projeções Integerized Sinusoidal ou Sinusoidal. Por este não ser um formato muito usual nos SIGs geralmente utilizados para o processamento de imagens, foi desenvolvido pelo EROS *Data Center* (EDC) e *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) um software, de distribuição gratuita, com a finalidade de reprojeter e mosaicar os dados MODIS Nível - 3+ relativos aos produtos voltados para o estudo dos continentes (LAND products). A criação e melhoramento deste programa estão sendo conduzidos pela *South Dakota School of Mines & Technology*.

Este programa, denominado *MODIS Reprojection Tool* - MRT, assim como os dados MODIS, podem ser adquiridos sem custos pela internet, através do site: <http://lpdaac2.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp>. O aplicativo MRT pode ser utilizado tanto para reprojeter os dados obtidos para uma projeção mais usual que a Integerized Sinusoidal (Albers Equal Area, Geográfica, Lambert Azimutal, Lambert Conforme Cônica, Mercator, Transverse Mercator, Universal Transverse Mercator, etc), quanto para formatos mais comumente encontrados nos SIGs que o HDF, como Geotiff e formatos binários. É possível também fazer a reamostragem dos dados para outras resoluções espaciais, através dos interpoladores vizinho mais próximo ou convolução cúbica.

Outras informações sobre este programa podem ser obtidas através do Guia do Usuário no seguinte endereço na internet:

<http://lpdaac2.usgs.gov/landdaac/tools/modis/info/MRT_Users_Manual.pdf>.

Nesta dissertação, utilizou-se como parâmetros de saída no programa MRT a projeção geográfica, que após vários testes foi a que apresentou maior coerência entre os dados vetoriais fornecidos pelo IBGE, presentes no aplicativo SPRING (como limites de Estados e municípios, hidrografia, etc.). Para o teste das projeções de saída utilizadas, utilizou-se: (a) Lambert Conforme Cônica, que apresentou pequenas distorções em relação aos vetores de limites dos Estados do IBGE; (b) Geográfica, com a qual se obteve o perfeito encaixe com os vetores do IBGE importados para o programa

SPRING e c) UTM, que apresentou distorções da imagem no sul do Estado. É pertinente ressaltar que esta projeção foi testada com sucesso para uma parte da cena, no entanto, como o Estado do Mato Grosso está localizado entre três diferentes fusos (Figura 4.3), isto levou a uma leve distorção na imagem. Esta projeção pode ser utilizada com sucesso caso a área de estudo esteja localizada somente dentro de um fuso.

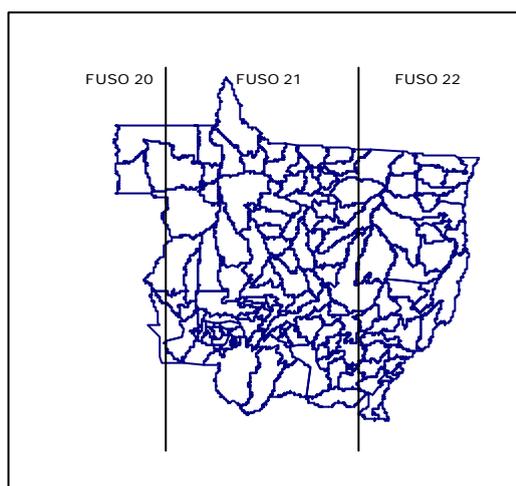


FIGURA 4.3 - Fusos da projeção UTM para o Estado do Mato Grosso. Esta projeção não foi utilizada devido aos três fusos que cortam a região, gerando uma distorção geométrica nos dados.

O formato de saída para as imagens utilizadas foi Geotiff, que pode ser importado diretamente para o SPRING.

O programa ConvGeotiff (Arai, 2003) foi desenvolvido no INPE com a finalidade de converter os dados MODIS disponíveis em 16 bits para 8 bits, de forma que possam ser processados pelo software SPRING 3.6.03. Este programa restaura o valor de reflectância de cada pixel através da equação:

$$\text{Pixel} = \text{pixel} / 10.000 \quad (4.1)$$

e converte a reflectância para números digitais (ND), utilizando o intervalo -0,01 a 1,0.

Os valores de reflectância deveriam variar de 0,0 a 1,0, porém, no modelo de correção atmosférica utilizado nos produtos MODIS, os intervalos de reflectância se encontram

no intervalo (-0,01 a 1,0). Para o NDVI e EVI são utilizados os intervalos de -1,0 a 1,0, onde também é restaurado o valor real do pixel utilizando a mesma equação (equação 4.1).

Recuperando-se os valores reais de cada pixel reduz-se a perda de informação, sendo utilizada na conversão o intervalo de -0,01 a 1,0 e não o intervalo de -100 a 10000. Com a utilização deste programa tem-se o controle desta conversão. O uso de aplicativos para conversões convencionais tende a normalizar os dados, utilizando o menor e o maior valor possível armazenado em um inteiro de 16 bits com sinal (-32.768 a +32.768) ocorrendo perda de informação, o que dificulta a padronização da conversão para diferentes imagens/datas (Arai, 2002).

Na Figura 4.4 são apresentados três histogramas da distribuição dos valores de reflectância da imagem com diferentes parâmetros para a avaliação do valor a ser utilizado para converter as imagens. A Figura 4.4a mostra o histograma para a banda do vermelho de uma cena convertida utilizando o intervalo 0,0 a 1,0, sem levar em consideração os valores da correção atmosférica, onde observa-se um elevado número de pixels com valores ND igual a zero. Na Figura 4.4b mostra-se o histograma da mesma imagem convertida utilizando o intervalo -0,01 a 1,0, baseado nos dados de correção atmosférica (*Atmospheric correction algorithm: spectral reflectance* (MOD09), 1999). No item (c) da Figura 4.4 é mostrado o histograma da mesma imagem com intervalo de -0,2 a 1,0, confirmando que o número de pixels com ND igual a zero é o mesmo que o encontrado quando utiliza-se os dados da correção atmosférica (4.4b).

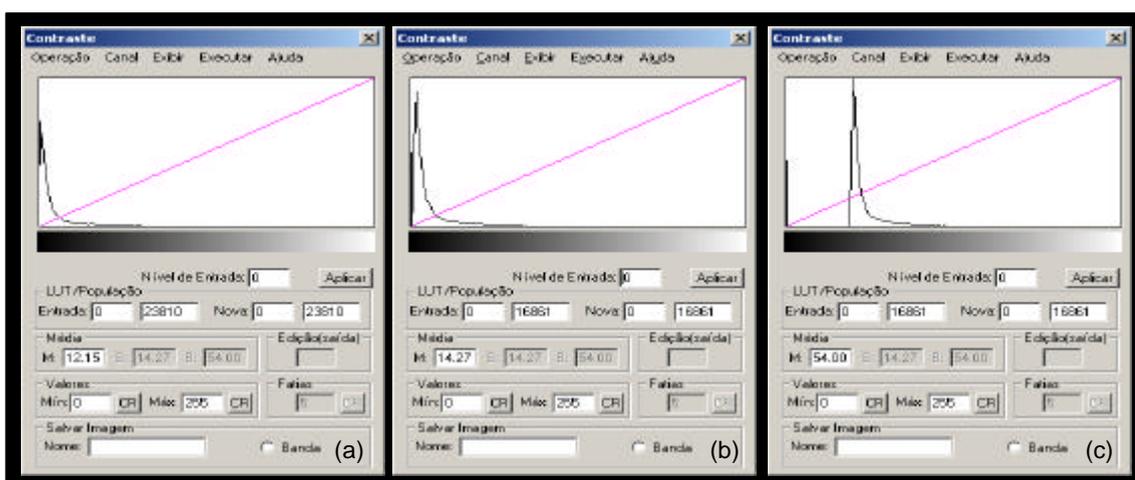


FIGURA 4.4 - Histograma de uma imagem reflectância do sensor MODIS, canal da região espectral do vermelho: (a) Conversão utilizando o intervalo 0,0 a 1,0; (b) mesma imagem convertida utilizando o intervalo $-0,01$ a 1,0, e (c) intervalo de $-0,2$ a 1,0.

As etapas acima descreveram os pré-processamentos necessários para a utilização dos dados provenientes do sensor MODIS no aplicativo SPRING. A alta qualidade dos produtos garante tanto um registro bastante satisfatório, quanto à correção atmosférica, baseada em dados coletados por outros sensores a bordo do mesmo satélite.

4.1.2 Confeção do Banco de Dados

O banco de dados geográficos do Estado do Mato Grosso foi elaborado de forma a armazenar os dados relevantes para a realização do trabalho proposto nesta pesquisa. Para isso, foi utilizado o aplicativo SPRING 3.6.03 (Câmara, 1996).

O banco de dados foi definido com os seguintes parâmetros técnicos:

- Sistema de projeção cartográfica: Foi selecionada a projeção Lambert por se tratar de uma área de estudo bastante extensa, com o intuito de evitar distorções nas imagens;
- Datum: WGS84;
- Retângulo envolvente da área de estudo: Longitude Oeste $64^{\circ} 00' 00''$ e $48^{\circ} 00' 00''$, Latitude Sul: $19^{\circ} 00' 00''$ e $6^{\circ} 00' 00''$;

- Origem: Latitude Norte 00° 00' e Longitude Oeste 53° 15' ; primeira latitude: Sul 3° 20', segunda latitude: Sul 16° 40'.

Após a definição destes parâmetros, foram importadas para o banco todas as imagens do produto MOD13 (imagens índice de vegetação e bandas originais) referentes ao ano de 2002. Além disso, foram importados os limites do Estado e dos municípios.

4.1.3 Elaboração dos Mosaicos

Após a aquisição de todas as imagens referentes ao ano de 2002, foram gerados mosaicos mensais, através da ferramenta de análise LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) disponível no SPRING. O programa foi escrito de forma a selecionar os pixels, com base no valor mais alto do NDVI entre as datas, para a eliminação de nuvens (APÊNDICE A). Foram gerados também dois mosaicos semestrais: um referente à estação seca, outro à estação chuvosa, que mostrou a grande variabilidade na fenologia das formações vegetais no Estado do Mato Grosso (Figura 4.5).

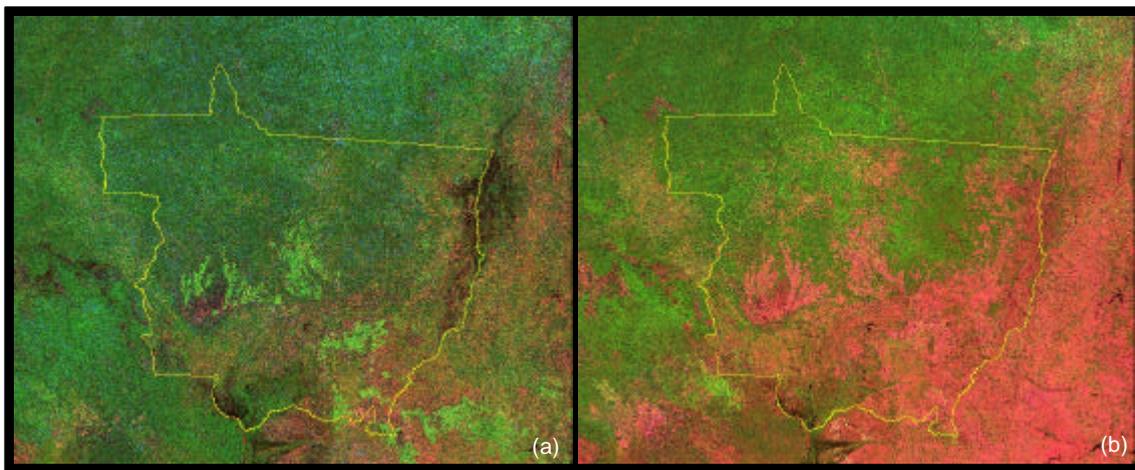


FIGURA 4.5 - Mosaicos gerados para a área de estudo: (a) estação chuvosa que compreende os meses de janeiro a abril, novembro e dezembro; e (b) estação seca, que compreende os meses de maio a outubro.

Esta etapa teve como objetivo reduzir o número de dados utilizados e tamanho do banco, com a finalidade de agilizar o tempo de processamento, já que cada cena do produto MOD13 tem um tamanho de 500Mb.

4.1.4 Geração das Imagens Fração

A partir dos mosaicos mensais, foi aplicado o modelo de mistura espectral para toda a série temporal, nas bandas do produto MOD13: azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Os modelos foram gerados independentemente, e partiu-se da hipótese que é possível encontrar um pixel puro ou endmember nas imagens MODIS, dada a diversidade e características da área estudada, para ser utilizado como dado de entrada para o modelo.

Para a etapa seguinte, partiu-se da hipótese que durante o período de seca ou de chuva analisado, os valores de reflectância encontrados para um pixel puro é o mesmo em todas as datas, e conseqüentemente, as mudanças ocorridas na resposta da vegetação são devido à influência da sazonalidade (Carreiras et al., 2003). Assim, gerou-se um modelo “único” para a estação de chuvas, com base nos modelos de mistura espectral dos meses de janeiro-abril e novembro-dezembro, e outro modelo de mistura espectral “único” para a estação seca (maio a outubro).

Portanto, a geração das imagens fração foi realizada em duas etapas. A primeira constituiu-se da aplicação do modelo de mistura para cada um dos mosaicos mensais. Desta forma, baseando-se nas curvas espectrais obtidas em cada uma das imagens, selecionou-se a curva correspondente a cada uma das componentes que melhor representavam os valores esperados para os alvos analisados: sombra, solo e vegetação (Figura 4.6).

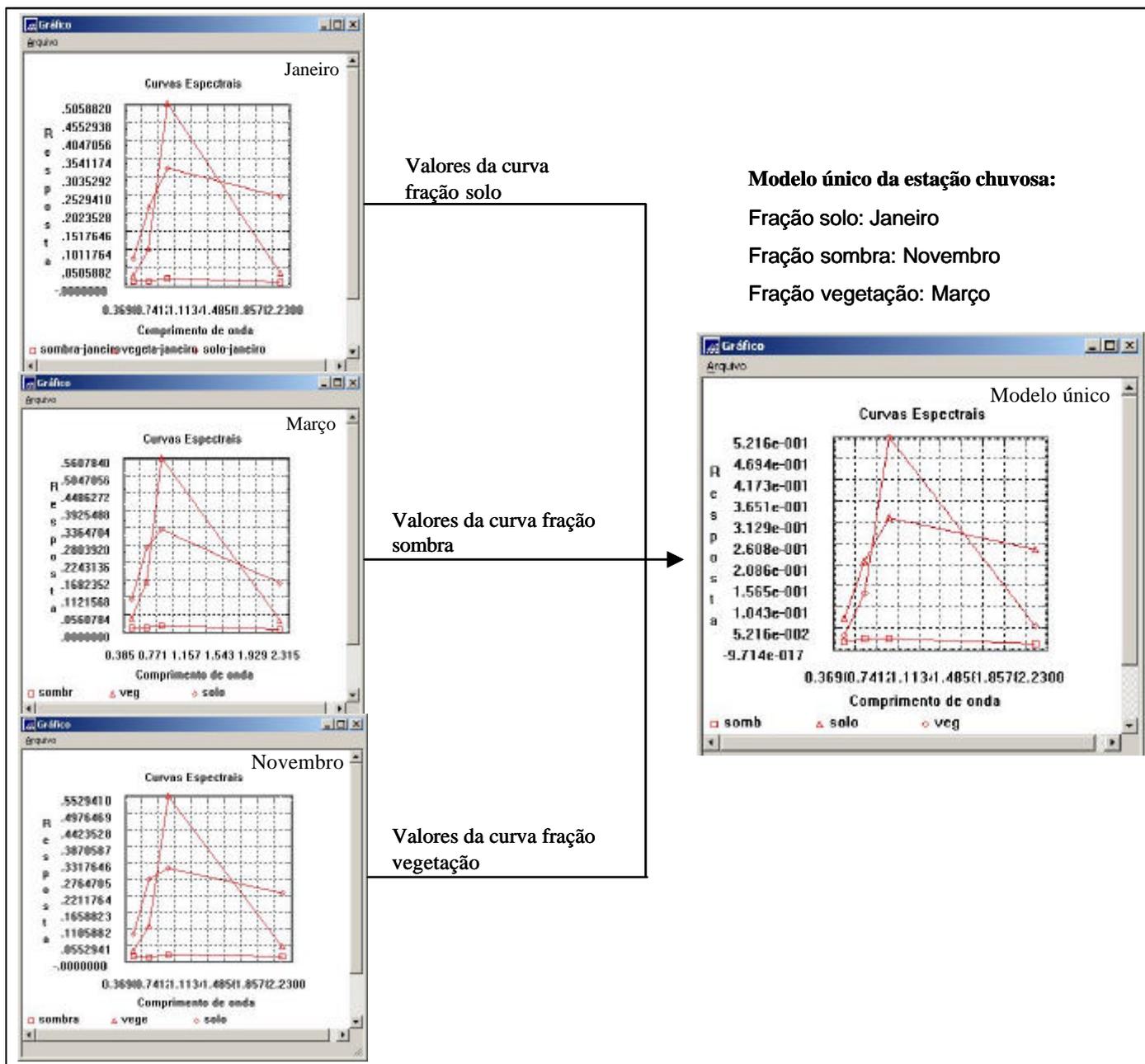


FIGURA 4.6 - Curvas espectrais dos modelos de mistura gerados independentemente (composições mensais), e o resultado para o modelo “único” da estação chuvosa.

A segunda etapa foi à aplicação destes dois novos modelos de mistura espectral nas imagens correspondentes a cada um dos períodos analisados (estação seca e estação chuvosa). O resultado final pode ser observado na Figura 4.7:

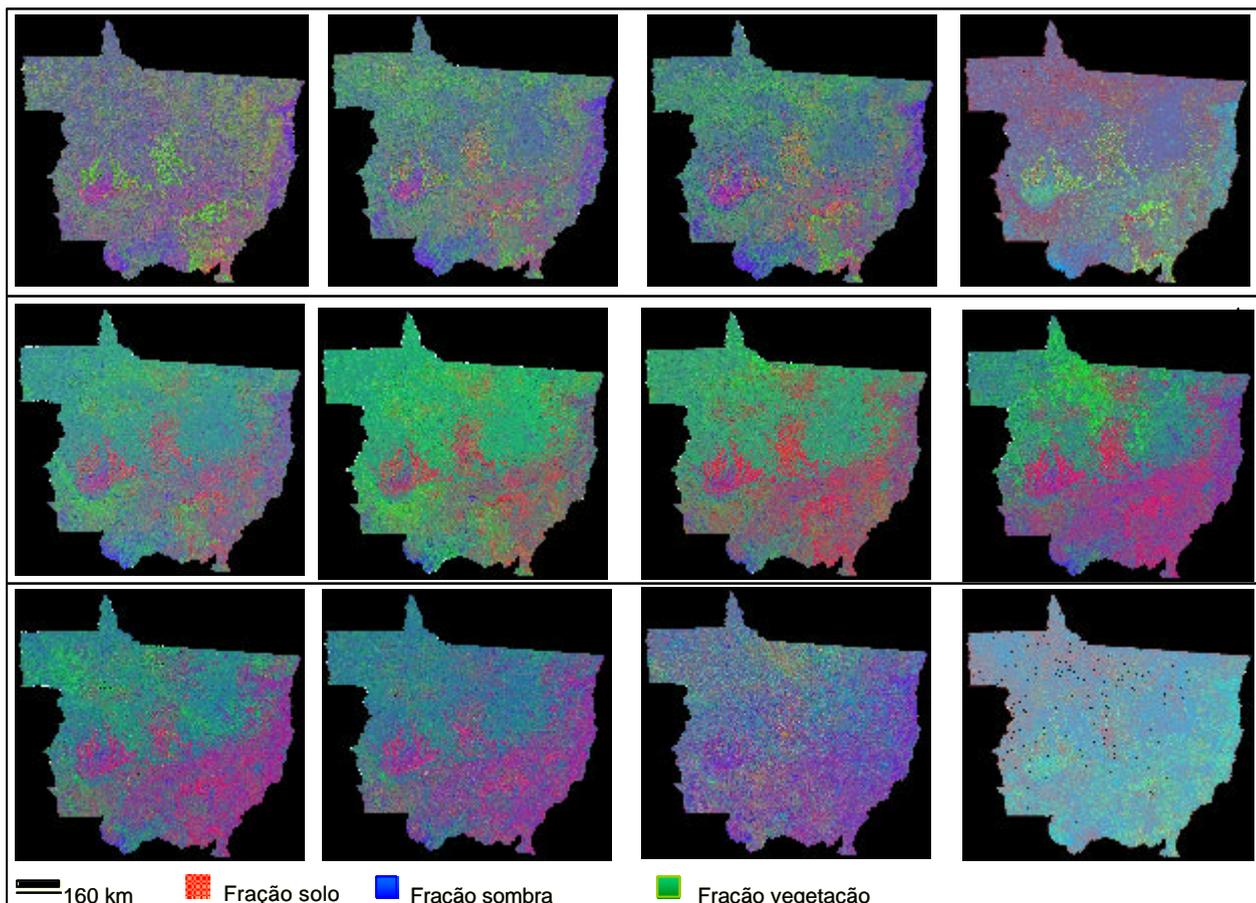


FIGURA 4.7 - Composição RGB das imagens fração solo, vegetação e sombra respectivamente, geradas a partir do modelo único para estação chuvosa (janeiro a abril, novembro e dezembro) e do modelo único para estação seca (maio a outubro).

Na Figura 4.7 observou-se que a medida em que a estação seca se aproxima, aumenta a proporção da fração solo (em vermelho), e pode ser mais bem visualizada nas áreas de cerrado, mais sensíveis à disponibilidade de água (porção sudeste das composições coloridas). A vegetação presente na região norte do Estado (porção superior das imagens) também apresenta uma mudança durante as duas estações, e pode ser visualizada com a diminuição da proporção de sombra (em azul) na época seca. O mosaico referente ao mês de dezembro apresenta-se bastante diferenciado, e isto ocorreu provavelmente devido à alta taxa de cobertura de nuvens encontradas durante todo este mês nesta região.

4.1.5 Seleção das Imagens MODIS para a Classificação

Com o objetivo de selecionar as datas das imagens que seriam utilizadas para a classificação das formações vegetais no Estado do Mato Grosso, os mosaicos NDVI e EVI da série temporal para o ano de 2002 foram organizados em 2 arquivos *.pix para serem processadas no software PCI (ESA, 1994). Desta forma, na imagem NDVI.pix, cada canal correspondeu ao mosaico de 1 mês, assim como para a imagem EVI. Este programa foi utilizado com o objetivo de realizar duas etapas:

- 1) Gerar as assinaturas dos alvos para os dois índices de vegetação: com base no mapa digital de vegetação para o Estado do Mato Grosso fornecido pela FEMA/PRODEAGRO, selecionou-se cerca de 25 amostras para cada um dos tipos de formações vegetais em composições coloridas de imagem NDVI sobre áreas homogêneas.
- 2) Gerar a seleção de canais para a classificação: a partir das assinaturas geradas, foi utilizado o módulo de seleção de canais para a classificação das imagens. Este módulo analisa a média e desvio padrão para cada um dos canais e gera a matriz de correlação, matriz de covariância, matriz de covariância inversa e matriz de covariância inversa triangular. O resultado final é disponibilizado conforme o número de canais que o usuário pretende utilizar para realizar a classificação. Os resultados obtidos para as imagens NDVI e EVI são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Seleção das Melhores Datas para Realizar a Classificação, Segundo o Número de Imagens Definidas a Serem Utilizadas, a Partir dos Dados NDVI e EVI. Em Vermelho Destacam-se as Datas Diferentes para os Dois Dados.

Número de imagens utilizadas	Meses selecionados	
	NDVI	EVI
1	8	8
2	8,9	7,8
3	7,8,9	7,8,9
4	7,8,9,11	4,7,8,9
5	6-9,11	4,6-9
6	4,6-9,11	4,6-9,11
7	4-9,11	4,6-11

Continua

TABELA 4.1 - Conclusão

8	4-11	2,4,6-11
9	3-11	2,4,5-11
10	3-12	1,2,4-11
11	1,3-12	1,2-12

Na Tabela 4.1, observou-se que existe uma concordância entre os resultados para o NDVI e EVI. Por exemplo, quando se selecionou apenas uma data para a realização da classificação, ambos os dados apontam para o mosaico do mês de agosto (mês 8), assim como quando selecionaram-se três datas, os meses indicados foram os mesmos. Para as outras possibilidades quanto ao número de canais selecionados, ocorreu apenas uma diferença entre uma ou duas datas para os mosaicos mensais.

Nesta pesquisa optou-se pela utilização de 4 datas no processo de classificação, (utilizando-se as imagens índice de vegetação - para a etapa de segmentação, e imagens fração e imagens índice de vegetação para a etapa de classificação das imagens) principalmente devido à limitações computacionais. Com o objetivo de definir entre a utilização do NDVI ou EVI para o processo de classificação, aplicou-se o teste Tukey. Para isso assumiu-se que a distribuição das amostras é normal e a variância entre elas é homogênea. Neste teste, a média das quatro datas dos valores mensais de NDVI e EVI, de cada tipo de vegetação, segundo a classificação da FEMA/PRODEAGRO, foram comparadas. A partir dos resultados desta comparação múltipla, obtidos para o NDVI e EVI, verificou-se que o NDVI possibilitou a separação entre um maior número de formações vegetais (Tabela 4.2). Das 45 combinações possíveis das classes duas a duas, verificou-se que em 18 situações, o EVI mostrou diferença significativa ($p < 0,05$) entre as classes combinadas. Já o NDVI indicou que 29 combinações entre as classes possuíam uma diferença significativa ($p < 0,05$). Os resultados deste teste mostraram que o NDVI seria o melhor índice a ser utilizado.

TABELA 4.2 – Resultados da Aplicação do Teste Tukey, para o NDVI e EVI, a Partir das Médias de Cada uma das Classes em que foi Baseada a Análise, para a Seleção de 4 Datas. Os Números de 1 a 10 Indicam Cada uma das Classes na Seguinte Ordem: (1) Floresta Ombrófila Aberta; (2) Contato Savana Arborizada-Floresta Ombrófila; (3) Contato Floresta Ombrófila Aberta-Floresta Estacional; (4) Floresta Ombrófila Densa; (5) Formações Pioneiras; (6) Savana Arborizada; (7) Savana Parque; (8) Savana Florestada; (9) Contato Savana Parque-Savana Estépica; E (10) Floresta Estacional.

(* Indica Diferença Significativa).

EVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,77	0,78	0,77	0,78	0,74	0,68	0,69	0,69	0,66	0,74
2	1									
3	1	0,99								
4	0,99	0,99	0,99							
5	0,69	0,63	0,78	0,45						
6	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,14					
7	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,18	1				
8	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,34	0,99	0,99			
9	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,01*	0,98	0,96	0,84		
10	0,58	0,5	0,66	0,33	1	0,2	0,26	0,45	0,01*	
NDVI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	241,11	240,5	240,69	240,76	236,13	213,03	215,5	213,89	212,35	223,33
2	0,99									
3	1	1								
4	1	1	1							
5	0,48	0,65	0,6	0,58						
6	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*					
7	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,97				
8	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,99	0,99			
9	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,99	0,91	0,99		
10	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*

Portanto, para o processo de classificação da cobertura vegetal do Mato Grosso, utilizou-se como base as imagens NDVI e imagens fração, dos meses de julho, agosto, setembro e novembro.

4.1.6 Segmentação e Extração de Regiões

Os processos de segmentação e extração de regiões são propostos para a fase anterior à classificação. Esta metodologia supera as limitações da análise pontual baseada unicamente em atributos espectrais apresentada na classificação estatística convencional, utilizada em análises de imagens digitais.

Neste processo são extraídos os objetos relevantes, com base na técnica de crescimento de regiões, através do particionamento das imagens em regiões homogêneas de atributos comuns, como média do nível de cinza, forma e textura (Corr et al., 1989). Entende-se por regiões, um conjunto de pixels contíguos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uma uniformidade.

As etapas de segmentação e extração de regiões de uma imagem podem ser sumarizadas da seguinte forma: (a) segmentação da imagem em regiões, que podem ser apenas um pixel ou um agrupamento de pixels; (b) comparação de cada segmento com seus vizinhos, e reunindo os grupos que são estatisticamente mais similares em relação às médias dos valores de níveis de cinza; (c) crescimento destes grupos de segmentos em relação aos novos vizinhos, até que nenhum segmento a mais seja agrupado, de modo que se forma uma região que será então rotulada; (d) análise dos outros segmentos ainda não rotulados, repetindo a seqüência inteira até que todas as regiões tenham se formado (Almeida-Filho e Shimabukuro, 2002).

Para realizar a segmentação são definidos dois limiares: (a) limiar de similaridade – distância Euclidiana entre a média do número digital de duas regiões, abaixo do qual estas são agrupadas; e (b) limiar de área – área mínima a ser considerada como uma região, baseado no número de pixels. Os limiares utilizados neste processo foram 15 para similaridade e 10 para área (Figura 4.8). A opção por estes limiares foi definida segundo a limitação computacional, dado o número de imagens utilizadas e o tamanho da área de estudo.

As imagens NDVI dos meses de julho, agosto, setembro e novembro foram utilizadas como dados de entrada na etapa de segmentação (Figura 4.8). Para a fase de extração de regiões, além das imagens NDVI, foram utilizadas também as imagens fração solo, sombra e vegetação, referentes aos quatro meses selecionados. Desta forma garantiu-se que as informações presentes em todas as bandas espectrais fossem levadas em consideração para a delimitação estatística das regiões com diferentes coberturas da terra: nas imagens NDVI as respostas das bandas do vermelho e infravermelho próximo;

e nas imagens fração as respostas das bandas azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio.

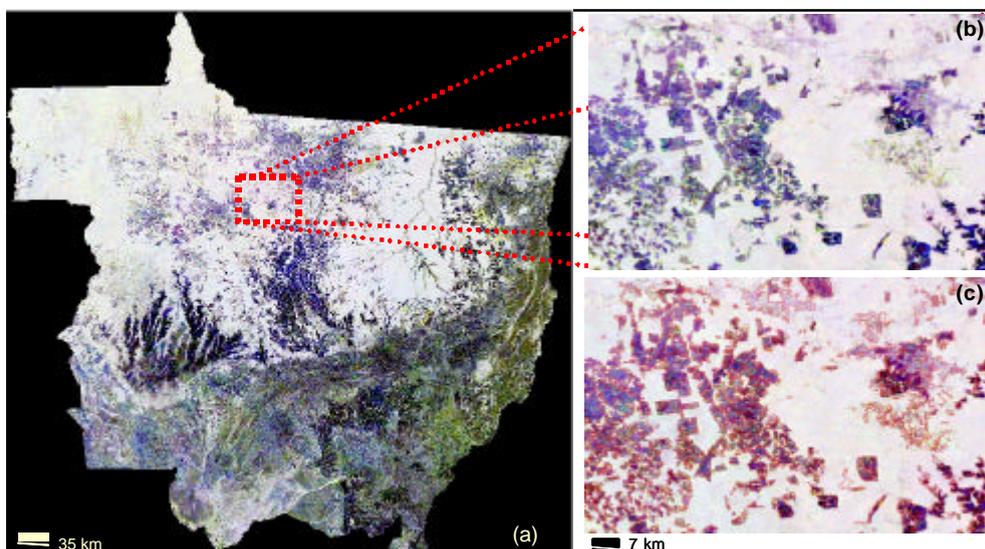


FIGURA 4.8 - Processo de segmentação para a área de estudo. Em (a) composição RGB das imagens NDVI, dos meses de julho, agosto e setembro, respectivamente; (b) detalhe de uma área no centro da região; e (c) sua segmentação (linhas em vermelho).

4.1.7 Classificação das Imagens

Para o processo de classificação não supervisionada das imagens, levantou-se dois questionamentos: com base nos classificadores por regiões, é necessária a utilização de um conjunto de imagens para gerar uma classificação capaz de distinguir as classes de interesse? A utilização de apenas uma cena com diferentes limiares seria capaz de gerar o resultado desejado?

Objetivando-se adquirir imagens classificadas que separassem as diferentes formações vegetais presentes no Estado do Mato Grosso, testou-se diferentes classificadores com diferentes limiares.

Foram geradas 13 imagens classificadas, a partir de classificadores não supervisionados, disponíveis na versão 4.1Beta do SPRING. Além da imagem classificada segundo os parâmetros descritos nos itens 4.2.5 e 4.2.6, testou-se também a utilização de um menor

número de imagens para a classificação, e a utilização de apenas a imagem NDVI e a imagem fração solo, para o mês de agosto.

Realizou-se a classificação das imagens com dois tipos de classificadores distintos:

Classificadores pixel a pixel e classificadores por regiões, com o objetivo de observar a separabilidade das formações vegetais que se pretendeu classificar. O classificador pixel a pixel utilizado foi o k-média, enquanto que os classificadores por regiões foram Isoseg e Histograma.

Para as imagens classificadas utilizando-se o Isoseg e Histograma, foram estabelecidos os seguintes parâmetros:

- a) Isoseg: 4 datas, imagens NDVI e imagens fração solo, sombra e vegetação; limiar 90 e 95% (os limiares definem uma distância de Mahalanobis, de forma que todas regiões pertencentes a uma dada classe serão distantes da classe por uma distância inferior a esta. Quanto maior o limiar, maior esta distância e conseqüentemente menor será o número de classes detectadas pelo algoritmo);
- b) Isoseg: 4 datas, imagens fração solo; limiares 90 e 95%;
- c) Isoseg: 1 data (mês de agosto), imagem NDVI e imagem fração solo;
- d) Isoseg: 1 data (mês agosto), imagem NDVI;
- e) Isoseg: 1 data (mês de agosto), imagem fração solo; limiares 95%;
- f) Histograma: 4 datas, imagem fração solo; 50 temas e 20 iterações;
- g) Histograma: 1 data (mês de agosto), imagem fração solo; 20 temas e 10 iterações;
- h) Histograma: 1 data (mês de agosto), imagem fração solo; 5 temas e 10 iterações;

- i) Histograma: 1 data (mês de agosto), imagem fração solo; 6 temas e 10 iterações;

Para as imagens classificadas utilizando-se o K-média, foram estabelecidos os seguintes parâmetros:

- a) 40 temas e 10 iterações para as 4 datas;
- b) 15 Temas e 10 iterações, para as imagens fração das 4 datas;
- c) 25 temas, 10 iterações, para imagens fração referente ao mês de agosto;
- d) 10 temas e 10 iterações para imagem fração solo do mês de agosto;

4.2 Geração do Mapa de Vegetação

Para a geração do mapa de vegetação foi realizada a avaliação das classes de vegetação em cada uma das imagens classificadas. Esta avaliação foi baseada em dois tipos de dados distintos: nos dois mosaicos gerados para a estação seca e estação chuvosa, e no mapa de vegetação disponibilizado pela FEMA/Prodeagro. As melhores classificações geradas para cada uma das classes foram mapeadas independentemente, e mosaicadas para diferentes planos de informação. A etapa seguinte foi a edição destas classes para garantir uma melhor qualidade e extrair erros dos classificadores. Um exemplo da metodologia utilizada para o mapeamento das diferentes classes pode ser observado na Figura 4.9, onde se mostra o processo de mapeamento do tipo vegetacional Savana Parque, localizada na região leste do Estado do Mato Grosso.

As etapas descritas na Figura 4.10 foram repetidas para todas as classes que foram possíveis detectar, além do mapeamento das áreas antropizadas, e a separação das áreas de cultura de soja desta classe. As imagens classificadas que deram origem a cada um dos temas estão listadas abaixo:

- Histograma, 6 classes: Savana Gramíneo-lenhosa e Savana Arborizada Aberta na região central do Estado;

- Isoseg 95%, imagens fração do mês de agosto: Soja e Contato entre Floresta Ombrófila Aberta e Savanas;
- K-média 10 temas, 10 iterações: Formações Pioneiras;
- Isoseg 90% imagens fração das 4 datas: Floresta Ombrófila Aberta;
- Histograma, 20 classes: Savana Parque na região leste e sul do Estado;

Para o mapeamento das áreas antropizadas, foi gerada uma máscara para a região Centro-norte do Estado, contendo apenas a classe áreas antropizadas. Esta máscara foi mosaicada para o plano de informação onde já estavam as demais classes de forma que ocupou apenas as áreas que ainda permaneciam não classificadas, sobre as áreas de floresta. Adotou-se este método porque a classificação apresentou-se muito heterogênea nas áreas de ocupação, o que tornaria o processo de edição extremamente lento.

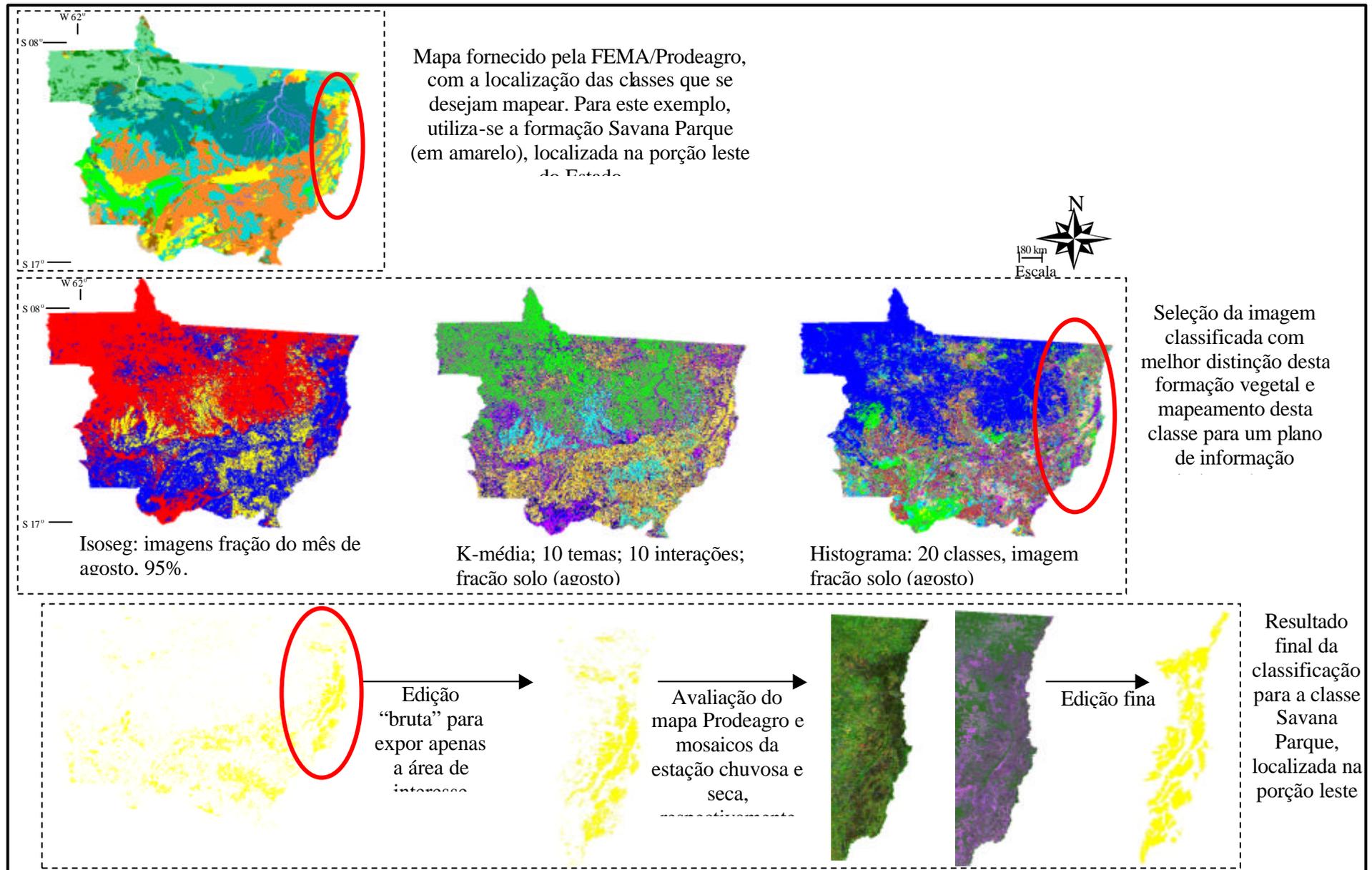


FIGURA 4.9 – Esquema da metodologia de mapeamento das classes temáticas. Nesta Figura, exemplifica-se as etapas seguidas para o mapeamento da formação Savana Parque, localizada na porção leste do Estado.

Após a edição de todas as classes temáticas, foi realizado um mosaico com todos os temas classificados para um mesmo plano de informação, constituindo-se assim o mapa preliminar da cobertura da terra para o Estado do Mato Grosso.

Com o objetivo de avaliar a classificação de áreas em que houve dúvidas entre áreas de contato, savanas e áreas antropizadas, utilizou-se o mosaico dos dados PRODES de 2002 (Figura 4.10a). Foi realizada uma mosaicagem das áreas desmatadas para o mapa de vegetação gerado a partir das imagens MODIS (Figura 4.10b) e outra mosaicagem da máscara de não florestas para o mapa da cobertura gerado (Figura 4.10c). Estes dados foram comparados com as áreas mapeadas como antropizadas (ou desflorestamentos).

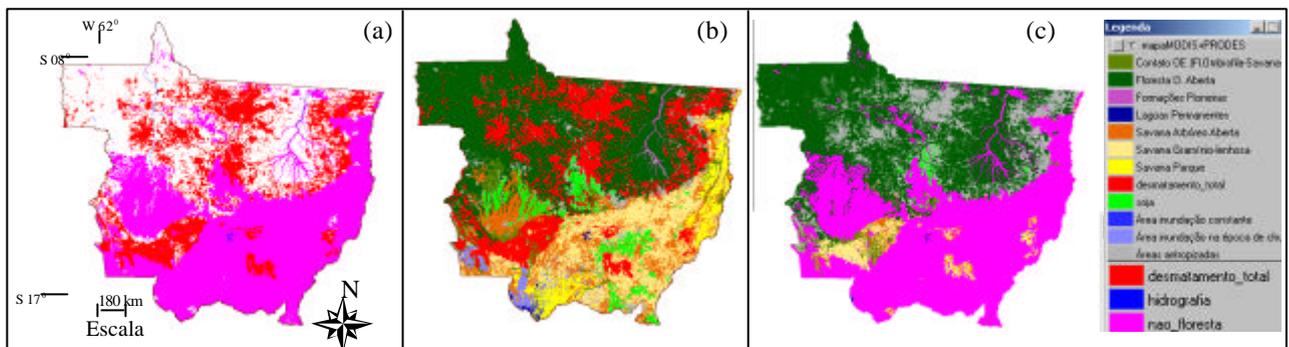


FIGURA 4.10 – Em (a) mapa do PRODES para a área de estudo, mostrando as áreas desmatadas em vermelho, floresta em branco e não floresta em rosa. Em (b) observa-se as áreas desmatadas detectadas pelo PRODES em vermelho, e as demais classes de cobertura da terra mapeadas; em (c) observa-se a máscara de não-floresta provinda dos dados PRODES e as demais classes de cobertura da terra.

Foram gerados mais dois mapas temáticos para a área de estudo, um com a precipitação acumulada para o ano de 2002, e outro com dados de altimetria, objetivando-se caracterizar de forma mais ampla as formações vegetais mapeadas.

Para a geração do mapa de precipitação acumulada, utilizaram-se os dados referentes ao ano de 2002 fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o Estado do Mato Grosso. Estes dados constituíam-se de uma base de dados de 164 pontos de coleta, com medições diárias. A espacialização dos pontos de coleta pode ser observada na Figura 4.11a.

A partir dos dados diários, gerou-se o total mensal, e estes dados foram importados para o aplicativo SPRING. Com estes dados pontuais mensais, geraram-se grades regulares, que são um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares, utilizando-se do interpolador Média Ponderada por Quadrante, já que as amostras foram do tipo ponto. Utilizando-se da programação em LEGAL, gerou-se um mapa da precipitação acumulada para o ano de 2002 (Figura 4.11b) (APÊNDICE A).

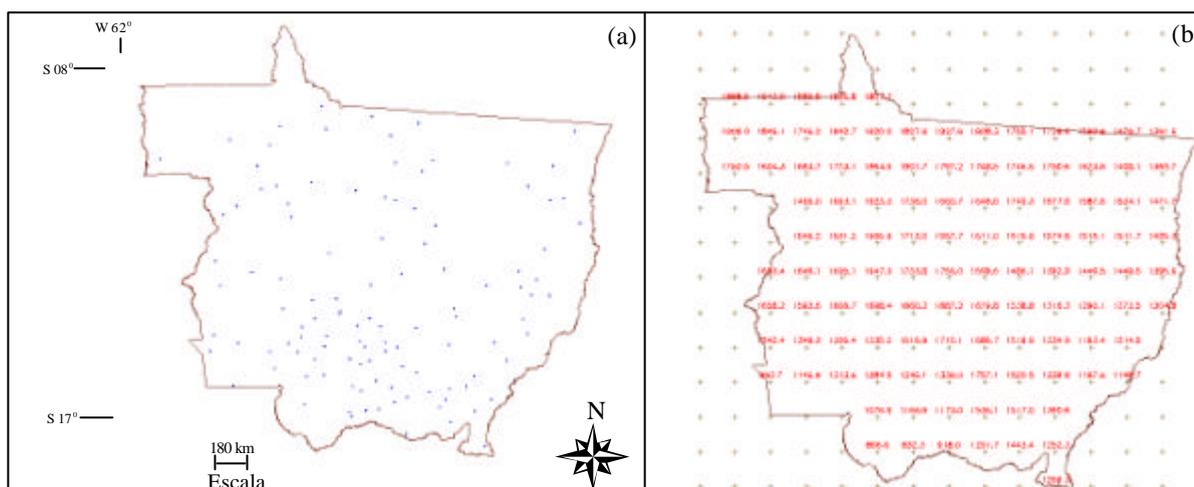


FIGURA 4.11 – Em (a) observa-se a distribuição dos pontos de coleta de dados de precipitação no Estado do Mato Grosso; em (b) observa-se a grade final de precipitação acumulada gerada a partir da interpolação das amostras, e somando-se as grades referentes a todos os meses do ano de 2002.

Nesta grade de precipitação acumulada, realizaram-se dois fatiamentos, um com três classes e outro com 5 classes, com o intuito de separar regiões com as mesmas características pluviométricas. Os mapas gerados podem ser observados na Figura 4.12.

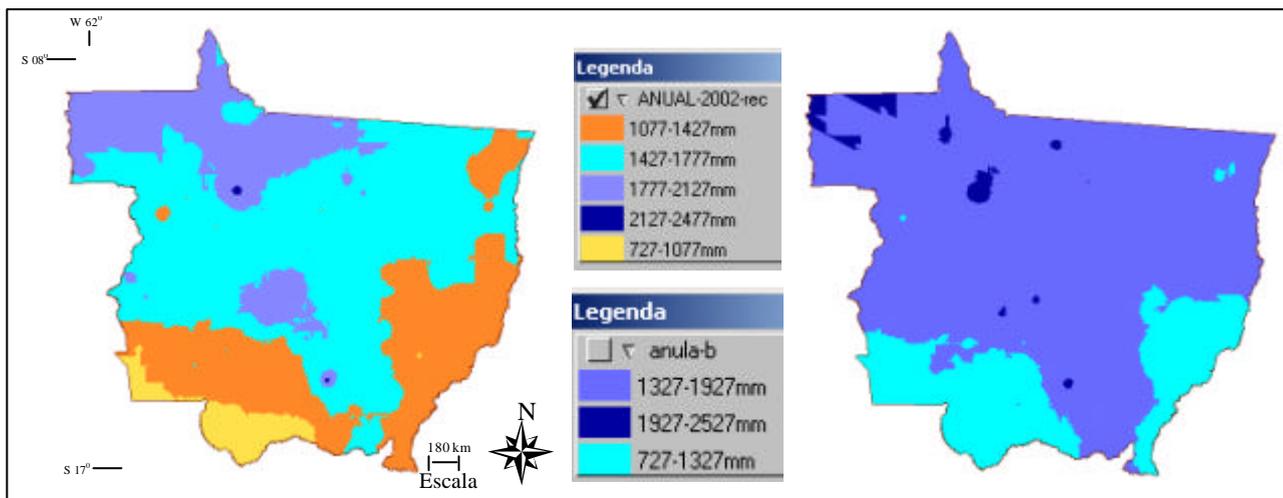


FIGURA 4.12 – Mapa de precipitação acumulada para o ano de 2002, para a área de estudo. Em (a) observa-se o mapa gerado com cinco classes, e em (b) o mapa gerado com três classes.

O mapa de altimetria gerado utilizou baseou-se nos dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), que possui uma resolução de 90 metros. Estes dados estão disponíveis na internet e podem ser adquiridos sem custos, através do endereço: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. Primeiramente realizou-se um mosaico com as cenas da área de estudo, utilizando-se do programa Global Mapper, disponível no mesmo website. Após esta etapa, os dados foram importados para o aplicativo SPRING onde foi realizado o processo de fatiamento da imagem. Nesta etapa, a imagem foi fatiada em uma escala de 100 em 100 metros, e o resultado pode ser observado na Figura 4.13.

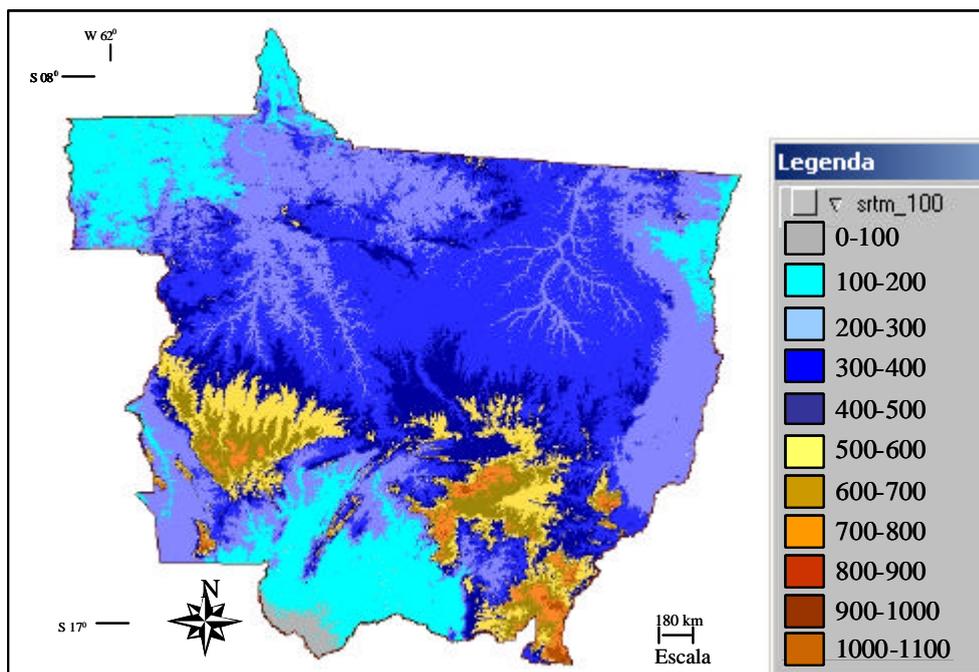


FIGURA 4.13 – Imagem de altimetria do Estado do Mato Grosso, gerada a partir de dados SRTM.

A partir destes mapas gerados, foi feita uma análise visual das relações existentes entre as formações vegetais, a ocupação da terra, a precipitação acumulada e o relevo no Estado do Mato Grosso.

Para a validação do mapa final da cobertura da terra gerado, realizou-se um trabalho de campo nos meses de junho/julho de 2003, onde foram coletados pontos de GPS para a caracterização de algumas fisionomias vegetais e de uso da terra. A região do Estado do Mato Grosso visitada pode ser observada na Figura 4.14.

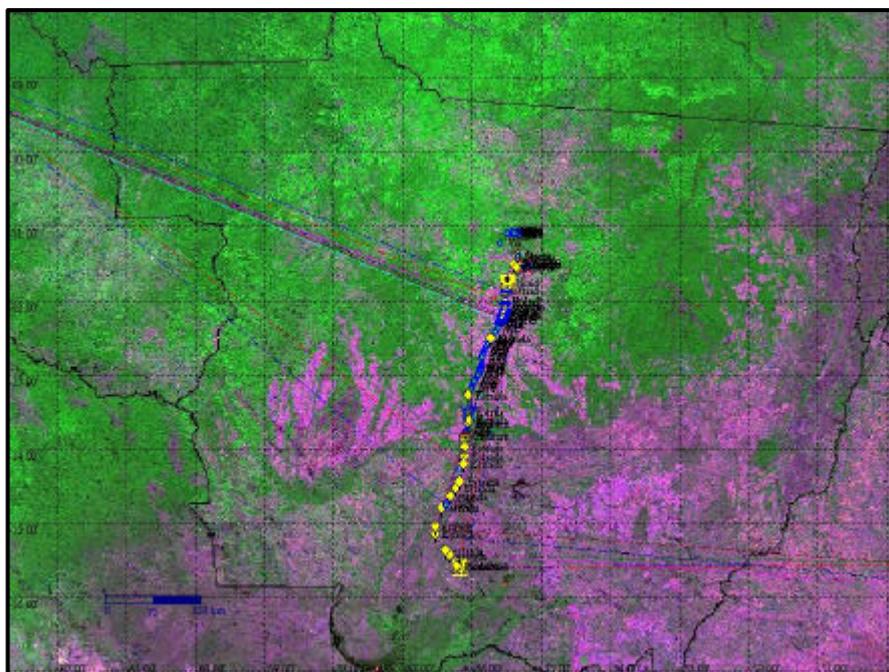


FIGURA 4.14 - Localização dos pontos visitados, coletados com GPS durante o trabalho de campo, em junho/julho de 2003.

O trajeto percorrido neste trabalho de campo proporcionou a possibilidade de se visitar áreas que possuíam manchas remanescentes de fisionomias de cerrado, áreas de cultura de soja, que, em sua maioria apresentavam solo exposto devido ao período seco, ou com culturas intermediárias ao cultivo da soja, como sorgo e milho, e áreas de floresta, tanto em regiões preservadas quanto em áreas sob processo de exploração madeireira. Algumas áreas em processo de desmatamento e áreas em preparação para a queimada também foram visitadas (Figura 4.15).

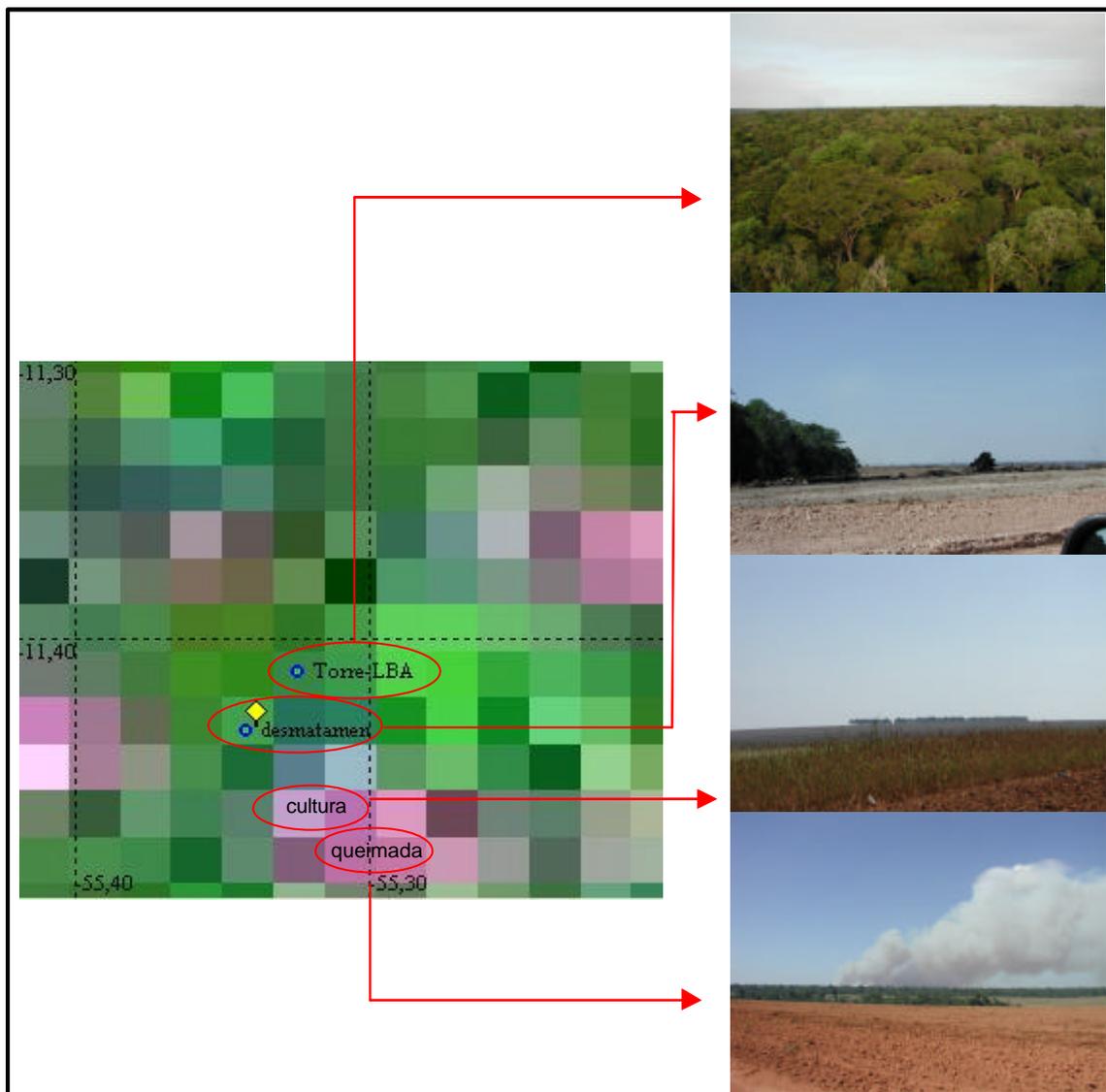


FIGURA 4.15 - Detalhe dos pontos visitados no trabalho de campo em junho/julho de 2003 coletados com GPS, em algumas das fisionomias mais comuns visitadas. A imagem é referente ao mesmo período no ano de 2002.

4.3 Análises da Fenologia com Base no Mapa de Cobertura da Terra Gerado

Esta etapa desta pesquisa baseou-se na hipótese de que a resposta fenológica da vegetação mapeada pode ser caracterizada com base na análise dos índices de vegetação do sensor MODIS (NDVI e EVI). O objetivo foi caracterizar o comportamento fenológico ao longo de um ano para cada uma das classes de cobertura vegetal mapeadas.

Esta análise utilizou a operação estatística de imagens por classe, disponível no programa SPRING. Os resultados desta análise são dispostos em tabelas no aplicativo Access, contendo diversos parâmetros estatísticos, dentre os quais utilizaram-se as médias mensais. Esta tabela do Access foi exportada para o aplicativo Excel onde foram gerados gráficos para caracterização das classes mapeadas, com base nos índices de vegetação.

Para a análise da correlação entre os índices de vegetação e a precipitação para o ano de 2002, trabalhou-se com amostras, com objetivo de se considerar a variabilidade existente dentro da mesma formação vegetal. De uma forma geral, estas amostras foram adquiridas da seguinte maneira: para cada uma das classes espacializadas em diferentes áreas do Estado, foram selecionadas de duas a quatro áreas, dependendo da extensão das mesmas, onde se adquiriram 5 amostras com 10 pixels cada (6,25 km²) (Figura 4.16). Estas amostras foram selecionadas com base no mapa de vegetação gerado e em composições RGB das bandas 1, 2 e 7 para os meses de junho e janeiro, de forma a selecionar áreas mais homogêneas possíveis.

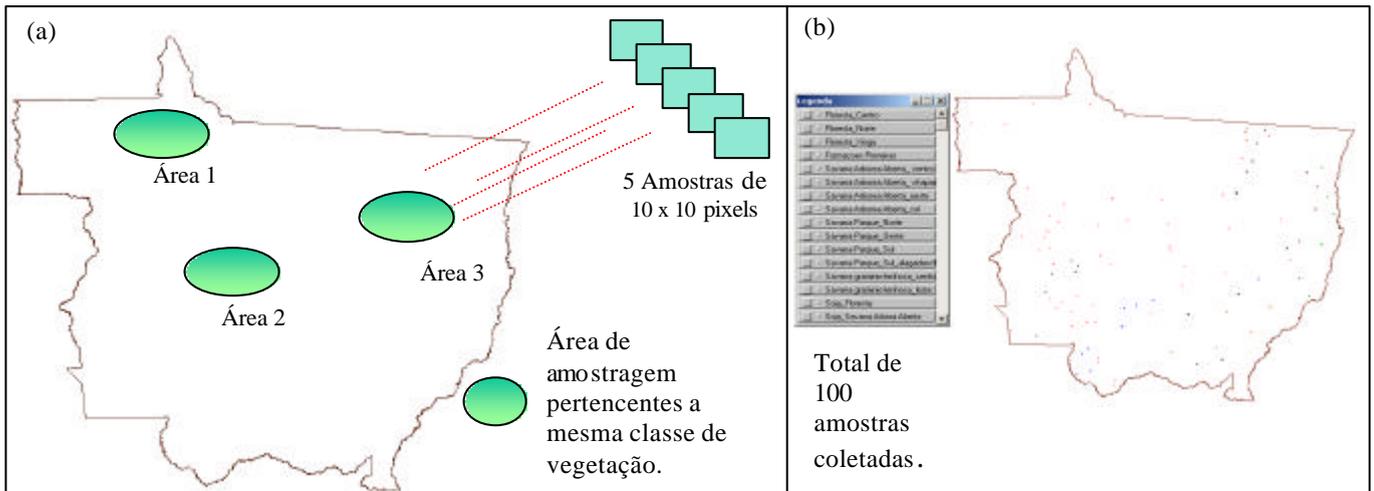


FIGURA 4.16 – (a) Esquema da amostragem dentro da mesma classe de vegetação com espacialização abrangente dentro do Estado; (b) apresenta-se o total de amostras adquiridas em todas as classes para a geração do coeficiente de correlação entre os Índices de Vegetação e precipitação.

Desta forma, em relação à variabilidade espacial do relevo e regime de chuvas da Floresta Ombrófila Aberta, adquiriu-se 15 amostras de 10 pixels x 10 pixels divididas em três áreas (5 por área), de forma que na Área 1, correspondeu as amostras tomadas na região Norte do Estado, Área 2, a amostras tomadas na região Central do Estado, e na Área 3, amostras coletadas na região da Reserva indígena do Xingu (Figura 4.17).

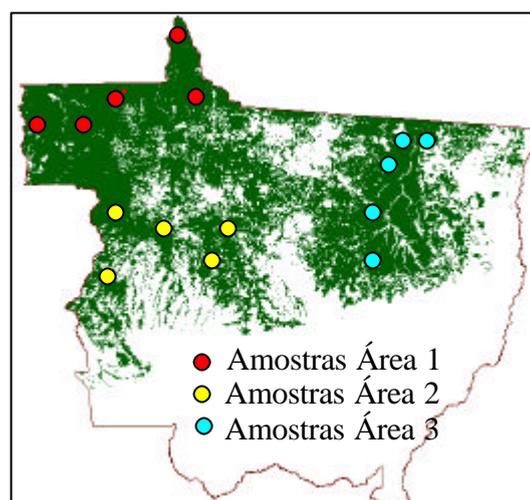


FIGURA 4.17 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Formação Floresta Ombrófila Aberta, agrupadas em três Áreas: Norte (pontos vermelhos), Centro (pontos amarelos) e Leste (pontos azuis) do Estado.

Estas áreas foram selecionadas com o objetivo de testar a consistência da classificação gerada, pois os mapas disponíveis (Rodriguez Yi, 2000; IBGE/IBAMA, 1993; Prodeagro) (Figura 4.18a, b e c, respectivamente) mostram a presença de duas formações distintas nesta região: Floresta Ombrófila Aberta e Floresta de Transição, o que não foi diferenciado no mapa final, com base nas imagens utilizadas nesta pesquisa.

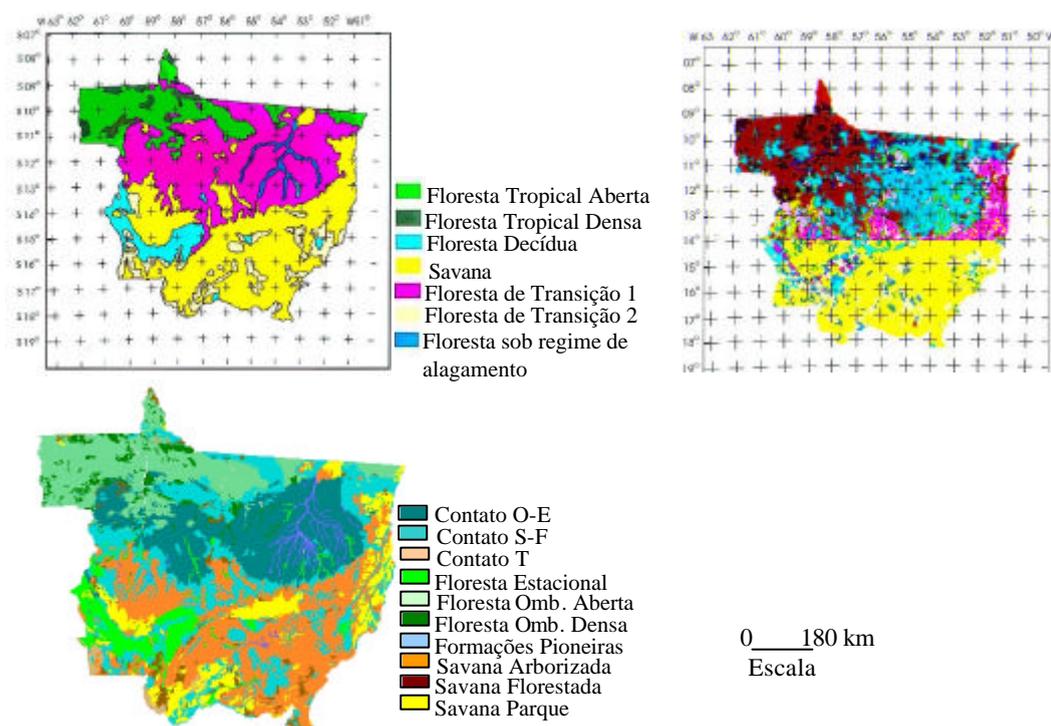


FIGURA 4.18 - Mapas de vegetação do Estado do Mato Grosso. Em (a) mapa de Vegetação gerado pelo IBAMA/IBGE (1993); (b) gerado a partir de dados NOAA-AVHRR, por Rodriguez Yi (2000); (c) gerado pela Prodeagro-MT.

Para a Formação Savana Gramíneo-lenhosa, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe, constaram de 5 amostras em duas áreas distintas: na região central do Estado e na região leste (Figura 4.19).

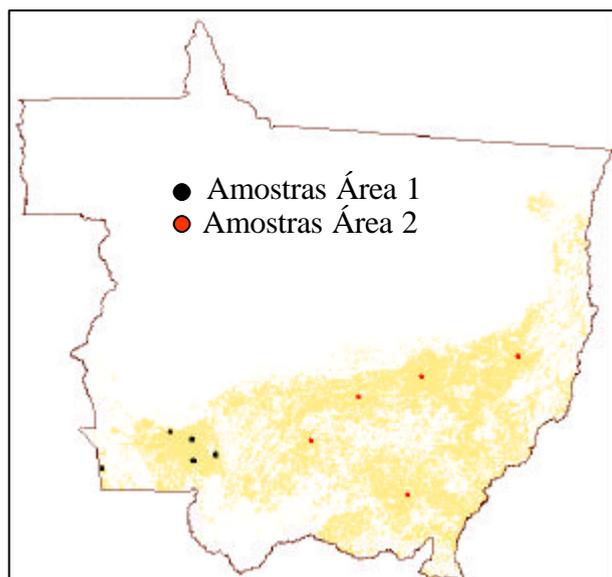


FIGURA 4.19 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Gramíneo-lenhosa, agrupadas em duas áreas: Centro (pontos pretos) e Leste do Estado (pontos vermelhos).

Para a Formação Savana Arbórea Aberta, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe, constaram de 5 amostras em três áreas distintas: na região central do Estado, sobre a região com altitude superior a 400 metros e na região sul (Figura 4.20).

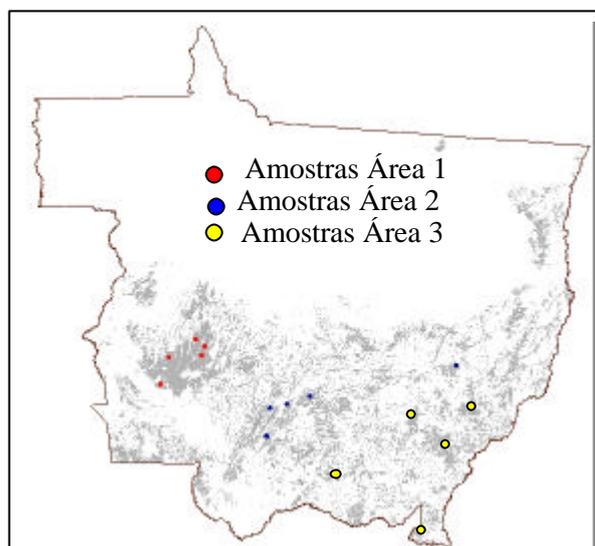


FIGURA 4.20 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Arbórea Aberta, agrupadas em três áreas: Centro (pontos vermelhos), chapada (pontos azuis) e sul do Estado (pontos amarelos).

Para a Formação Savana Parque, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe, constaram de 5 amostras em quatro áreas distintas: na região norte, oeste, sul e sobre áreas alagadas na região do pantanal (Figura 4.21).

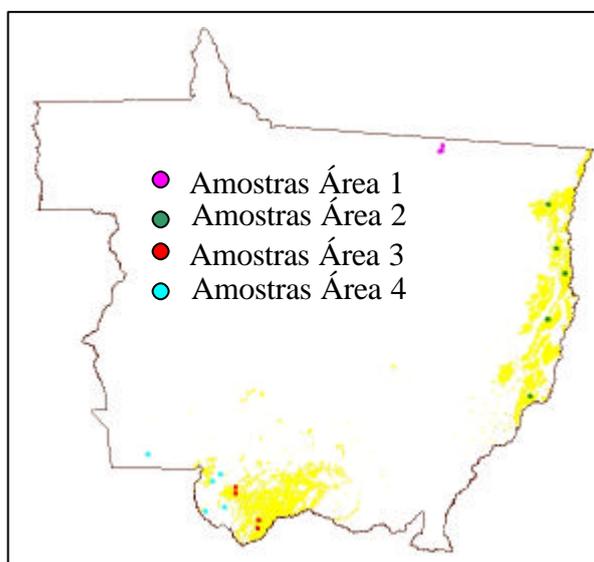


FIGURA 4.21 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Savana Parque agrupadas em quatro áreas: norte (pontos rosas), oeste (pontos verdes), sul (pontos vermelhos), e em áreas de alagamento (pontos azuis).

Para a Formação de Contato, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe, constaram de 5 amostras em três áreas distintas: na região centro-sul, entre as áreas de cultivo de soja, e ao norte (Figura 4.22).

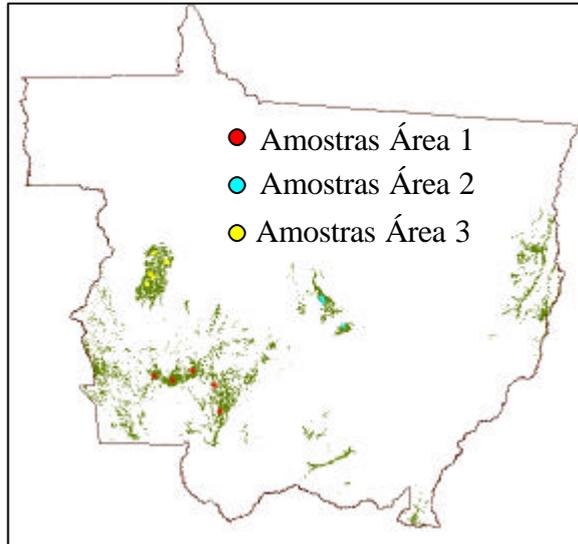


FIGURA 4.22 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Contato agrupadas em três áreas: centro-sul (pontos vermelhos), entre as culturas de soja (pontos azuis), e ao norte (pontos amarelos).

Para as áreas cobertas pelas Formações Pioneiras, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe constaram de 5 amostras ao longo da classe, devido a sua pequena extensão (Figura 4.23).

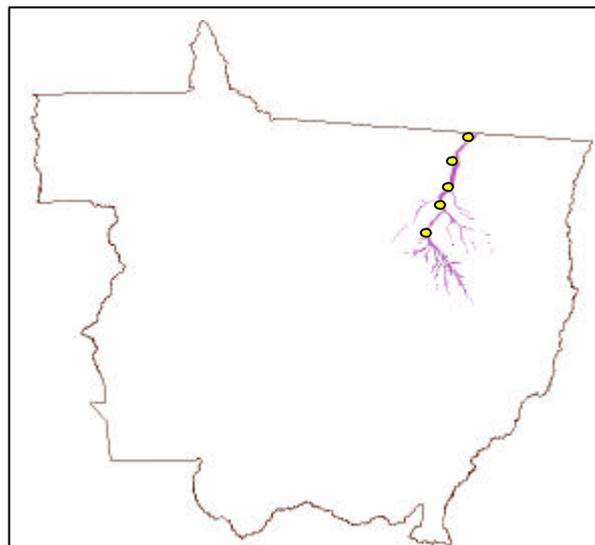


FIGURA 4.23 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de Formações Pioneiras ao longo da classe (pontos amarelos).

Para as áreas antropizadas que praticam a cultura da soja, as amostras adquiridas para a avaliação da variabilidade nesta classe constaram de 5 amostras em três áreas distintas:

áreas de soja cultivadas sobre antigas áreas de florestas, em áreas alteradas de formação Savana Arbórea Aberta e em áreas alteradas de Savana Gramíneo-lenhosa (Figura 4.24).

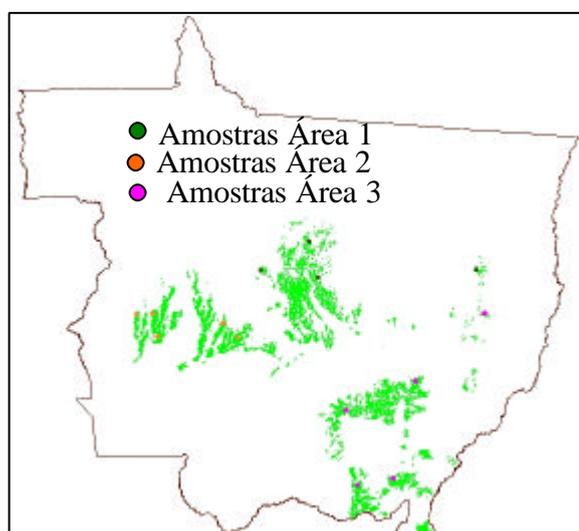


FIGURA 4.24 - Espacialização das amostras adquiridas nas áreas de cultura de soja agrupadas em três áreas: em áreas de Floresta Ombrófila Aberta (pontos verdes), em Savana Arbóreo Aberta (pontos laranja), e em Savana Gramíneo-lenhosa (pontos rosas).

Para a análise destas amostras na série temporal de imagens NDVI e EVI, utilizou-se a operação estatística de imagens por polígonos, disponível no programa SPRING. Os resultados desta análise foram dispostos em tabelas no formato Access, constando para cada amostra os valores médios de NDVI e EVI para todos os meses do ano de 2002. Foram obtidos diversos parâmetros estatísticos, dentre os quais utilizaram-se as médias mensais, para cada uma das amostras, em cada uma das áreas. Esta tabela no formato Access foi exportada para os aplicativos Excel e Statistica, onde foram gerados gráficos e realizados testes de médias, através da análise de Tukey, com o objetivo de avaliar a variação entre as áreas mapeadas como a mesma classe em diferentes regiões do Estado.

Para os dados de precipitação, utilizaram-se as grades com os valores totais mensais, e a metodologia para a geração destas grades pode ser encontrada no item 4.2 deste Capítulo. Para cada área, geraram-se as médias das amostras para cada mês, e analisou-se a relação da precipitação com as respostas dos dois índices de vegetação,

comparando-os com a precipitação referente ao mesmo mês; a resposta dos índices de vegetação com a precipitação com 1 e 2 meses de defasagem.

4.4 Análises das Mudanças na Cobertura da Terra Devido a Ações Antrópicas

A seguir é apresentada a metodologia desenvolvida e os materiais utilizados para o estudo das mudanças que a cobertura vegetal vem sofrendo devido às ações antrópicas. Elaborou-se a hipótese que é possível detectar tais alterações, a partir da aplicação do modelo de mistura espectral nos dados do produto MOD09 (imagens reflectância de superfície). O objetivo desta etapa foi analisar com dados multitemporais, os processos de desflorestamento e queimadas, que são as principais forçantes das mudanças que vem ocorrendo nas fisionomias vegetais da área de estudo. Para a validação desta etapa, utilizaram-se dados multitemporais do sensor ETM+ nas mesmas datas adquiridas do produto MOD09, a partir dos dados PRODES, para a identificação dos desmatamentos ocorridos no ano estudado.

4.4.1 O Desmatamento

Nesta dissertação, é proposta uma análise dos dados MODIS e seus produtos para a detecção das áreas desmatadas em tempo quase real. A metodologia empregada foi uma adaptação da metodologia do PRODES DIGITAL, utilizando-se para a validação imagens do sensor ETM+, que possui uma melhor resolução espacial (Anderson et al, no prelo), adquiridas nas mesmas datas das imagens MODIS analisadas.

Antes da etapa de validação dos dados do sensor MODIS, foi realizado um estudo preliminar com o produto MOD09, (correspondente aos dias: 166, 168, 171, 175 e 182), o produto MOD13 (correspondente aos dias 161, 177, 192), e cenas ETM+ dos dias 166 e 182. As datas foram selecionadas de forma a obterem-se as imagens referentes às passagens mais próximas entre os três tipos de dados utilizados.

O objetivo deste estudo preliminar foi avaliar o comportamento dos pixels de áreas desmatadas e de floresta dos produtos MOD09 e MOD13, após a aplicação do modelo de mistura espectral, para a definição nos dados MODIS a serem utilizados na análise

multitemporal dos processos de desmatamento. Um fluxograma geral dos passos seguidos pode ser observado na Figura 4.25.

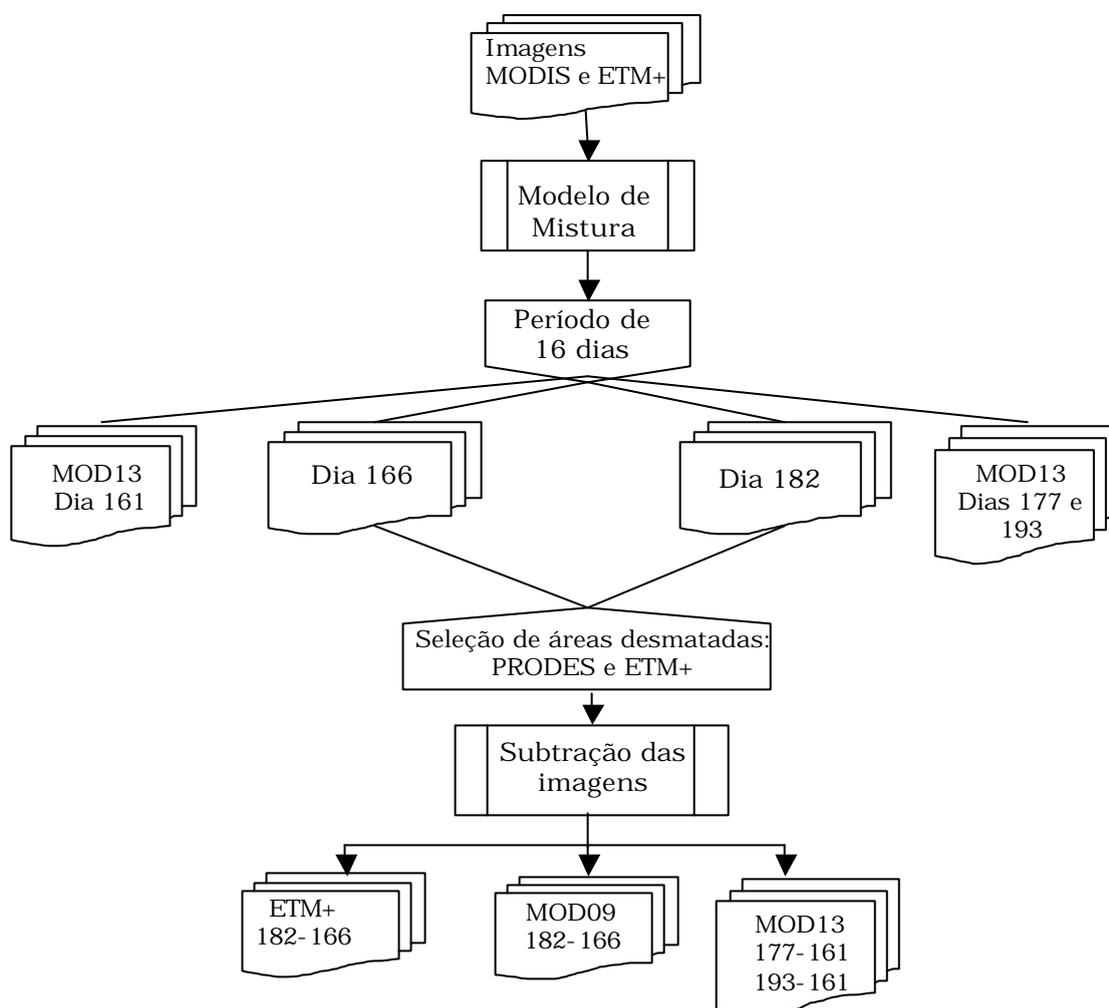


FIGURA 4.25 – Fluxograma do estudo preliminar para a avaliação da aplicação do modelo de mistura nos produtos MOD09 e MOD13.

A partir do modelo de mistura espectral aplicado aos três diferentes tipos de dados (ETM+, MOD09 e MOD13) (Figura 4.26) foram selecionados polígonos desmatados no ano de 2002, com base na carta temática do PRODES 2002 (Figura 4.27a). É pertinente ressaltar que nesta pesquisa considerou-se que é possível selecionar na imagem do sensor MODIS um pixel puro ou “image endmember”, para ser utilizado como dado de entrada para o modelo.

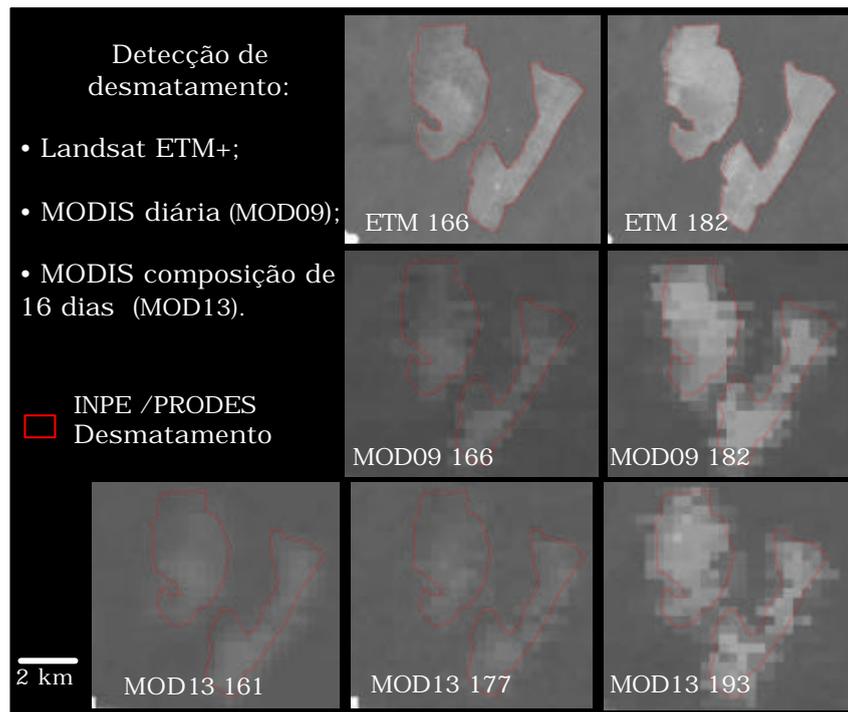


FIGURA 4.26 – Imagens fração solo, de uma área onde ocorreu desmatamento entre os dias 166-182. Os limites dos polígonos detectados pelo PRODES estão em vermelho.

Na Figura 4.26 observa-se a mudança na proporção de solo nas imagens fração entre as duas datas. Ressalta-se que na seqüência de imagens fração referente ao produto MOD13, entre a primeira e segunda data (dia 161 e dia 177), mesmo após a ocorrência do desmatamento, este não aparece nas imagens fração solo. Isto ocorre devido ao fato que as composições de 16 dias do produto MOD13 utilizam como base o máximo valor de NDVI. Isso significa que ainda que uma área tenha sido desmatada no período, prevalecerá o pixel contendo maior proporção de vegetação, e o desmatamento só será evidenciado na composição seguinte, como mostra o exemplo da Figura 4.27.

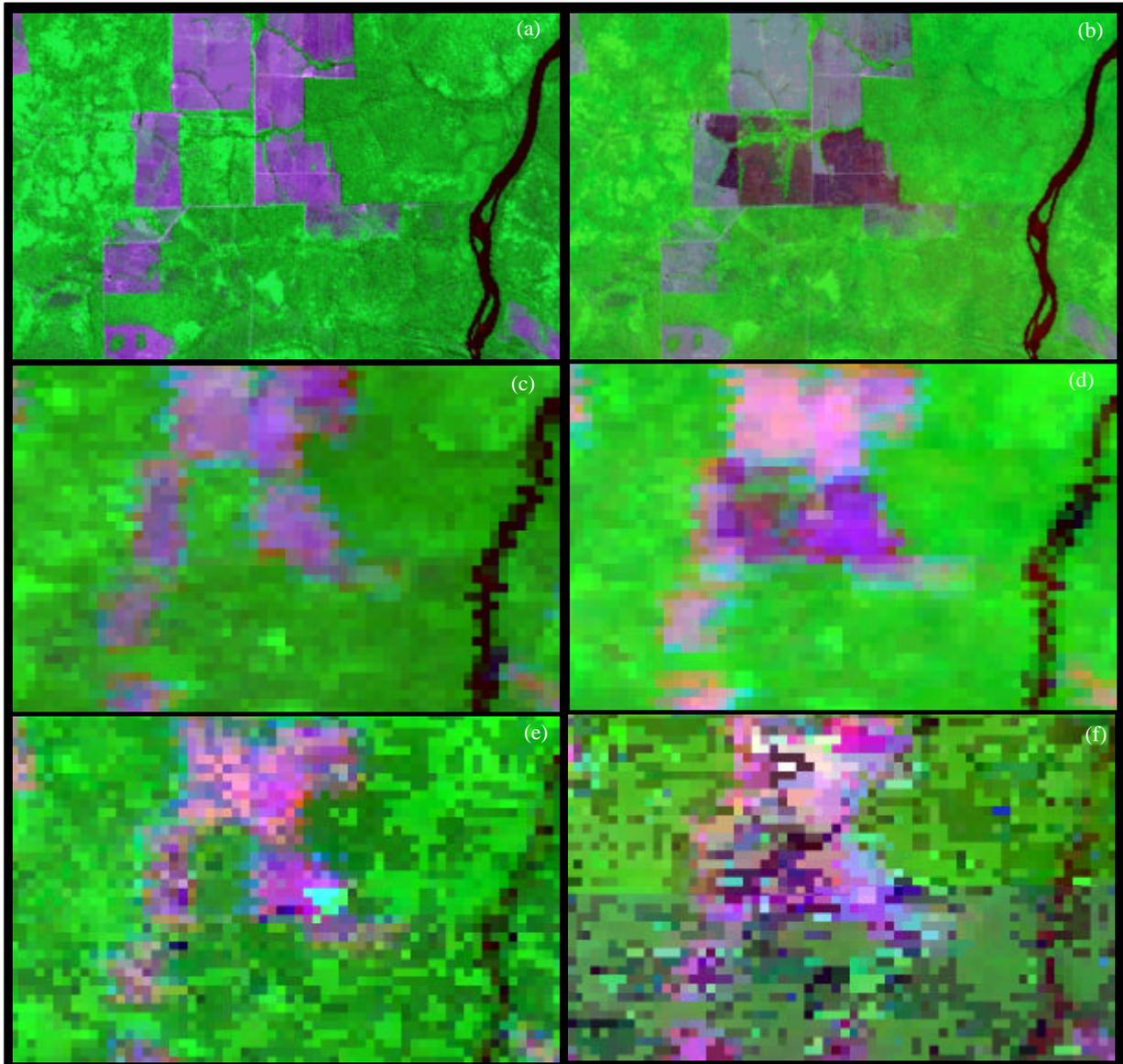


FIGURA 4.27 - Composição RGB das bandas do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Em (a) imagem ETM+, dia 214, mostrando polígono antes do desflorestamento e (b) dia 230, após o desflorestamento; (c) cena do produto MOD09, dia 214 e (d) dia 230; (e) composição do produto MOD13 referente ao mês de agosto (dia 213 a dia 243) e (f) composição do produto MOD13 referente ao mês de setembro (dia 244 a dia 273).

Na Figura 4.27 observa-se nas imagens ETM+ e MOD09 um polígono desflorestado no mês de agosto, entre os dias 214 e 230. Nas composições mensais do produto MOD13, o desmatamento é mascarado pelo método de mosaicagem com base no valor máximo de NDVI, só ficando evidente na composição do mês seguinte, em setembro.

Os valores em DN dos pixels nos dias 166 e 182 (para a imagem ETM+ e MODIS diária) e nos dias 161, 177 e 193 (para o produto MOD13) podem ser observados na Figura 4.28.

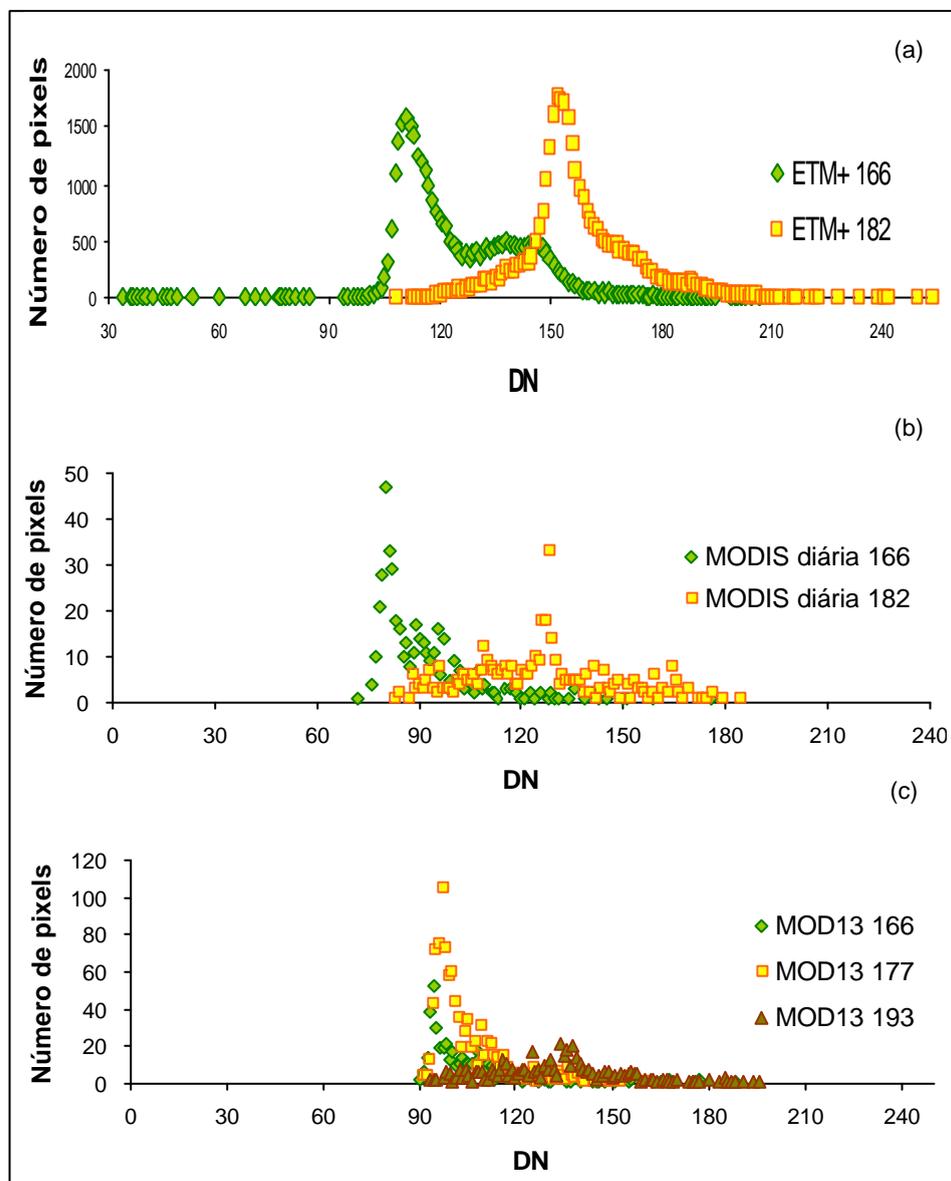


FIGURA 4.28 – Dispersão dos pixels da imagem fração solo para dois momentos: antes e após o desmatamento. Em (a): Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 166 a 182 para o sensor ETM+; (b) Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 166 a 182 para o produto MOD09; (c) Pixels da imagem fração solo em áreas desmatadas no período do dia 161 a 177 e 177 a 193 para o produto MOD13.

Na Figura 4.28a nota-se que antes da ocorrência do desmatamento, os valores para a imagem fração solo do dado ETM+ prevalecem entre 90 e 120 DN, enquanto que após a ocorrência do desmatamento, ou seja, com o aumento da proporção de solo na imagem, estes valores passam para 140 a 160 DN. Para os dados MODIS, tanto o produto MOD09 quanto o produto MOD13, possuem os valores em torno de 90 a 100 DN antes do desmatamento. Após a ocorrência do desmatamento, os dados do produto MOD09 apontam o aumento da proporção de solo, e a distribuição dos números de pixel tem seu pico deslocado para valores entre 120 a 150 (Figura 4.28b). Na Figura 4.28c, nota-se que a dispersão dos pixels no dia 177, do produto MOD13, apresenta-se semelhante à encontrada no dia 161, antes de ocorrer o desmatamento. Os desmatamentos ocorridos neste período foram constatados apenas na composição do dia 193, com o deslocamento do pico dos valores em DN dos pixels, devido ao aumento da proporção de solo na imagem.

O passo seguinte foi a seleção dos polígonos que tiveram um incremento na área desmatada no período do dia 166 ao dia 182 (Figura 4.29), baseado na subtração das imagens fração (dia 182- dia 166; dia 177- dia 161 e dia 193-dia 161).



FIGURA 4.29 – Seleção das áreas de teste. Em (a) polígonos desmatados em 2002, detectados pelo projeto PRODES (em vermelho), e em outras cores, os polígonos que tiveram suas áreas alteradas no período do dia 166 ao dia 182. Em (b) os polígonos selecionados e em (c) a área alterada destes polígonos nestes 16 dias.

Nos polígonos selecionados, a partir da subtração das imagens fração solo em DN, avaliou-se a amplitude das mudanças causadas nas imagens fração para áreas de floresta e desmatamento. Para os três tipos de dados, a variação da mudança na cobertura do solo de floresta para desmatamento, com base na imagem fração, pode ser observada nos gráficos abaixo (Figura 4.30).

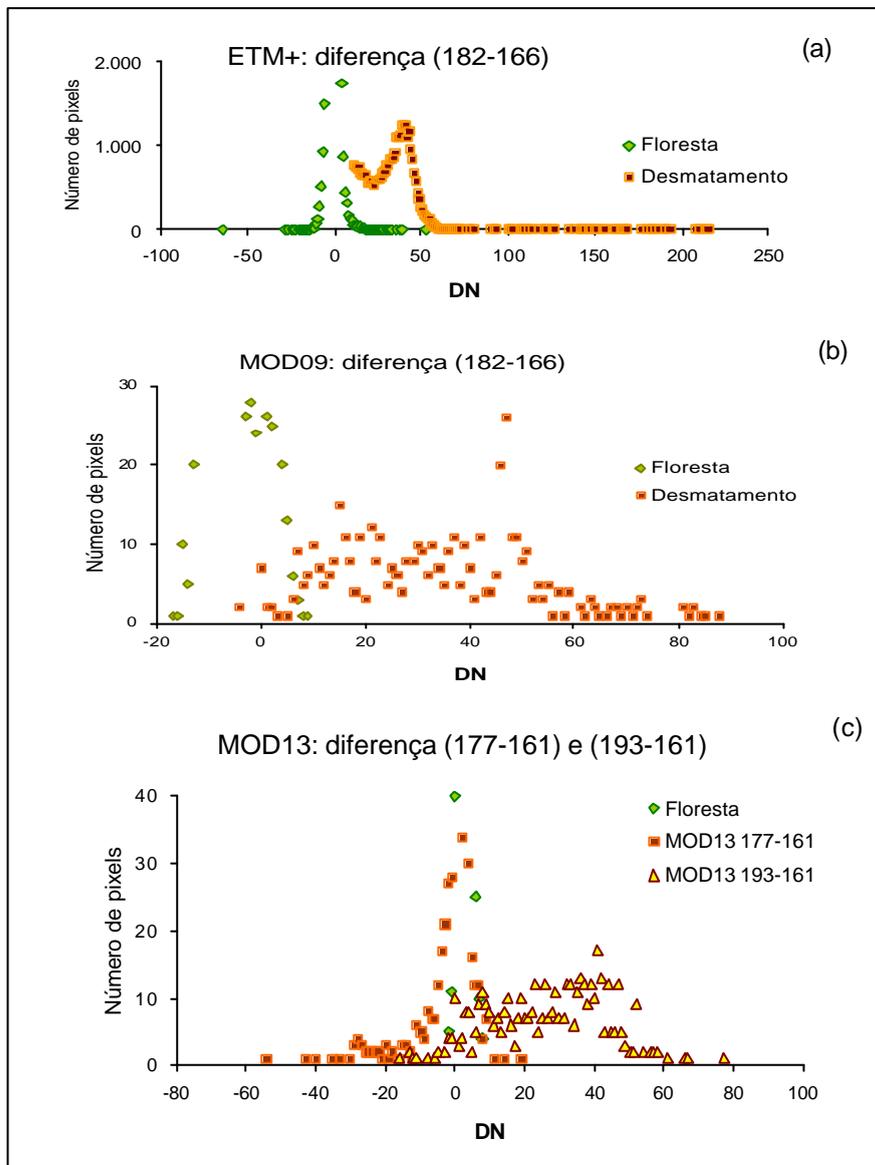


FIGURA 4.30 – Diferença das imagens fração solo, para os dados ETM+, MODIS diária, para os dias 182-166 e MOD13 para os dias 177-161 e 193-161, avaliando a amplitude da diferença dos pixels em áreas de florestas e áreas desmatadas. Em (a): Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor ETM+: diferença (182-166); (b) Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor MODIS imagem diária: diferença (182-166); (c) Pixels da imagem fração solo para floresta e desmatamento para o sensor MODIS produto MOD13: diferença (177-161) e (193-161).

Na Figura 4.30 observou-se a pequena variação que ocorre entre os pixels de floresta para os dados ETM+, MOD09 e MOD13, assim como para a diferença MOD13 dias 177-161. Na subtração das imagens fração solo, observou-se que as áreas que eram florestas nas duas datas apresentaram uma diferença próximo de zero, ou seja, possuíam valores próximos em DN que não se alteraram. Isto pode ser observado para os pixels de floresta (Figura 4.30a, b e c) e na subtração da data 177-161, referente ao produto MOD13 (Figura 4.30c). A partir do momento em que o desmatamento ocorreu, ou seja, houve um aumento da proporção da fração solo, esta diferença apresenta uma maior amplitude, pois o DN de uma área de floresta é um valor “baixo”, enquanto que o valor em uma área desmatada é “alto”. Isto foi observado para os pixels de desmatamento e diferença MOD13 193-161 (Figura 4.30a, b e c).

Baseando-se nos valores das diferenças encontradas entre os DN de floresta e desmatamento foram estabelecidos alguns limiares de teste para detectar os desmatamentos. Estes limiares foram calculados segundo três parâmetros:

- a) Valor que detecte todo o desmatamento;
- b) Valor considerado “ideal” que detecte a maior parte do desmatamento sem, no entanto, classificar muitos pixels de floresta; e
- c) Valor que detecte apenas as áreas desmatadas.

O cálculo dos limiares foi realizado baseado na análise dos valores de DN, através da técnica de fatiamento das imagens. Os resultados encontrados para os dois sensores podem ser observados na Figura 4.31.

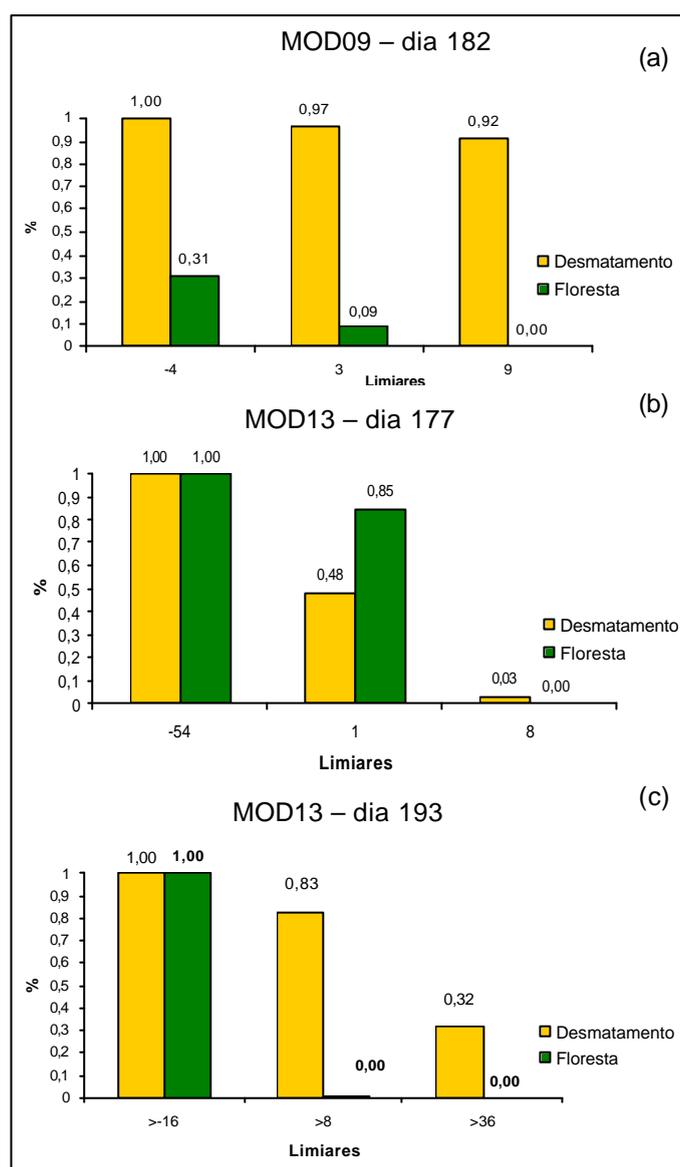


FIGURA 4.31 – Porcentagem de desmatamento detectado com base em diferentes limiares. Em (a) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, produto MOD09; (b) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, produto MOD13, dia 177; (c) Diferença para a detecção de desmatamento, segundo três limiares diferentes, MOD13, dia 193.

Na Figura 4.31, observou-se que ao utilizar-se um limiar que detecte todo o desmatamento, o produto MOD09 classifica também 31% de áreas de floresta, enquanto que o produto MOD13 classifica o mesmo número de pixels de floresta e de áreas desmatadas. A utilização de um valor “ideal” mostrou que o produto MOD09 detectou

97% das áreas desmatadas, havendo uma classificação de apenas 9% de áreas de floresta. O produto MOD13, para o dia 177, mostrou que com o valor médio, ou “ideal”, 48% da área desmatada e 85% da área de floresta foram classificadas. Estes valores para o produto MOD13 foram respectivamente 83% e 0. A partir da utilização de um limiar que detectasse apenas as áreas desmatadas foi encontrado para o produto MOD09 92% de áreas desmatadas classificadas, enquanto que para o produto MOD 13 dias 177 e 193, estes valores foram de 3% e 32% respectivamente.

Ainda com base nestes limiares, foi realizado mais um teste. Aplicou-se o modelo de mistura para três datas em imagens diárias do sensor MODIS entre este período analisado (166-182): dias 168, 171 e 175. O resultado para a detecção do desmatamento nesta seqüência de imagens pode ser observado na Figura 4.32.

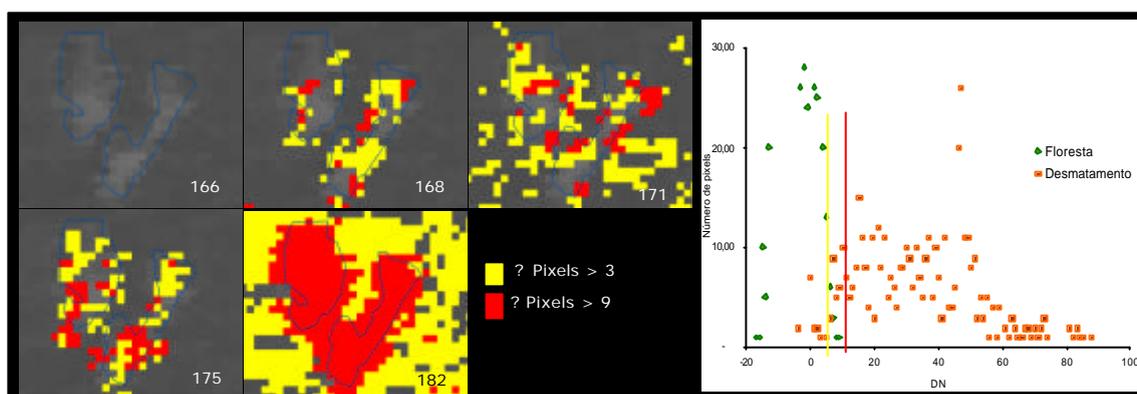


FIGURA 4.32 – Imagens fração solo entre os dias 166 e 182, produto MOD09, utilizando dois limiares diferentes para separar pixels de floresta de pixels de áreas desmatadas. O gráfico apresenta dispersão dos pixels da imagem fração solo, para floresta e desmatamento, com os limiares em amarelo (valor “ideal”) e vermelho (valor que separa apenas os desmatamentos).

Na Figura 4.32, observou-se à classificação de desmatamentos segundo dois limiares: diferença de 3 e 9 DN entre as datas. Baseando-se nestes limiares, foi possível acompanhar o incremento das áreas desmatadas, até a data 182, quando os dois polígonos detectados pelo PRODES (linha azul) aparecem como totalmente desmatados (em vermelho). No gráfico ao lado, observaram-se os dois limiares em relação à imagem fração solo do dia 182, mostrando a confusão com pixels de floresta para uma

diferença maior que 3 DN, e a detecção apenas de áreas desmatadas, para uma diferença maior que 9 DN.

Os resultados encontrados neste estudo preliminar apontaram uma maior potencialidade do produto MOD09, a partir da aplicação do modelo de mistura, para a detecção de desmatamentos. Observou-se também, que a geração de modelos de mistura independentes para cada um dos dias, pode inserir um erro no cálculo das proporções de solo, sombra e vegetação. Isto decorre devido à resolução do sensor, que favorece a seleção de pixels com valores diferentes de mistura para ser utilizado como dado de entrada para o modelo.

4.4.2 Avaliação Multitemporal do Processo de Desmatamento

O produto MOD09 adquirido para esta análise constituiu-se de oito imagens, bandas de 1 a 7, referentes ao “Tile” H 12 V 9 (Figura 4.33). As bandas do vermelho e infravermelho próximo possuem uma resolução espacial de 250m, enquanto que as outras bandas possuem uma resolução de 500m, e estas foram reamostradas para 250m. Estas cenas passaram pela fase de pré-processamento, já descritas no item 4.1.1. Esta série temporal refere-se ao período de junho a outubro, nas mesmas datas das imagens ETM+, bandas 1 a 5 e 7, que foram adquiridas com o objetivo de auxiliar a validação do monitoramento do desmatamento para uma área teste.

Por se tratar de um estudo de detecção de mudanças com dados multitemporais, os dados ETM+ passaram por uma série de pré-processamentos, que serão descritos a seguir.

Utilizaram-se 8 imagens ETM+ para o ano de 2002, bandas 1 a 7, referentes a todas as passagens do sensor entre os meses de junho a outubro : 15 de junho, 1 de julho, 17 de julho, 2 de agosto, 18 de agosto, 3 de setembro, 19 de setembro e 5 de outubro, que serão mencionados como referidos no calendário Juliano: dia 166, 182, 198, 214, 230, 246, 262 e 278 (Figura 4.33). Este período foi selecionado segundo a disponibilidade das imagens livres de nuvens e foram adquiridas com o objetivo de validar as análises do processo de desmatamento a partir dos dados MODIS, produto MOD09. A cena

utilizada foi de órbita/ponto 227/68, e foi selecionada segundo o cruzamento de três fatores: maior índice de desmatamento, segundo dados do PRODES, maior índice de queimadas, segundo dados de focos de calor fornecidos pelo CPTEC e a disponibilidade de um maior número de imagens livres de nuvens.

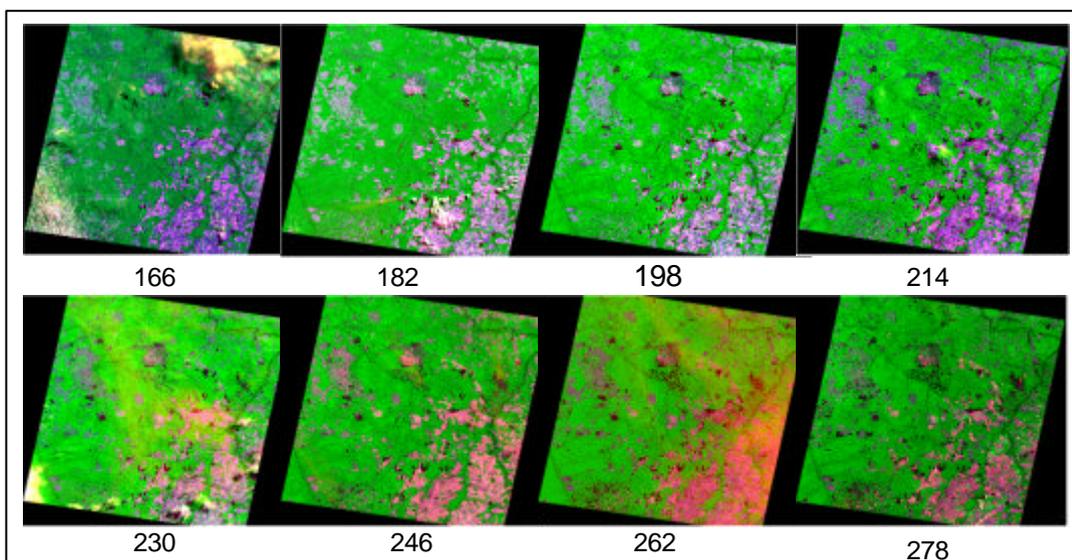


FIGURA 4.33 - Imagens Landsat selecionadas com as datas (calendário Juliano) do ano de 2002.

4.4.2.1 Pré-processamento das Imagens ETM+

1) Registro das imagens

As imagens ETM+ foram georreferenciadas utilizando-se como base a imagem fornecida pelo PRODES da mesma órbita/ponto do ano de 2002 (registro imagem-imagem). O objetivo deste registro foi fazer com que seja possível realizar uma comparação pixel a pixel do desenvolvimento do processo de desmatamento.

De forma a garantir um registro com o mínimo de distorção possível, este foi realizado no software PCI, que possibilita a aquisição de um número maior de pontos de controle que o aplicativo SPRING. Para o registro das oito cenas, foram selecionados 72 pontos de controle (Figura 4.34), usando o modelo polinomial simples, de segundo grau. Na tabela 4.3 encontram-se os deslocamentos em cada eixo da imagem para cada data.

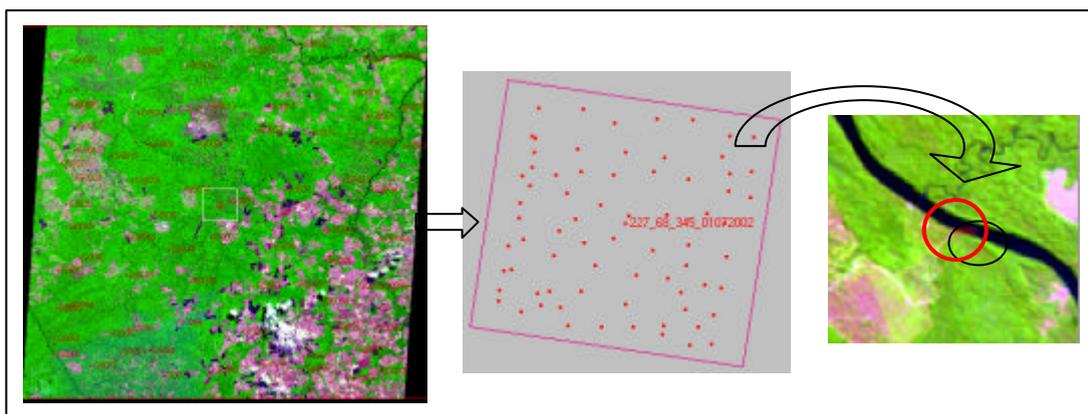


FIGURA 4.34 - Imagem Landsat com os pontos de controle utilizados para a realização do registro.

TABELA 4.3 - Erro de Registro Entre as Imagens ETM+ E a Imagem Fornecida pelo PRODES.

	15 de junho	1 de julho	17 de julho	2 de agosto	18 de agosto	3 de setembro	19 de setembro	5 de outubro
Deslocamento em X	0.42	0.46	0.46	0.45	0.44	0.59	0.46	0.47
Deslocamento em Y	0.47	0.41	0.44	0.47	0.44	0.57	0.45	0.46

O processo de seleção dos pontos de controle é bastante interativo, e permite uma constante avaliação de sua qualidade a partir do erro médio calculado. Com isso, pode-se frequentemente corrigir a posição do ponto ou substituí-lo por um ponto mais adequado.

Após o registro, as imagens foram importadas para o banco de dados, e o registro entre as imagens MODIS e ETM+ foi avaliado (Figura 4.35), sendo considerado satisfatório.

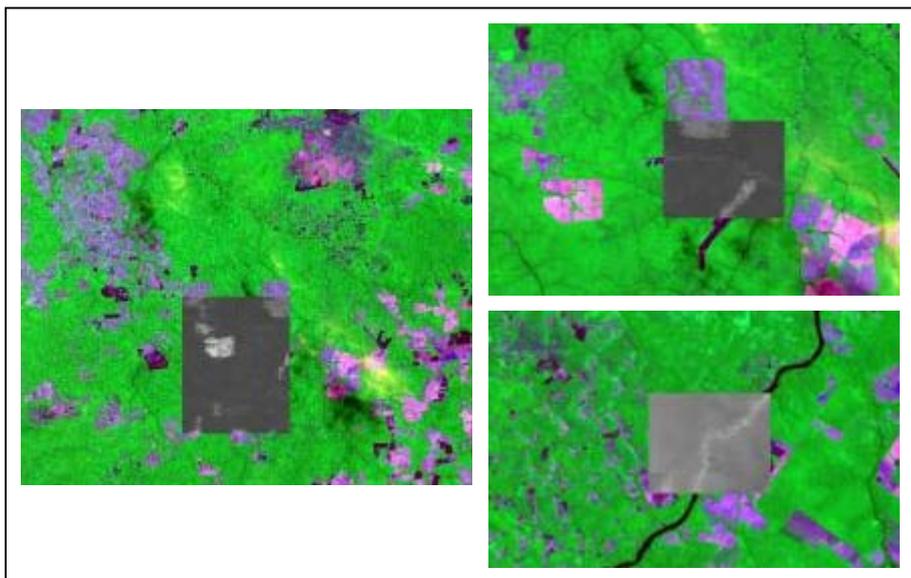


FIGURA 4.35 – Avaliação do registro entre as imagens ETM+ e MODIS. (a) em RGB parte da cena ETM+, e em monocromático, imagem fração solo MODIS; (b) Destacando uma região da cena e (c) imagem RGB ETM+ com a fração sombra da imagem MODIS, ressaltando uma área no curso de um rio.

2) Retificação Radiométrica das Imagens

Nesta pesquisa, utilizou-se a metodologia desenvolvida por Hall et al. (1991), de forma que houve uma normalização radiométrica entre as imagens (Mas, 1999).

O primeiro passo realizado antes da retificação foi a conversão das imagens ETM+ em DN para reflectância aparente (ρ) (APÊNDICE A), conforme sugerem Markham e Barker (1987). Esta transformação foi realizada no software SPRING, através da análise em LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico). Os valores dos parâmetros utilizados para realizar esta transformação foram adquiridos através do website

http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html e são apresentados na Tabela 4.3 (ângulo de elevação solar para cada data), Tabela 4.4 (valores de radiância mínima (L_{min}) e valores de radiância máxima (L_{max})), Tabela 4.5 (irradiância solar espectral) e na Tabela 4.6 mostram-se os valores de irradiância, utilizados nesse processamento. Maiores especificações sobre os algoritmos

desenvolvidos para os parâmetros de calibração podem ser encontradas no website http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter9/chapter9.html

TABELA 4.4 – Ângulos de Elevação do Sol para cada Data, Disponível no CD-Rom das Imagens.

	15 de junho	1 de julho	17 de julho	2 de agosto	18 de agosto	3 de setembro	19 de setembro	5 de outubro
Ângulo de elevação	44.13	43.64	46.68	44.50	49.96	53.95	58.04	61.47

TABELA 4.5 – Range da Radiância Espectral em Watt/(M² Sr) para o Sensor ETM+ para os Dados Após o Dia 1 de Julho de 2000, Utilizados para a Conversão da Imagem de Número Digital para Reflectância Aparente.

ETM+/2000-	Ganho baixo		Ganho alto	
Bandas	Lmin	Lmax	Lmin	Lmax
1	-6,2	293,7	-6,2	191,6
2	-6,4	300,9	-6,4	196,5
3	-5,0	234,4	-5,0	152,9
4	-5,1	241,4	-5,1	157,4
5	-1,0	47,57	-1,0	31,06
7	-0,35	16,54	-0,35	10,8

TABELA 4.6 – Irradiância Solar Espectral para ETM+, Utilizados para a Conversão da Imagem de Número Digital para Reflectância Aparente.

Bandas	1	2	3	4	5	7
Irradiância em W/sr	1969	1840	1551	1044	255,7	82,07

Todas as seis bandas (1 a 5 e 7) de cada uma das oito cenas ETM+ foram exportadas para o formato TIFF e então importadas para o programa PCI-8.2, onde foi realizada a metodologia para a retificação radiométrica das imagens.

A correção atmosférica não foi aplicada nas imagens, uma vez demonstrado que o método de subtração aperfeiçoado (dark object) não representa satisfatoriamente os efeitos de espalhamento atmosférico na região tropical, devido a simplificação das variáveis nos modelos de espalhamento (Chen, 1995).

Objetivando-se tornar a metodologia mais operacional, as imagens que originalmente possuía uma resolução espacial de 30x30m foram reamostradas para matrizes de 1000 x 1000 m, de modo a reduzir o tempo de processamento e espaço em disco. Segundo Shimabukuro et al. (1998), tal reamostragem (resolução espacial) das imagens não altera de um modo significativo a forma dos diagramas de Greenness e Brightness e a definição dos intervalos de pixels escuros e claros necessários para a retificação radiométrica.

Foram analisados os diagramas de dispersão de todas as cenas, com o objetivo de selecionar uma imagem de referência. A data 198 (em dias julianos) foi selecionada, devido à sua melhor qualidade visual. As datas anteriores (dias 166, 182) e da data seguinte (214) apresentaram uma dispersão muito próxima, indicando que não seriam necessários os processamentos de normalização destas cenas (Figura 4.36).

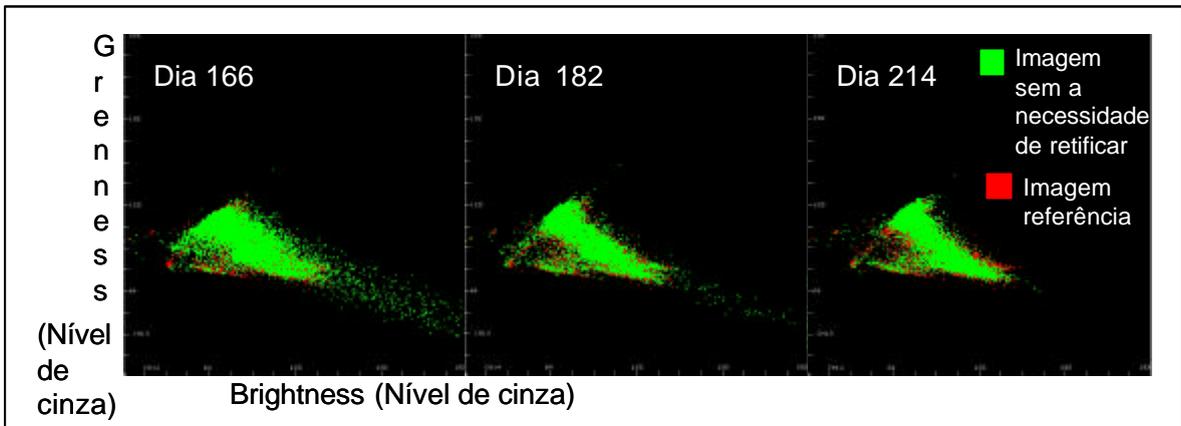


FIGURA 4.36 – Dispersão em gráfico 2D espalhamento das imagens GR x BR, sendo possível deste modo verificar a similaridade entre as datas.

Para as demais datas, foram selecionados os valores de GR e BR dos pontos invariantes nas imagens. É pertinente ressaltar que as cenas dos dias 230 e 262 foram geradas máscaras de nuvens, para que o gráfico de dispersão não sofresse contaminação nos valores de greenness (GR) e brightness (BR). Os pontos claros amostrados foram em áreas de solo exposto, enquanto que os pontos escuros foram amostrados em cursos de água limpa. Em seguida, máscaras de alvos escuros e claros foram geradas baseadas nas imagens GR e BR utilizando o algoritmo *tarsel* do PCI. A partir destas máscaras, extraíram-se as médias de nível de cinza de cada banda (1 a 5 e 7) para solo e água limpa, que serviram como base para a transformação linear utilizada na retificação.

A avaliação da retificação radiométrica foi realizada através da análise dos gráficos de espalhamento (SPL-2D-PCI), comparando-se o processo antes e após o processo de retificação (Figura 4.37), ou seja, os histogramas devem estar bem ajustados. A outra forma para avaliar o resultado da retificação é a análise dos níveis digitais da imagem retificada. Para isso, deve-se comparar os DN dos alvos claros e escuros, antes e após a retificação, sendo que estes valores não devem ser maiores que 1 DN de diferença em relação a imagem referência (Tabela 4.7).

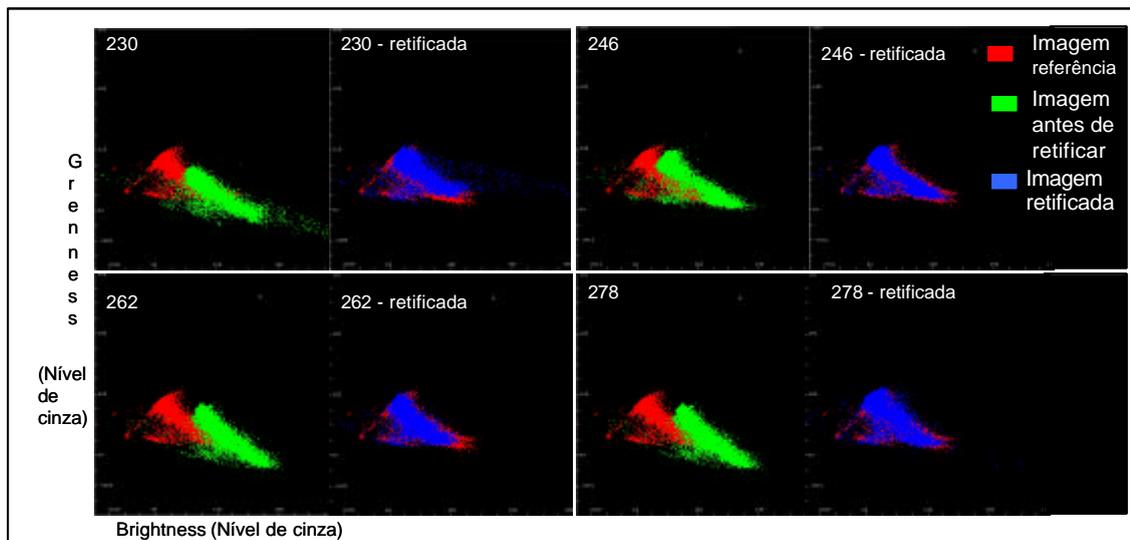


FIGURA 4.37 – Diagrama de dispersão das imagens Greenness e Brightness da imagem referência (vermelho) e da imagem antes da retificação (verde), e da imagem referência (vermelho) e imagem retificada (azul) para as quatro datas.

TABELA 4.7 - Valores dos Alvos Claros e Escuros da Imagem Referência e das Cenas Retificadas.

Banda espectral	Imagem Referência	Dia 230 Alvos claros	Dia 246 Alvos claros	Dia 262 Alvos claros	Dia 278 Alvos claros
B1	26,10	25,73	25,91	25,57	25,81
B2	51,66	51,11	51,11	51,16	51,08
B3	57,09	56,93	57,00	56,43	56,62
B4	50,23	49,84	49,60	49,84	49,55
B5	77,67	77,41	77,38	77,10	77,15
B7	81,44	80,97	80,99	80,96	80,90
Banda espectral	Imagem Referência	Dia 230 Alvos escuros	Dia 246 Alvos escuros	Dia 262 Alvos escuros	Dia 278 Alvos escuros
B1	20,92	20,06	20,33	20,00	20,50
B2	32,22	31,87	31,52	31,39	31,62
B3	19,35	18,43	19,00	18,39	19,04
B4	10,28	9,80	9,69	9,85	9,68
B5	4,08	3,91	3,88	4,00	3,48
B7	5,32	4,96	4,96	5,00	4,67

Com estas análises foi possível verificar se o processo de retificação foi capaz de remover as diferenças de nível digital derivadas das mudanças externas ao alvo. As comparações dos valores DN mostraram que o modelo de retificação utilizado funcionou, e o resultado da comparação dos scattergramas garantiu a utilização correta do modelo de retificação radiométrica. Após este procedimento, as imagens foram exportadas para o formato TIF e importadas para o SPRING.

As imagens MODIS não foram retificadas, pois estes dados já possuem a correção atmosférica, o que garante a homogeneização das respostas espectrais.

3) Confeção do Projeto ETM+ Dentro do Banco de Dados

O banco de dados geográficos da área de validação do estudo multitemporal dos processos de desmatamento foi elaborado de forma a armazenar os dados MODIS (produto MOD09) e ETM+, assim como dados do projeto PRODES, relativos aos anos de 2001/2002, no aplicativo SPRING 3.6.03.

O banco de dados foi definido pelos seguintes parâmetros técnicos:

- Sistema de projeção cartográfica: Foi selecionada a projeção UTM por se tratar da projeção utilizada no projeto PRODES;
- Datum: SAD69;
- Retângulo envolvente da área de estudo: Longitude Oeste $57^{\circ} 34' 12.08''$ e $54^{\circ} 54' 31.14''$; Latitude Sul $12^{\circ} 26' 6.11''$ e $10^{\circ} 42' 45.87''$;
- Origem: Longitude Oeste $57^{\circ} 0' 00''$.

Após a definição destes parâmetros, foram importadas para o banco todas as 8 cenas do produto MOD09 e ETM+, além dos dados PRODES.

4.4.3 Desenvolvimento Metodológico

De uma forma geral, as etapas seguidas para a análise e validação dos dados do sensor MODIS para o estudo multitemporal dos processos de desmatamento podem ser observadas no fluxograma abaixo (Figura 4.38).

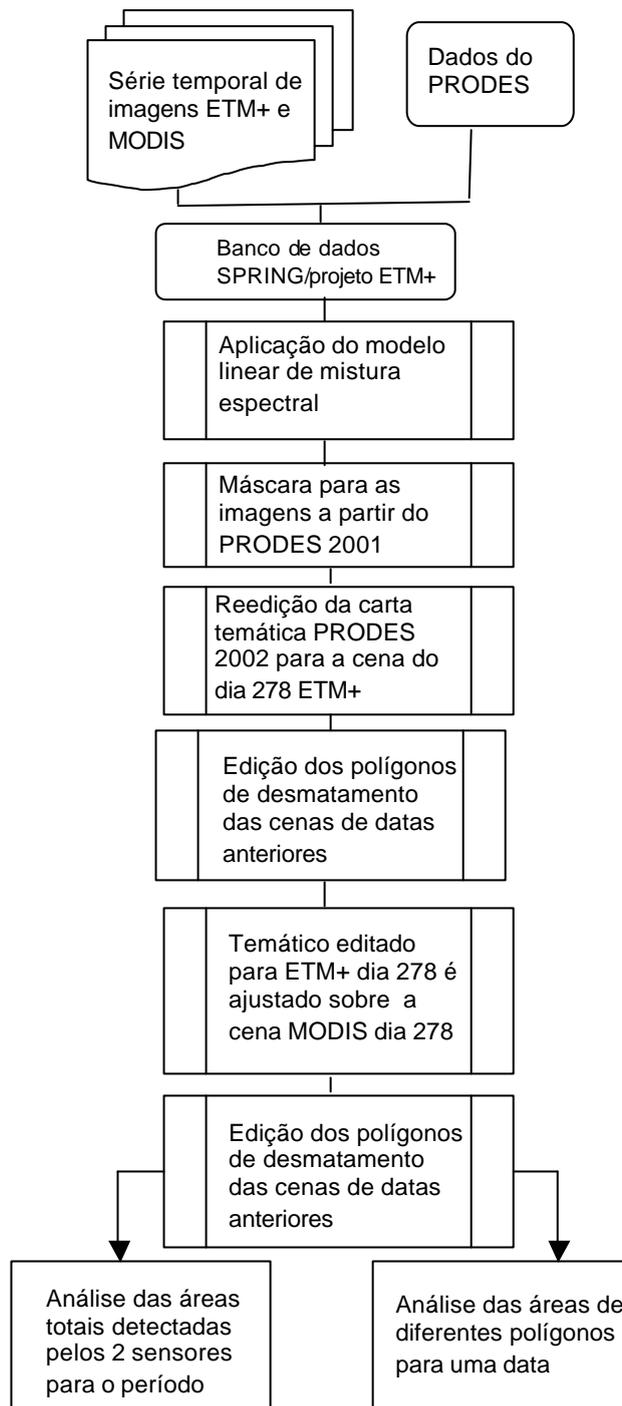


FIGURA 4.38 – Fluxograma geral das etapas desenvolvidas para a análise e validação do processo de desflorestamento detectado pelo sensor MODIS.

A partir do banco de dados com as imagens das oito datas (dias julianos 166, 182, 198, 214, 230, 246, 262 e 278) para os dados ETM+ e produto MOD09, foi aplicado o

modelo linear de mistura espectral, com o objetivo de facilitar a detecção dos desmatamentos com base nas imagens fração solo. A aplicação deste modelo levou em consideração as hipóteses elaboradas na seção 4.1.4 deste capítulo, e aplicou-se a metodologia para a geração de um modelo único para a série temporal estudada.

Na Figura 4.39 apresentam-se as melhores curvas espectrais obtidas nas imagens ETM+, e a seleção das que melhor representaram os valores esperados para os alvos analisados: sombra, solo e vegetação para a geração do modelo “único”.

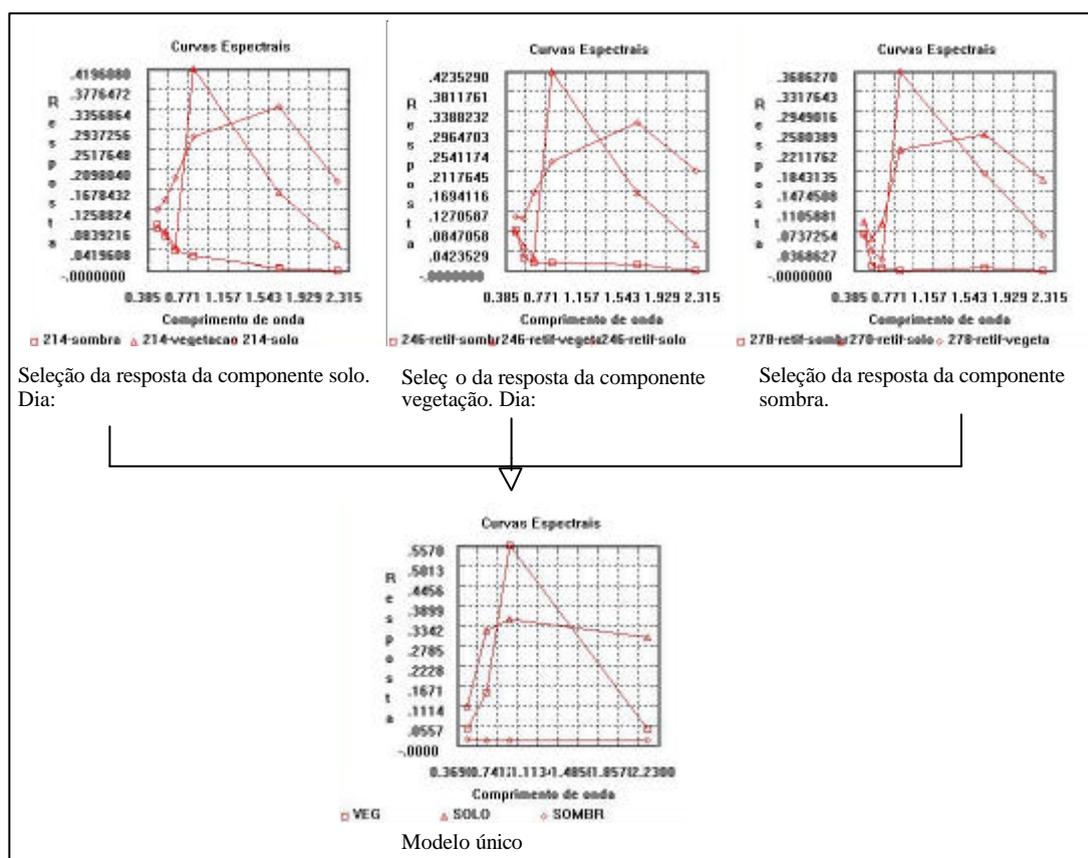


FIGURA 4.39 – Seleção das respostas dos componentes (sombra, solo e vegetação) para a geração do modelo único para as imagens ETM+.

A aplicação deste modelo “único” para os dados ETM+ foi consistente, pois os dados apresentaram-se retificados radiométricamente, ou seja, houve a normalização das cenas. Os dados do sensor MODIS, também apresentam-se normalizados através dos pré-processamentos que estes dados passam antes de serem distribuídos, como a correção atmosférica.

Para agilizar o processo de detecção das áreas desmatadas no ano de 2002, foi gerada uma máscara para os dados ETM+ e MODIS, através da análise em LEGAL (Linguagem Espacial de Geoprocessamento Algébrico) disponível no SPRING, para as classes, como não-floresta, nuvem, hidrografia e desmatamentos em 2001, com base nos dados PRODES 2001 (data base corresponde ao mês de outubro). Desta forma, as novas imagens apresentavam apenas as áreas que eram florestas a partir de outubro de 2001 e os novos desmatamentos (Figura 4.40).

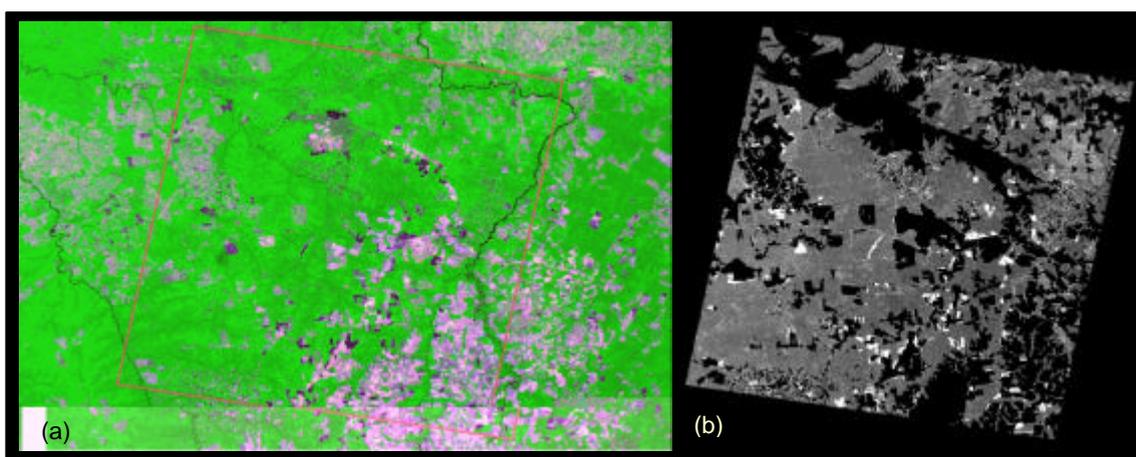


FIGURA 4.40 – Composição colorida, modelo de mistura e máscara da área de validação (227/68) para evidenciar apenas as áreas de floresta após o PRODES 2001. Em (a) composição RGB de uma imagem MODIS com os limites da cena ETM+ da área utilizada para a validação do desmatamento; (b) Imagem fração solo com ajuste de contraste, da mesma data, com a aplicação da máscara (preto) para áreas de desmatamentos antigos e não-floresta, evidenciando as áreas de floresta após PRODES 2001 (em tons de cinza), e áreas desmatadas (em branco).

A etapa seguinte foi a reedição da carta temática do projeto PRODES 2002, com base na imagem ETM+ do dia 278, mesma data utilizada pelo projeto. Este procedimento teve como o objetivo ajustar os polígonos desmatados para a cena do dia 278, mesma imagem utilizada pelo PRODES. A partir deste momento, utilizou-se esta nova carta temática para a edição sobre toda a série temporal.

A carta temática para os desmatamentos ocorridos em 2002, para a data 278, foi mosaificada de forma a constituir uma carta temática igual, para ser reeditada com base na cena do dia 262. Esta nova edição foi realizada de forma que os polígonos que se

encontravam desmatados na data 278, mas não estavam desmatados, ou parcialmente desmatados na data 262, tiveram sua área diminuída em relação à área original (Figura 4.41).

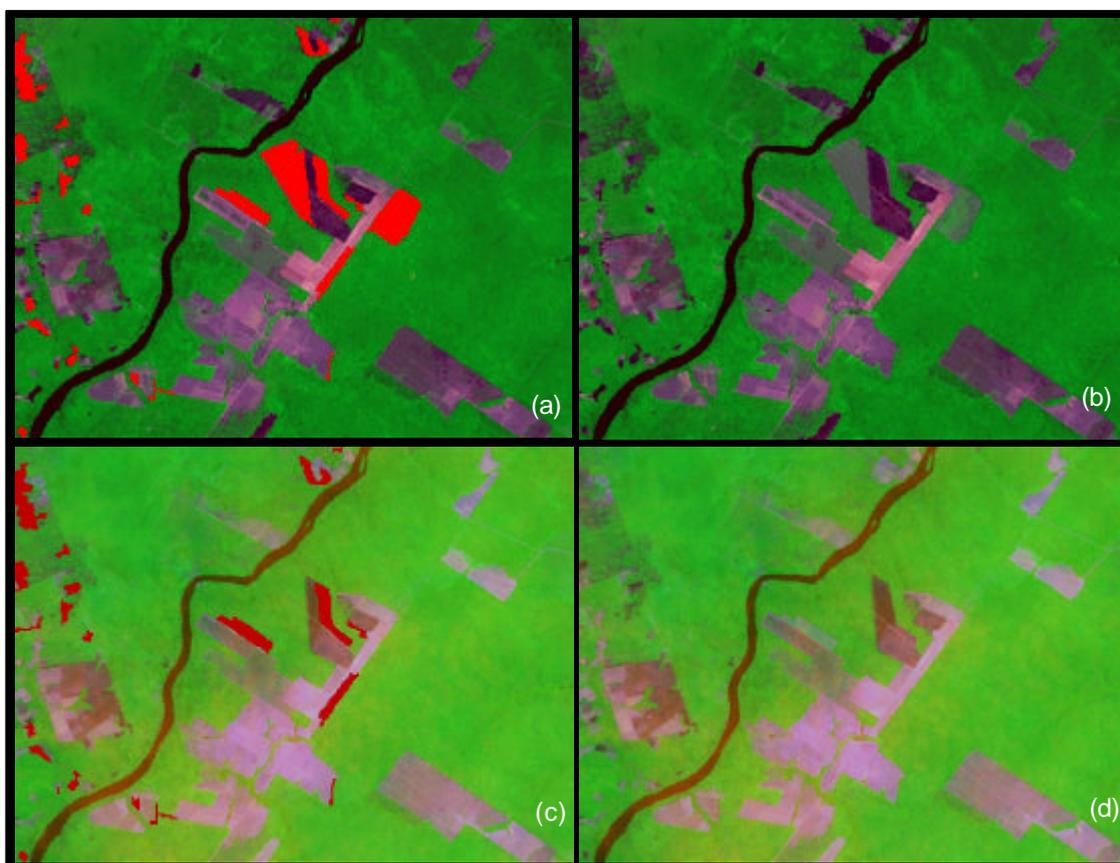


FIGURA 4.41 – Exemplo do procedimento de reedição da carta temática do PRODES 2002, para as datas 278 e 262. Em (a) observa-se um detalhe da cena 278, com o desmatamento detectado pelo PRODES 2002 (em vermelho), e em (b) a imagem correspondente ao mesmo dia. Em (c) é observado a carta temática reeditada para a data anterior (dia 262) sem parte dos polígonos de desmatamento, e a composição colorida da mesma data em (d).

Este processo de reedição foi realizado sistematicamente para as datas anteriores, de forma que o resultado final foi uma seqüência temporal das etapas de desmatamento, para o período de junho a outubro de 2002 para o sensor ETM+, realizada a partir da última para a primeira data. A seqüência normal desta análise seria a edição na ordem cronológica das imagens. No entanto, este procedimento foi adotado com o objetivo de facilitar e tornar mais rápido o processo de edição, pois garantiu-se que os polígonos

desmatados na data final não fossem alterados, concordando com os dados do PRODES. Este resultado foi utilizado como dado de verdade terrestre para a validação do processo de desmatamento para o produto MOD09.

Com o objetivo de analisar somente os mesmos polígonos detectados pelo PRODES nos dados MODIS, foi feita uma mosaicagem da carta temática do dia 278, para ser reeditada sobre a imagem MODIS. No entanto, devido à resolução espacial de 250 metros, problemas de interpretação em pixels com mistura de fisionomias (desmatamento/floresta) poderiam ocorrer no momento da edição, mesmo utilizando-se das imagens fração e composições coloridas. Para isso, foi adotada uma etapa a mais de forma que o erro de edição se tornasse sistemático.

O procedimento adotado foi a segmentação das imagens fração solo devido ao incremento do desmatamento apresentar um contraste entre os alvos floresta/solo exposto. Esta metodologia tem apresentado bons resultados (Almeida-Filho e Shimabukuro, 2002), pois levam em consideração atributos particulares para o particionamento das imagens em frações homogêneas, como média do nível de cinza, forma e textura. Os limiares utilizados neste processo foram 6 para similaridade e 1 para área. A opção por estes limiares foi definida após uma análise visual dos valores de DN nas imagens fração solo, sobre as áreas de floresta e solo exposto. As linhas geradas na segmentação foram ajustadas e poligonalizadas, e então mosaicadas para um plano de informação vetorial. Assim, as edições das áreas de desmatamento e florestas obedeceram ao critério estabelecido, sendo que apenas pequenas edições foram feitas a partir de uma interpretação subjetiva (Figura 4.42).

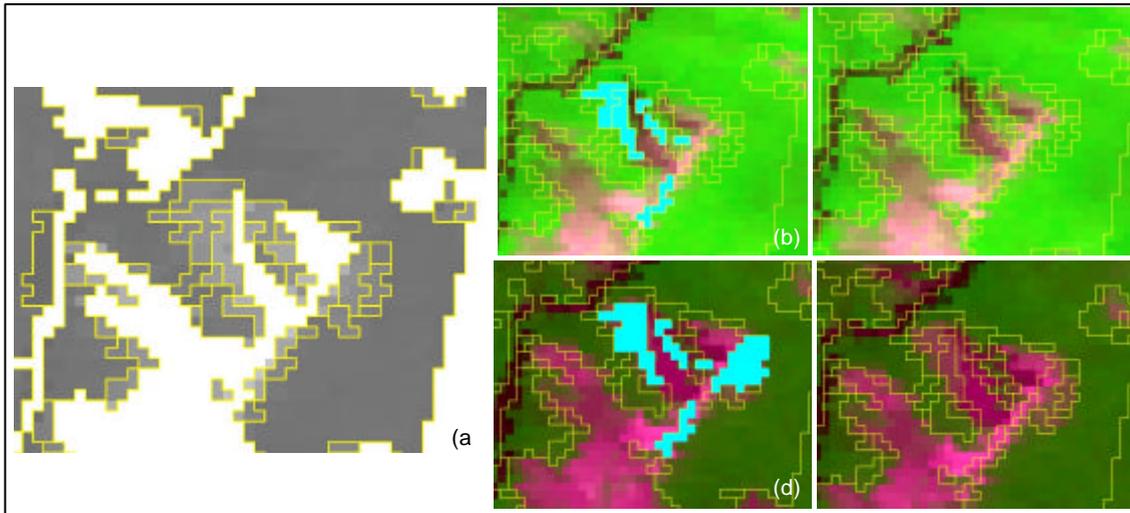


FIGURA 4.42 – Processo de edição para as imagens MODIS diárias. Em (a), segmentação da imagem fração solo com a máscara; (b) áreas detectadas como desmatadas (em azul) e em (c) composição RGB da mesma data (dia 262) mostrando a floresta; em (d) áreas detectadas como desmatadas (em azul) e em (e) composição RGB da mesma data (dia 278) mostrando o desmatamento.

Este procedimento foi realizado para toda a série temporal, iniciando-se pelo dia 278, seguindo as etapas de mosaicagem e edição para a data anterior. No final do processo, o resultado foi a série temporal das áreas desmatadas no período de junho a outubro de 2002 para o sensor MODIS. Este tipo de resultado é muito importante para a definição de uma metodologia de detecção de áreas desmatadas em tempo quase real.

Para avaliar quantitativamente os resultados entre a verdade terrestre considerada e os resultados obtidos, as medidas de erro e precisão foram computadas para cada caso. Estas estimativas foram realizadas segundo a metodologia de avaliação descrita por Zhan et al. (2002):

- 1) Erro de comissão (%): $(\text{número de pixels alterados identificados pelo método, mas não incluídos nos polígonos de "verdade terrestre"}) / (\text{número total de pixels incluídos nos polígonos identificados pelo método}) \times 100\%$.

- 2) Erro de omissão (%): $(\text{número de pixels alterados incluídos nos polígonos de "verdade terrestre" mas não identificados pelo método}) / (\text{número total de pixels incluídos nos polígonos de "verdade terrestre"}) \times 100\%$.
- 3) Detecção da precisão (%): $(\text{número de pixels alterados incluídos nos polígonos de "verdade terrestre" e identificados pelo método}) / (\text{número total de pixels incluídos nos polígonos de "verdade terrestre"}) \times 100\%$.

No trabalho de Zhan et al. (2002) utilizaram-se os dados MODIS com 250m de resolução espacial para a detecção de mudanças. A partir da aplicação do algoritmo VCC (Vegetation Cover Conversion) nas bandas do vermelho e infravermelho próximo (IVP), objetivou-se criar uma metodologia de alarme global para mudanças na cobertura da superfície devido a causas antrópicas e eventos naturais. Os resultados obtidos por estes autores são comparados com os obtidos nesta pesquisa.

a) Utilização de Imagens Índice de Vegetação para Detectar Desmatamentos

Com base nas imagens índice de vegetação, fornecidas pelo sensor MODIS, foi levantado o seguinte questionamento: é possível detectar desmatamentos a partir da utilização das imagens índice de vegetação?

A partir da composição mensal do mês de junho, foram feitas 30 amostras para cada uma das seguintes variáveis: floresta, solo exposto e desmatamentos ocorridos no ano de 2002 (Figura 4.43). Aplicou-se o teste estatístico de Tukey com o objetivo de avaliar se houve diferenças significativas entre as variáveis amostradas.

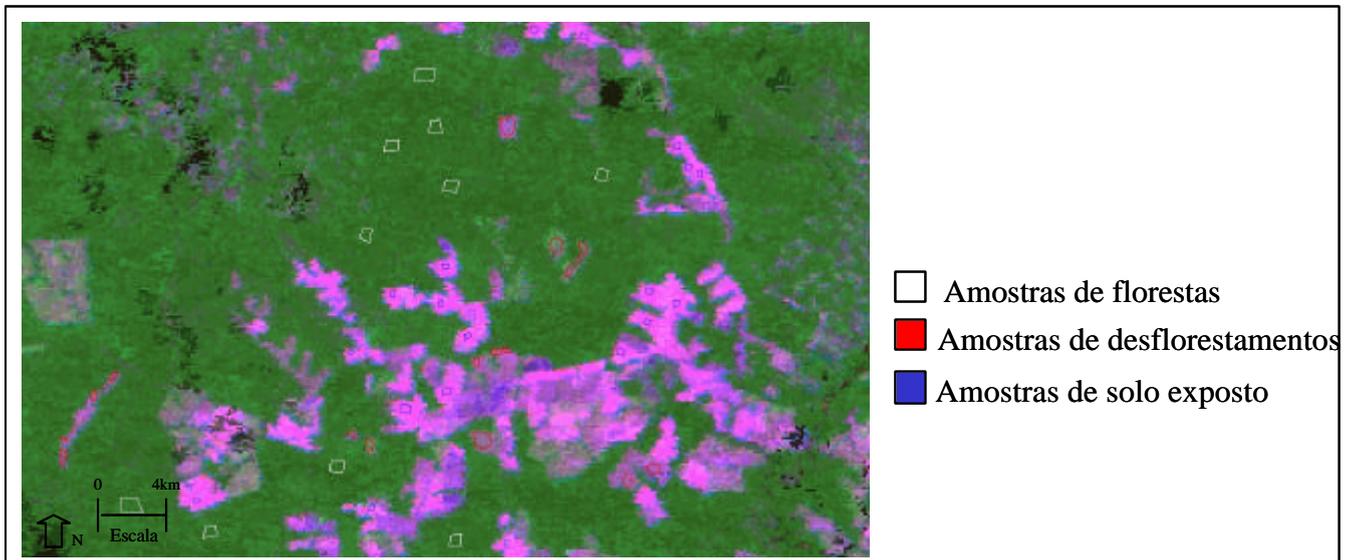


FIGURA 4.43 – Composição RGB das bandas da região do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho do produto MOD13 referente ao mês de junho, e parte dos polígonos das amostras de floresta, desmatamento e solo exposto.

4.4.4 As Queimadas

Para a realização das análises das áreas queimadas, utilizou-se a mesma série multitemporal de imagens ETM+, MOD09 e MOD13 analisadas na metodologia de detecção de desmatamentos, além do produto MOD14, referente à detecção de anomalias termais em áreas continentais.

A análise das áreas queimadas detectadas pelo sensor MODIS foi direcionada com base nos seguintes questionamentos:

- 1) Como é o comportamento das áreas queimadas nas imagens fração sombra do sensor MODIS?
- 2) Como é a variação dos índices de vegetação em áreas queimadas?

Para responder as questões levantadas, foram definidos 126 polígonos amostrais, na cena ETM+ correspondente ao dia 278, pois nesta data havia um grande número de áreas queimadas. Estes polígonos foram desenhados somente nas áreas correspondentes a áreas que haviam sido desmatadas após outubro de 2001 (Figura 4.44). No processo de edição destas amostras, tomou-se o cuidado de não utilizar as bordas das áreas queimadas, com o intuito de minimizar os efeitos de mistura nas imagens MODIS.

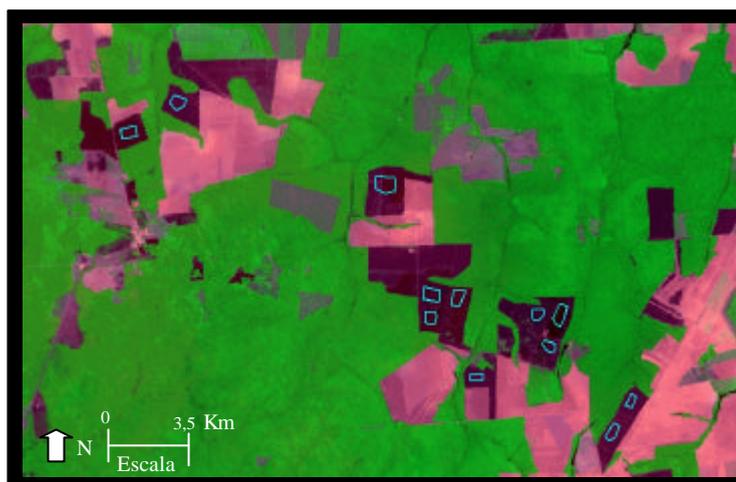


FIGURA 4.44 - Composição colorida mostrando alguns dos polígonos amostrais (retângulos em azul) selecionados na data 278 do sensor ETM+.

Com base nas áreas amostradas, foi gerada a estatística de imagem por polígonos, em relação às imagens fração sombra, para as imagens ETM+ e produto MOD09, assim como para as composições mensais dos meses de outubro e novembro (Figura 4.45).

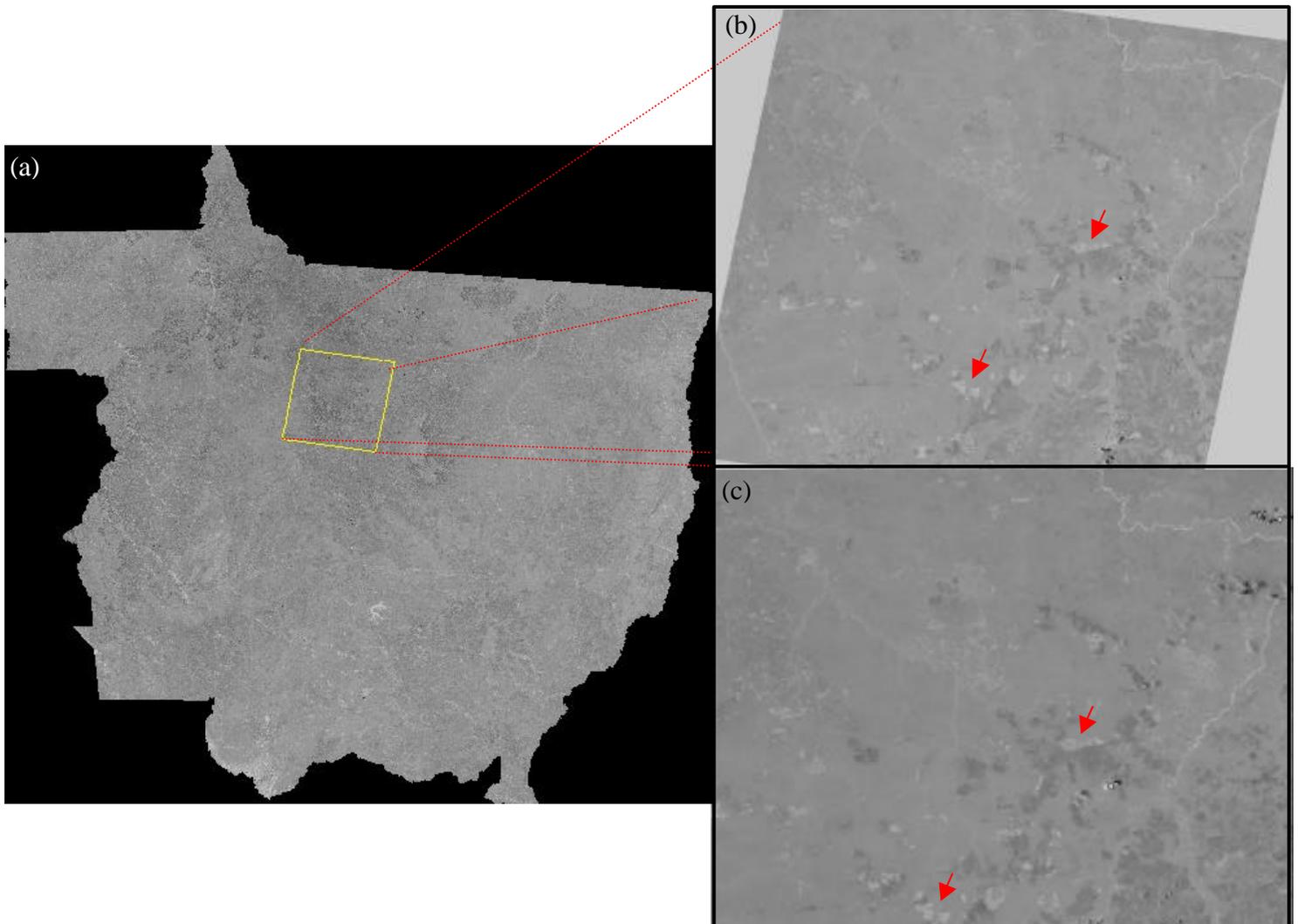


FIGURA 4.45 – Imagem fração sombra para do Estado do Mato Grosso referente ao mês de agosto. Em (a) Imagem fração sombra do dia 278, sensor ETM+; (b) Imagem fração sombra do dia 278, sensor MODIS. As setas vermelhas apontam alguns exemplos de áreas queimadas, que na imagem fração sombra apresentam-se mais brilhantes.

A partir das médias dos valores das imagens fração (sombra, solo e vegetação) de cada um dos polígonos, calculou-se a proporção das frações (Figura 4.46).

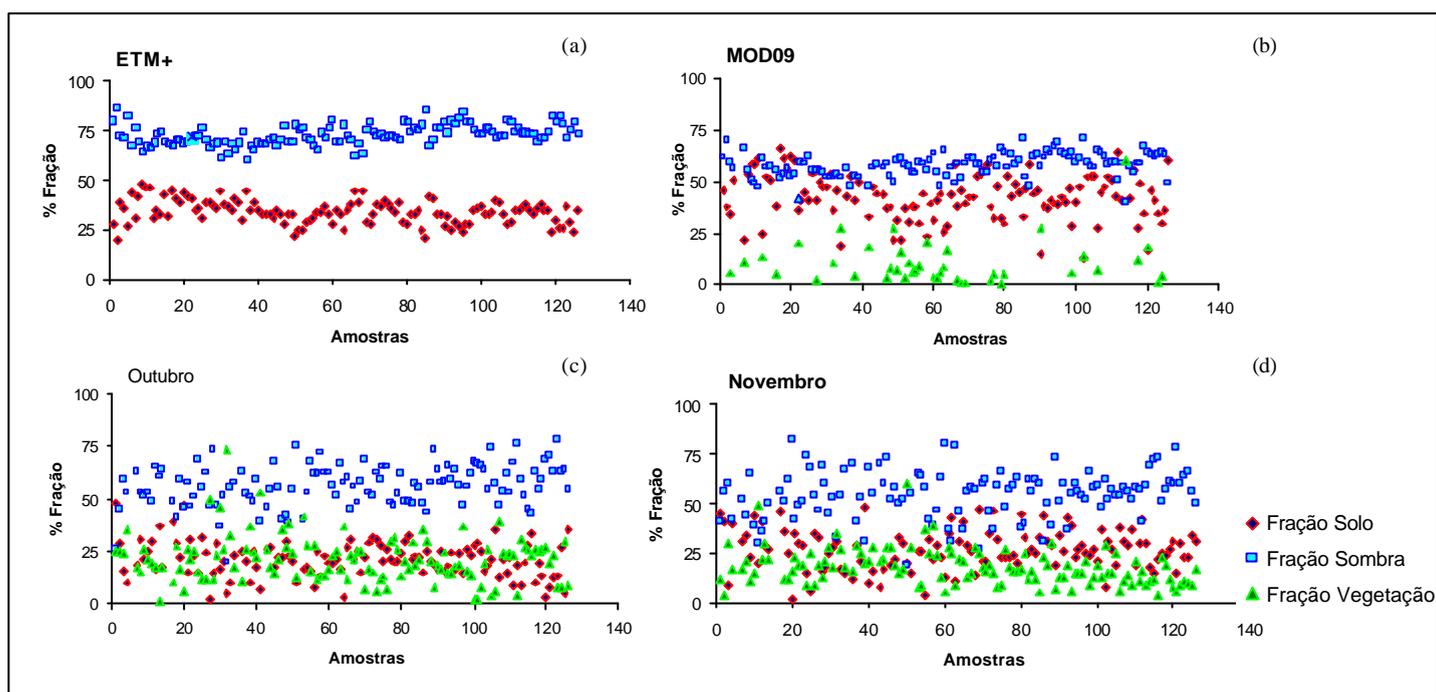


FIGURA 4.46 - Proporção das imagens fração para cada um dos polígonos, na data 278, e para as composições nos meses de outubro e novembro. Em (a) proporção das imagens fração para a imagem do sensor ETM+; (b) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD09; (c) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD13, composição mensal de outubro; (d) proporção das imagens fração para a imagem do sensor MODIS, produto MOD13, composição mensal de novembro.

Na Figura 4.46 observou-se que na imagem ETM+, os polígonos amostrais possuem uma proporção de sombra mais alta que a proporção de solo, apresentando uma boa separabilidade. Isto se deve ao fato da resposta das queimadas ser mais alta na imagem fração sombra, que nas demais. Devido ao fato destas amostras terem sido feitas em áreas queimadas, a proporção de vegetação apresentou-se com valor zero na imagem ETM+. No subitem b desta mesma figura, relacionada ao produto MOD09, observou-se que a proporção de sombra apresentou-se um pouco mais baixa: na imagem fração sombra ETM+ o valor médio é de 73,5 enquanto que na imagem fração sombra MOD09 é de 58,3. Além disso, devido à resolução do sensor MODIS, observou-se também a presença de proporções de vegetação nos polígonos amostrados, indicando a mistura nos pixels. Os subitens c e d apresentam as respostas das imagens fração para os meses

de outubro e novembro. Apesar deste produto apresentar a mesma resolução espacial que o produto MOD09, nota-se para ambos os meses, uma maior proporção de vegetação nas amostras. Isto se deve à composição ser realizada com base nos máximos valores de NDVI, que acaba detectando a maior proporção de vegetação, mesmo no mês seguinte. As imagens fração sombra deste produto, possuem um valor médio para as amostras adquiridas de 56,3 para o mês de outubro, e de 53,8 para o mês de novembro.

Para os dados analisados (ETM+, produto MOD09 e duas composições do produto MOD13), observou-se que as imagens fração sombra apresentam boa separabilidade em relação às outras imagens fração (fração solo e fração vegetação), indicando a potencialidade da utilização dos produtos derivados do modelo de mistura espectral para avaliação de queimadas no sensor MODIS.

Com o objetivo de analisar o comportamento das imagens MODIS em áreas queimadas em relação às imagens ETM+, utilizadas como dado de verdade terrestre, foram realizados os seguintes testes estatísticos:

- Teste de correlação: para avaliar o grau de correlação entre as variáveis (imagens ETM+ e MODIS). Por se tratar de duas variáveis, utiliza-se a correlação linear.
- Análise de variância: para analisar as médias das imagens fração, verificando se a correlação é significativa.

Para a análise do produto MOD14 foram adquiridas as imagens referentes às mesmas datas das imagens ETM+.

O MOD 14 tem como característica a inclusão da ocorrência do fogo e o cálculo da energia de cada foco, além de composições de 8 e 30 dias de suas ocorrências. Estes produtos utilizam dois canais para o fogo: o canal 21 (que satura na temperatura de 500° K) e o canal 22 (que satura a 331°K). A banda do infravermelho próximo de resolução de 250 m também é utilizada para identificar superfícies altamente reflectivas que são, provavelmente, as causadoras dos falsos alarmes de queimadas (Justice et al., 2002b).

O produto MOD14, assim como todos os dados fornecidos do sensor MODIS já são disponibilizados com georeferenciamento, em que tanto a projeção quanto o datum podem ser alterados posteriormente. Estes dados foram importados para o aplicativo SPRING, onde foram observados problemas relacionados ao registro destes dados (Figura 4.47).

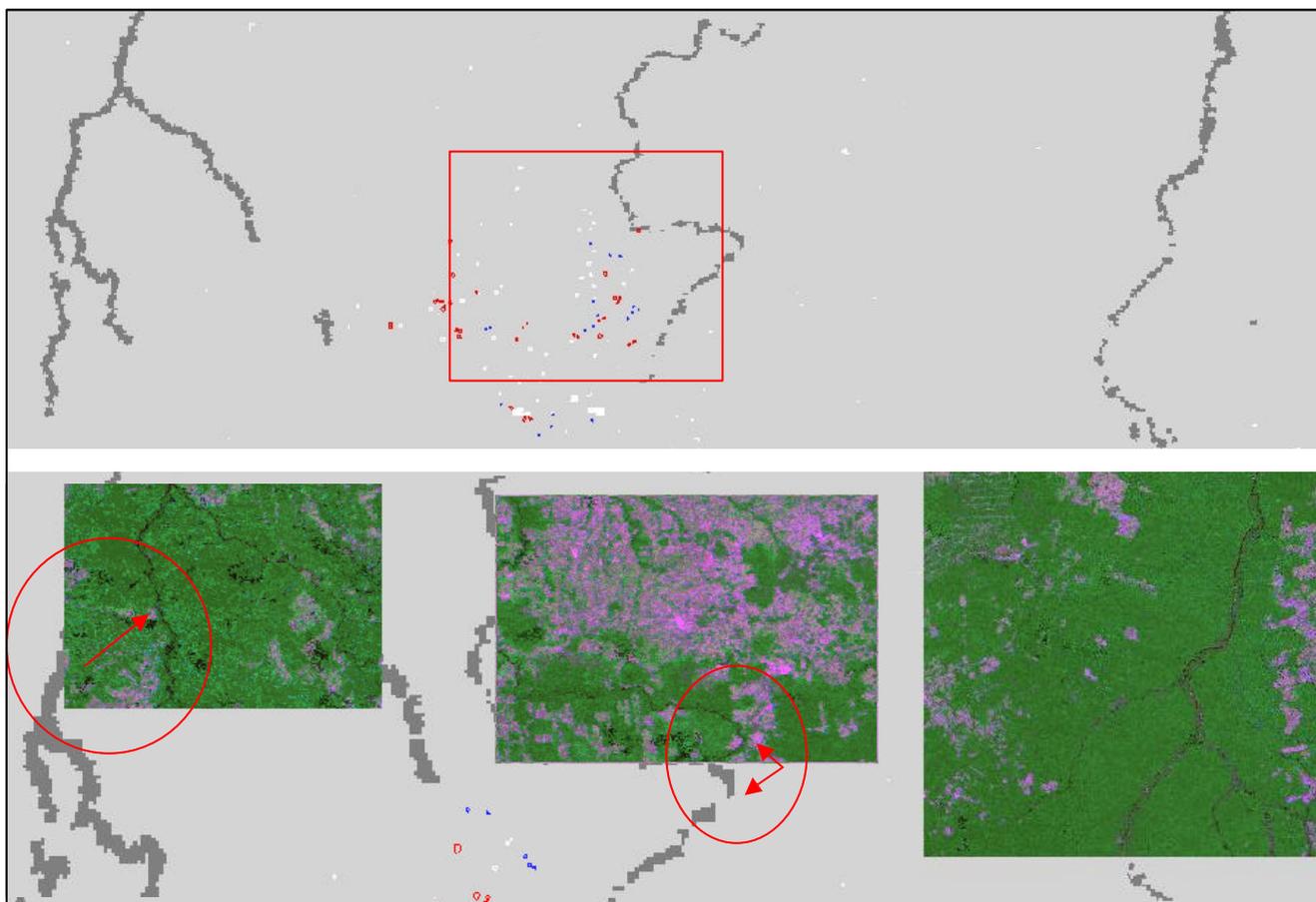


FIGURA 4.47 – Dados do produto MOD14 mostrando problemas de georeferenciamento. Em (a) apresenta-se cena do produto MOD14, para o dia 166 na região norte do Estado do Mato Grosso com a área de validação (mesmo local da cena ETM+) em vermelho; em (b) observa-se o mesmo produto com a composição colorida de uma cena do sensor MODIS mostrando que em dois locais da cena existem distorções geométricas (circulado em vermelho), o que impossibilitou a análise destes dados.

Devido aos problemas encontrados, não foi realizada a análise dos focos de calor disponibilizados pelos dados MODIS como parte desta dissertação, no entanto, este estudo está sendo desenvolvido como parte das atividades desta linha de pesquisa.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa. Inicialmente são expostos os resultados referentes à classificação da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso, e a seguir são apresentados os resultados obtidos para o monitoramento da vegetação, tanto a parte relacionada à fenologia quanto a parte das alterações na cobertura vegetal, devido a causas como o desmatamento e queimadas.

5.1 Classificação da Cobertura Vegetal

Neste item são analisados os resultados obtidos no processo de classificação da cobertura da terra. Estes resultados são utilizados também para uma avaliação da pressão antrópica sobre os diferentes ecossistemas encontrados na região, e é analisada a resposta fenológica das formações vegetais, com base nas imagens índice de vegetação e dados de precipitação.

Algumas das imagens classificadas utilizando-se o classificador por região estão apresentadas na Figura 5.1. Nesta figura, notou-se que não houve uma grande diferença entre as imagens classificadas a partir das imagens fração e NDVI para 4 datas (Figura 5.1a), utilização apenas das imagens fração das 4 datas selecionadas (Figura 5.1b), utilização das imagens fração do mês de agosto (Figura 5.1c) e imagem NDVI do mês de agosto (Figura 5.1d). Em todas as classificações testadas, observou-se que existe uma distinção clara entre pelo menos duas classes (a floresta e as formações de cerrado), que portanto são possíveis de se mapear.

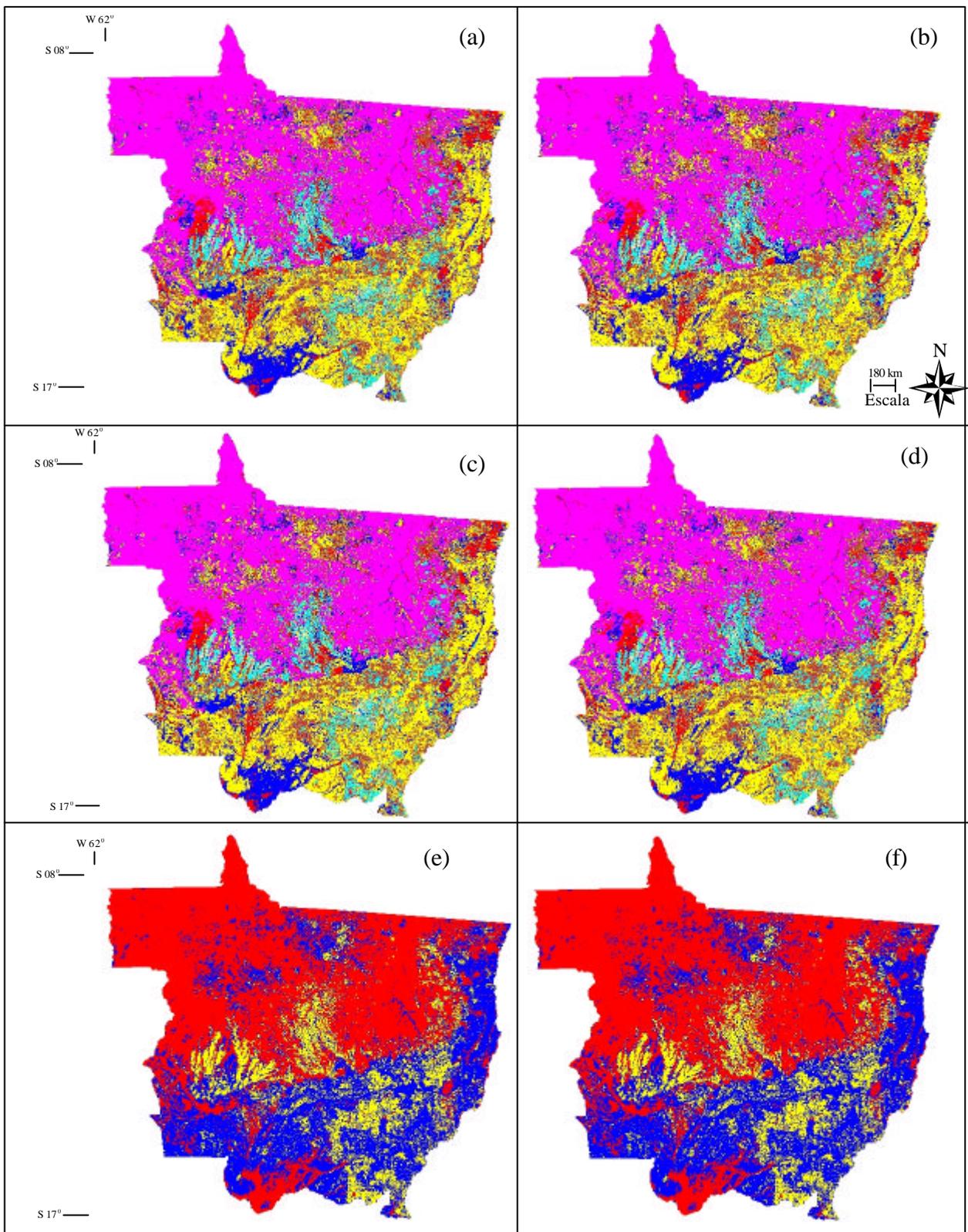


FIGURA 5.1 - Imagens classificadas a partir do algoritmo Isoseg, utilizando-se o limiar de 90% (dos itens a ao d), e 95% nos itens e e f, com diferentes combinações de cenas: (a) utilizou-se para a classificação as imagens fração e índice vegetação NDVI para as quatro datas selecionadas; (b) utilizou-se apenas as imagens fração referentes as 4 datas selecionadas; (c) utilizou-se as imagens fração do mês de agosto, (d) utilizou-se a imagem NDVI referente ao mês de agosto; (e) utilizou-se as imagens fração referente ao mês de agosto, e (f) utilizou-se as imagens fração das 4 datas.

Na Figura 5.2 são mostrados alguns dos resultados de classificação obtidos com o classificador por pixel k-média. Nesta Figura, se observou que dependendo do limiar aplicado, encontrou-se uma grande confusão entre as classes de vegetação e o ruído gerado em pixels com cobertura de nuvem devido ao processo de mosaicagem das imagens.

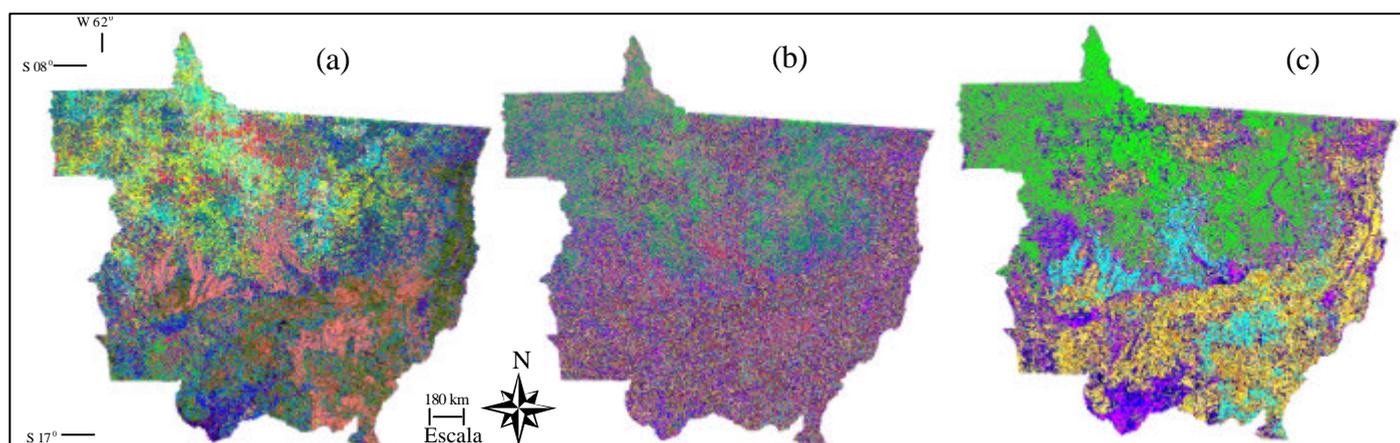


FIGURA 5.2 – Imagens classificadas utilizando-se o classificador pixel a pixel k-media com diferentes limiares: (a) classificação das imagens fração do mês de agosto, 40 temas e 10 iterações; (b) classificação das imagens fração do mês de agosto, 25 temas e 10 iterações; (c) classificação das imagens fração do mês de agosto, 10 temas e 10 iterações.

A caracterização das classes mapeadas da cobertura da terra em dois períodos distintos (época seca e época chuvosa) podem ser observados na Figura 5.3:

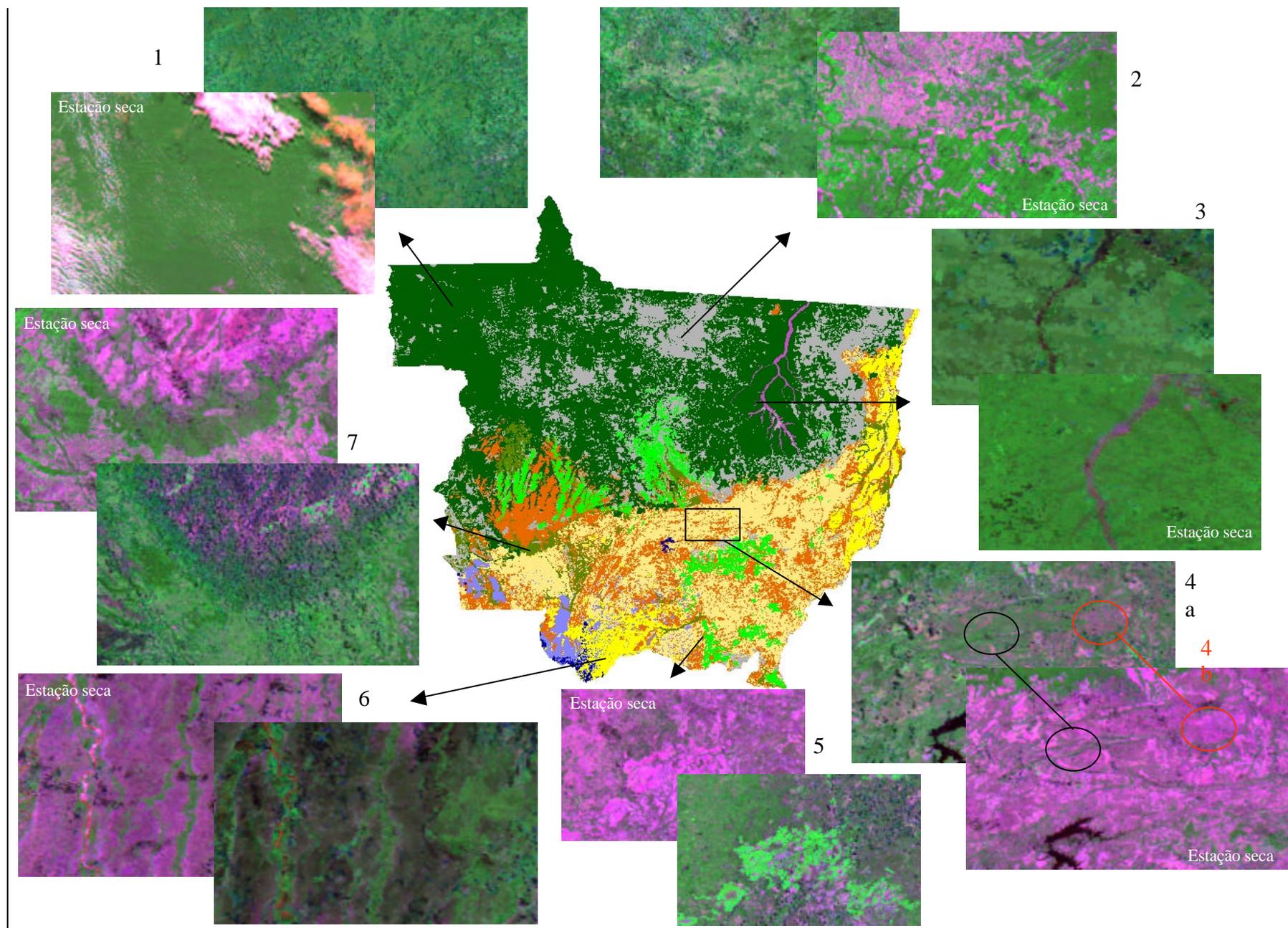


FIGURA 5.3 – Característica das formações vegetais classificadas, exibindo a sazonalidade das classes na época de chuvas e no período de seca.

A partir dos pontos de GPS coletados durante o trabalho de campo, foi realizada uma análise visual de concordância entre as áreas mapeadas e as fisionomias de Floresta Ombrófila Aberta, Savanas e cultura de soja, validando assim o mapeamento destas áreas. As áreas onde foram coletados pontos de desmatamentos e de floresta manejadas não entraram nesta análise pois não foram mapeados.

As estimativas de área dos temas classificados no mapa gerado foram:

Savana Parque: 42.493 km²;

Savana Arbóreo Aberta: 114.256 km²;

Savana Gramíneo-lenhosa: 152.466 km²;

Floresta Ombrófila Aberta: 354.756 km²;

Formações Pioneiras: 4.529 km²;

Contato entre Floresta Ombrófila Aberta e Savanas: 30.722 km²;

Áreas antropizadas: 135.980 km²;

Soja: 41.198 km²;

Lagos Permanentes: 2.780 km²;

Área inundada na época de chuva: 16.297 km²;

Para analisar de uma maneira mais clara a contribuição de cada classe detectada para a área total do Estado do Mato Grosso, organizou-se os dados da seguinte forma (Figura 5.4):

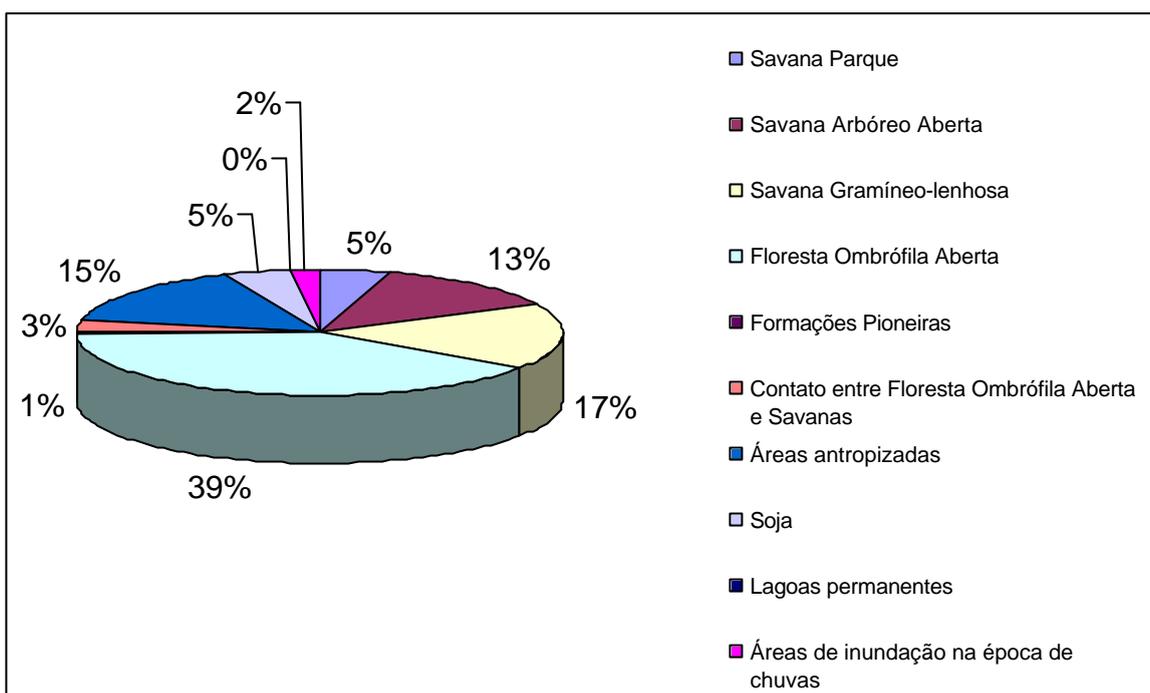


FIGURA 5.4 – Porcentagem da contribuição de cada uma das classes mapeadas para a cobertura da terra do Estado do Mato Grosso.

Na Figura 5.4 observa-se que a formação de Floresta Ombrófila Aberta ocupa 39% da cobertura vegetal da área de estudo, enquanto que a formação de Savana Gramíneo-lenhosa, a segunda formação com maior representatividade no Estado, ocupa uma área de 17%, seguida das áreas antropizadas, que ocupa 15% da cobertura do solo. A estimativa das áreas antropizadas não contabilizou as áreas de soja plantadas, pois foi possível separar no processo de classificação estes dois tipos de uso da terra, no entanto, se juntarmos as áreas de soja com as áreas antropizadas, temos uma área total de conversão da cobertura da terra pelo homem de 20% da área total do Estado.

As classes localizadas na região sul do Estado foram divididas entre áreas de Savana Parque (áreas que podem sofrer o processo de alagamento na época das chuvas), áreas permanentemente alagadas e áreas alagadas no período das cheias. As áreas que permanecem alagadas na época das chuvas possuem o tipo de formação vegetal de Savana Parque, e assim, pode-se contabilizar então uma área de 7% do Estado ocupado por esta formação vegetal.

A metodologia adotada neste trabalho, para a fase de edição da classe de soja, contou com um mosaico referente aos meses de chuva do ano todo, ou seja, de janeiro a abril e de outubro a dezembro, utilizando-se o valor máximo de NDVI. O objetivo de se utilizar este mosaico para a edição da classe de soja foi contabilizar o total de área de soja que havia sido plantada durante o ano de 2002. Geralmente os dados relacionados à área de cultivo agrícola são apresentados em hectares, para a análise da cultura da soja, utilizou-se esta mesma unidade. O total de área de soja mapeada através da metodologia adotada foi de 4.119.851 ha, e comparando-se com os dados fornecidos pelo IBGE para a safra 2001/02 (CONAB,2003), foram plantados 3.824.000 ha. Esta diferença pode ser devido o mapeamento realizado neste trabalho levar em consideração as imagens de setembro a dezembro de 2002, que só seriam contabilizadas pelo IBGE na safra 2002/03, que foi uma área de 4.460.000 ha. O resultado encontrado apresenta-se bastante consistente nesse sentido, por ser um valor intermediário entre as áreas contabilizadas nos dois anos safra. Assim, a área mapeada de soja plantada para o ano de 2002 provavelmente agregou novas áreas de soja, que só foram contabilizadas pelo IBGE na safra 2002/03.

Para a análise da proporção de cultura de soja em áreas de savana e em áreas de floresta, utilizou-se como limite entre as duas formações a máscara de não-floresta do PRODES. Analisando-se as áreas com formações Savânicas (Figura 5.5a), observou-se que foram mapeadas 3.613.813 ha de soja, do total de 4.119.851 ha plantados, ou seja, 506.037 ha de soja foram plantados em áreas em que a cobertura vegetal era de florestas (Figura 5.5b). A porcentagem final mostra que 88% da área plantada de soja está sobre a região de formações de cerrado, e 12% da área plantada está sobre as áreas de florestas convertidas (Figura 5.5c).

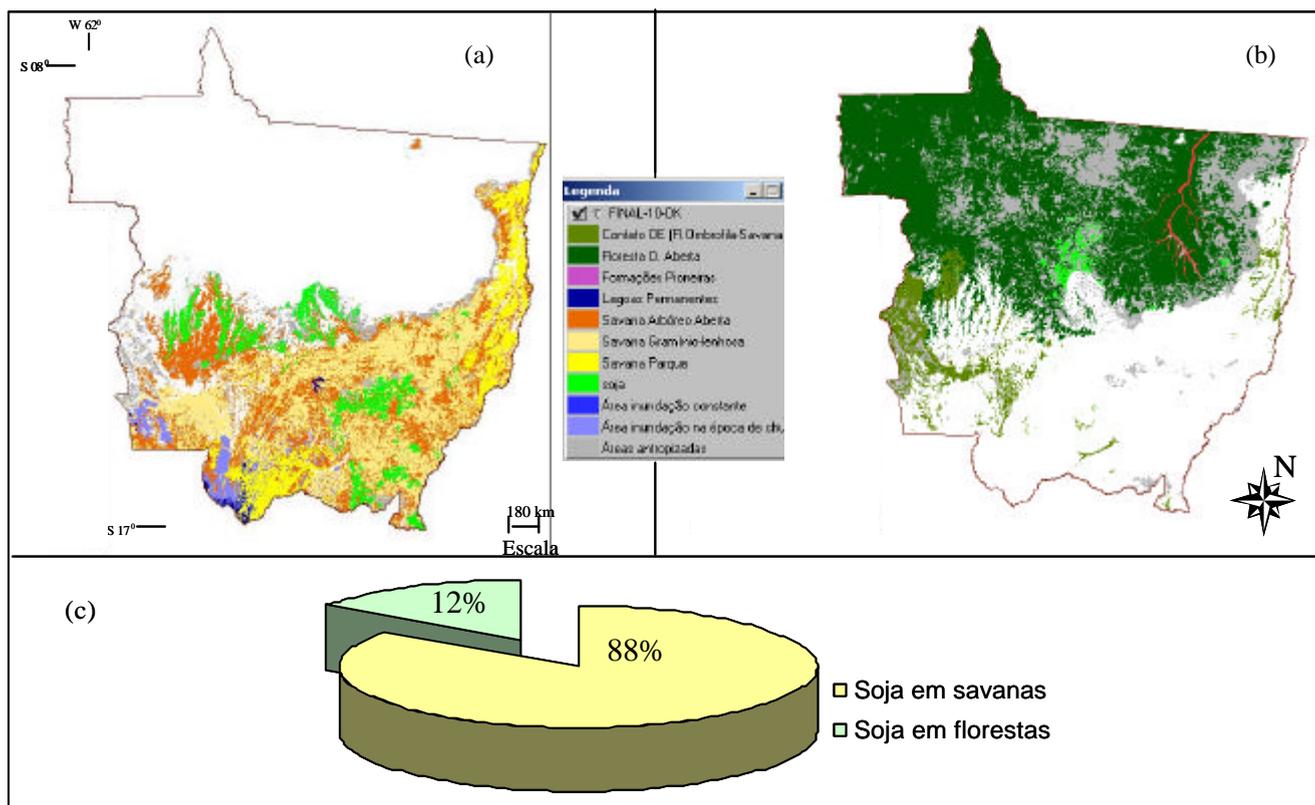


FIGURA 5.5 - Ocupação da soja em áreas de savanas e floresta: (a) Mapa da cobertura da terra, mostrando apenas as formações savânica e a ocupação da soja sobre estas áreas; (b) Mapa da cobertura da terra, mostrando apenas as formações florestais e a ocupação da soja sobre estas áreas; (c) gráfico da porcentagem da ocupação da soja sobre áreas savânicas e florestais.

Do total de áreas antropizadas, que foram mapeadas em 16% da área total do Estado, não foi possível estabelecer com exatidão o quanto destas áreas foram alteradas em áreas de cerrados e florestas, pois uma grande parte desta ocupação está sobre a região de contato entre os dois tipos de vegetação, e não existe um limite claro entre eles (Figura 5.6). Uma possível solução para a delimitação entre os dois tipos de formação com uma maior acurácia, seria a utilização integrada do mapa de solos do Estado que, no entanto, não foi adquirido para esta pesquisa.

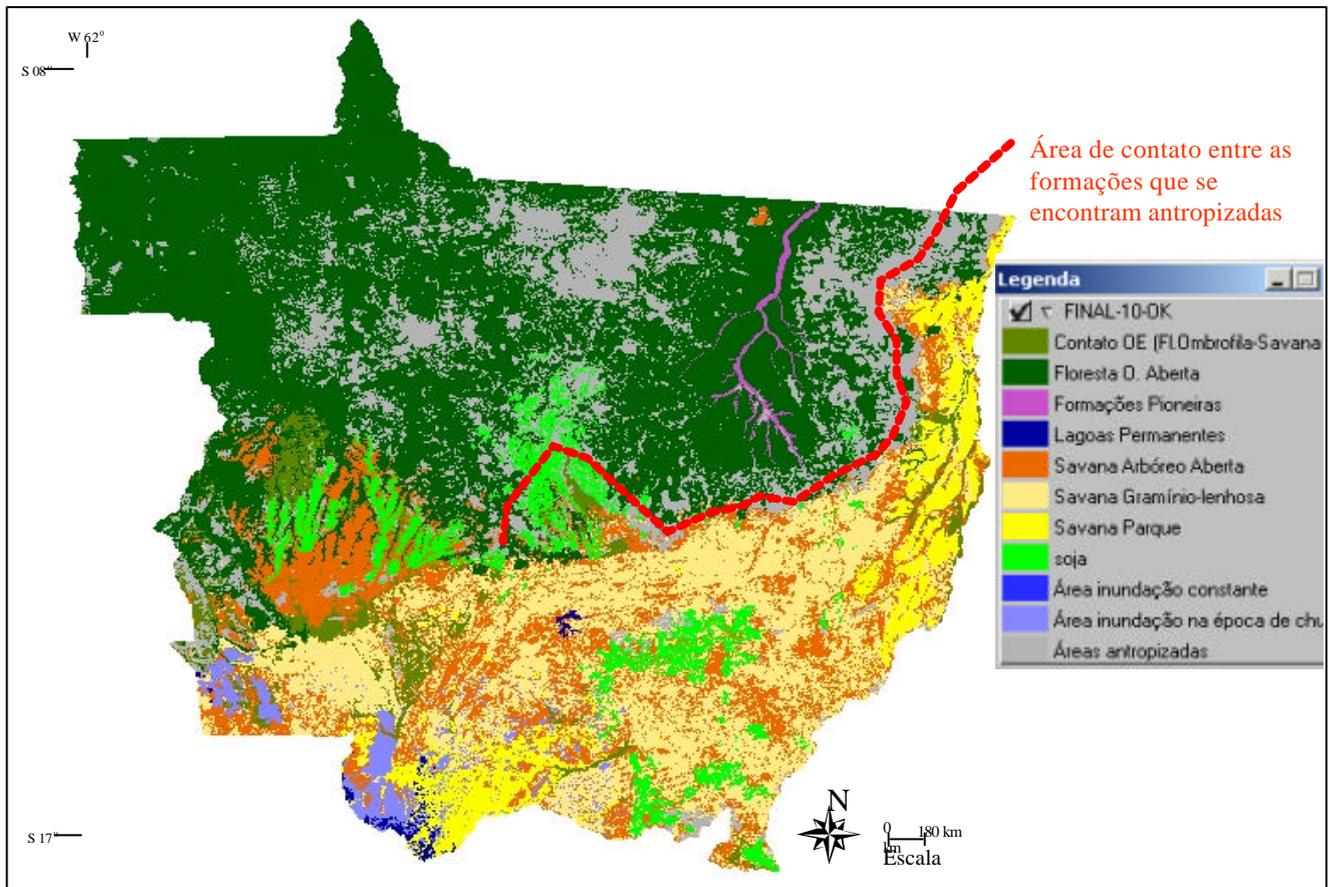


FIGURA 5.6 – Mapa da cobertura da terra exibindo, em linha vermelha, as áreas antropizadas localizadas entre as regiões de floresta e cerrado.

As análises dos dados do PRODES mostraram uma área de não florestas de 406.544 km², enquanto que somando-se as classes de não florestas mapeadas, temos uma área de 538.055 km². Para a comparação entre as áreas desflorestadas exibidas pelo PRODES e as áreas desflorestadas mapeadas, realizou-se um mosaico da máscara de não floresta para o mapa da cobertura gerado (Figura 5.6). Os dados do PRODES apontam um desflorestamento de 180.680 km², enquanto que se somando as áreas antropizadas e as áreas de cultura de soja em florestas encontram-se uma área de 114.083 km². Esta diferença é devido ao fato de algumas áreas apontadas como desflorestadas pelo PRODES terem sido classificadas como outro tipo de cobertura da terra (savanas) (Figura 5.7).

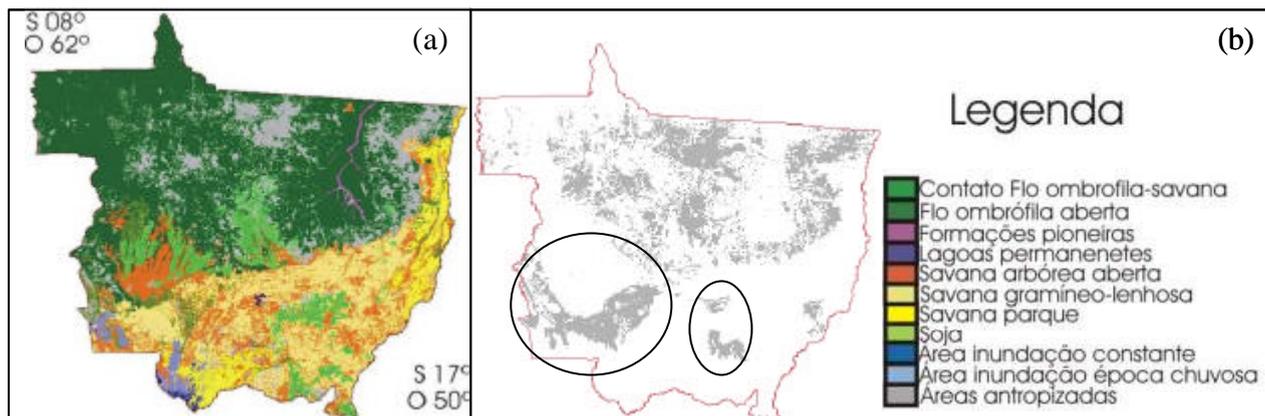


FIGURA 5.7 – Em (a) mapa da cobertura da terra para o ano de 2002, gerado a partir de dados MODIS; em (b) máscara de desflorestamento total do Estado do Mato Grosso até o ano de 2002, e circulado em cor preta, apresentam-se as áreas que foram classificadas como outro tipo de cobertura da terra no mapa gerado neste estudo.

A análise do mapa de vegetação integrada aos mapas de precipitação e altimetria gerados teve como objetivo melhorar a caracterização das áreas mapeadas.

As regiões onde predominam as formações de Savana Parque encontram-se em até 300 metros de altitude. Na região oeste do Estado, existe uma grande concordância entre os limites desta formação vegetal e o limite do mapa de altimetria (Figura 5.8a). Na região sul do Estado, onde esta localizada a região do pantanal, existe uma pequena área com altitude de até 100 metros que não foi classificada como área de inundação (Figura 5.8b). Isto pode ter ocorrido devido ao regime de chuvas do ano de 2001/2002. A precipitação acumulada para esta área do Estado foi a mais baixa de toda a região para o ano de 2002, variando de 727 mm a 1077 mm de chuva (Figura 5.8c).

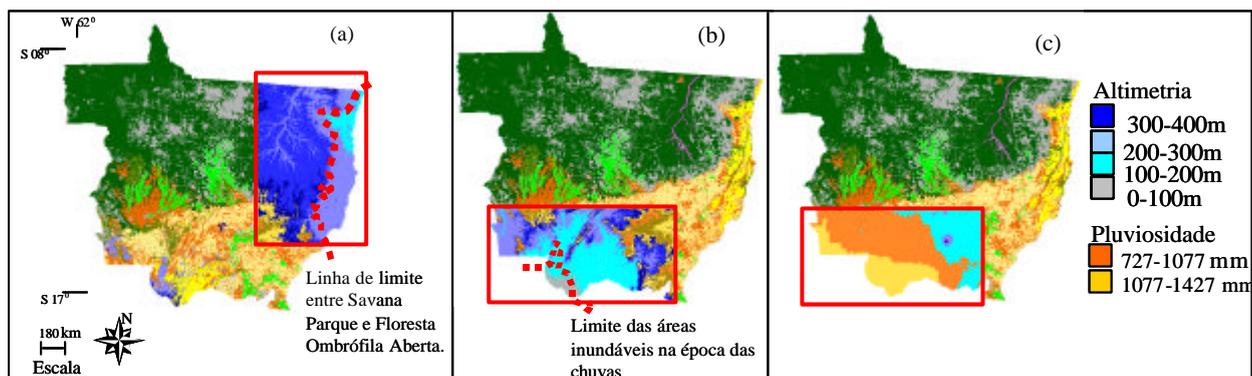


FIGURA 5.8 - Análise visual do mapa da cobertura da terra para o ano de 2002 em relação aos mapas de altimetria e pluviosidade para a Formação Savana Parque: (a) Comparação dos limites entre Savana Parque (mapa de vegetação) e relevo com até 300 metros acima do nível do mar (detalhe sobreposto ao mapa de vegetação); (b) comparação entre os limites das áreas de baixa altitude (0-100m) no detalhe, e as áreas inundadas na época das chuvas mapeadas para o ano de 2002 (linha em vermelho) sobre o mapa de vegetação gerado; (c) mapa de pluviosidade sobre o mapa de vegetação, mostrando a taxa mais baixa encontrada no Estado, com base nos dados do ano de 2002.

As formações de Savana Arbórea Aberta (SAA) e Savana Gramíneo-lenhosa (SGL) ocorrem em altitudes maiores que a da Savana Parque. Enquanto que a SAA ocorrem em altitudes entre 400 e 900 metros, a SGL pode ocorrer de 100 a 1000 metros de altitude.

Estas duas Formações apresentam-se bastante antropizadas devido à presença da soja, principalmente em altitudes maiores que 400 metros, em platôs (Figura 5.9).

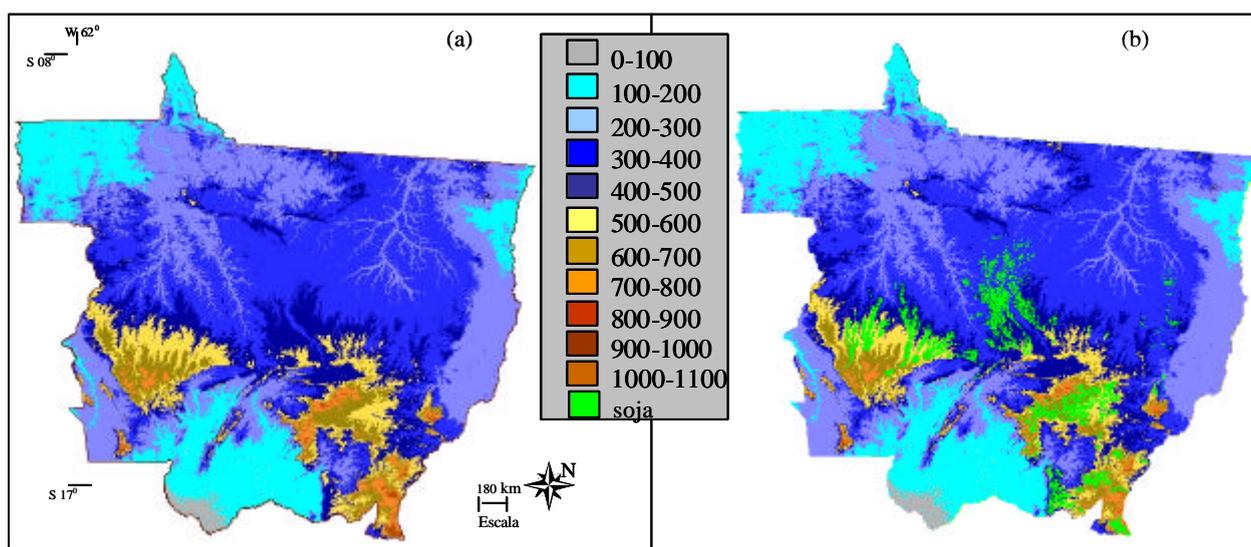


FIGURA 5.9 - Mapa de altimetria do Estado do Mato Grosso (a) e o mapa com a cultura da soja mosaificada sobre ele (b).

A área ocupada com as formações e uso citados acima está localizada na região entre 1427 e 1777 mm de chuva, sendo que esta representa a terceira classe em quantidade de chuvas acumuladas durante o ano de 2002.

As áreas ocupadas pela Floresta Ombrófila Aberta estão sobre uma área com altitudes de 100 a 400 metros, apresentando um núcleo mais chuvoso localizado na região do extremo Norte do Estado. A região que apresenta as Formações Pioneiras, esta localizada entre as altitudes de 200 e 300 metros e apresenta a mesma precipitação anual encontrada para as áreas de Floresta Ombrófila.

5.2 Monitoramento da Cobertura da Terra

5.2.1 Comportamento Fenológico da Vegetação

Diversos trabalhos na literatura são relacionados à relação entre índices de vegetação e a sazonalidade, conforme citado na fundamentação teórica. Neste trabalho, foi realizada uma análise temporal intraanual para a caracterização das respostas de diferentes fisionomias, aos índices de vegetação, fornecidos pelos dados MODIS. Analisou-se também a possível variabilidade das formações vegetais classificadas como mesma classe em diferentes regiões no Estado do Mato Grosso, e sua relação com a precipitação.

Batista et al. (1994) analisaram a resposta para diferentes formações vegetais na região Amazônica, a partir do NDVI de imagens NOAA/AVHRR. Para a região de Floresta Ombrófila Aberta, os valores obtidos por Batista et al. (1997) (média mensal para um período de 10 anos) foi 0,53. Rodriguez Yi (1998), utilizando NDVI gerados a partir de dados NOAA/AVHRR para um período de 2 anos, encontrou um valor médio de 0,38. O resultado obtido nesta pesquisa, para esta mesma formação vegetal mostrou um valor médio anual (somente para o ano de 2002) de 0,86 para o NDVI e 0,53 para o EVI (Tabela 5.1). A diferença encontrada entre estes estudos pode ser devido a dois componentes: intervalos das séries temporais utilizadas e características do sensor/dado. O estudo de Batista et al. (1994) utilizou dados de 1981 a 1991, que incluíram dois anos do Evento El Niño (1982/83 e 1986/87), e segundo os autores, afetou os padrões de

precipitação e a resposta da vegetação, mostrada através de valores NDVI mais baixos que nos anos com precipitação normal. Rodriguez Yi (1998) utilizou 6 imagens entre os anos de 1992 e 1994 referentes à estação seca. Na literatura encontra-se que para regiões de floresta sempre verde, não há uma grande variação nos valores de NDVI entre as estações de seca e de chuva. A outra componente que pode ter contribuído para os resultados encontrados nos dois trabalhos acima é em relação aos dados de satélite, que podem inserir erros devido a possível degradação do sensor AVHRR ao longo do período, erro de navegação, atenuação atmosférica, etc. (Los, 1993; Gutman e Ignatov, 1995).

A diferença entre os resultados dos trabalhos citados acima, e os resultados desta pesquisa aponta que o NDVI encontrado apresenta valores mais altos que os da literatura. Isso pode ser devido a duas razões: uma é em relação à série temporal, que neste trabalho utilizou-se apenas os dados intra-anual, enquanto que os outros trabalhos citados apresentam dados inter-anuais, podendo estar sob efeito de fenômenos como El Niño, ou anos com taxa de precipitação anormal. O outro fator apontado para o valor do NDVI ser mais alto neste trabalho está relacionado com as características do sensor e dos dados. As bandas utilizadas para gerar NDVI apresentam uma melhor resolução espacial de 250m, e estão posicionadas no espectro eletromagnético de forma a garantir uma melhor resposta sobre os alvos sensoriados. Além disso, os dados do MODIS utilizados para gerar as imagens NDVI apresentam uma melhor correção atmosférica. Estes fatores aliados podem ter contribuído para que a resposta do NDVI seja mais alta que nos outros trabalhos descritos na literatura.

TABELA5.1 – Média Mensal dos Valores NDVI e EVI para a Série Temporal Estudada, para a Formação Floresta Ombrófila Aberta.

CLASSE	MÊS	VALORES DE NDVI		VALORES DE EVI	
		Média	Des Pad	Média	Des Pad
Floresta O. Aberta	Jan	0,89	0,08	0,55	0,13
Média anual NDVI: 0,86	Fev	0,89	0,06	0,53	0,12
Média anual EVI: 0,53	Mar	0,88	0,06	0,53	0,11
	Abr	0,86	0,07	0,50	0,09
	Mai	0,85	0,07	0,48	0,08
	Jun	0,84	0,08	0,47	0,07
	Jul	0,84	0,11	0,48	0,10
	Ag	0,85	0,11	0,56	0,13
	Set	0,85	0,10	0,59	0,11
	Out	0,84	0,09	0,54	0,10
	Nov	0,86	0,09	0,57	0,12
	Dez	0,83	0,12	0,57	0,13

Na Figura 5.10, apresenta-se a variação do NDVI para a classe Floresta Ombrófila Aberta, para o ano de 2002.

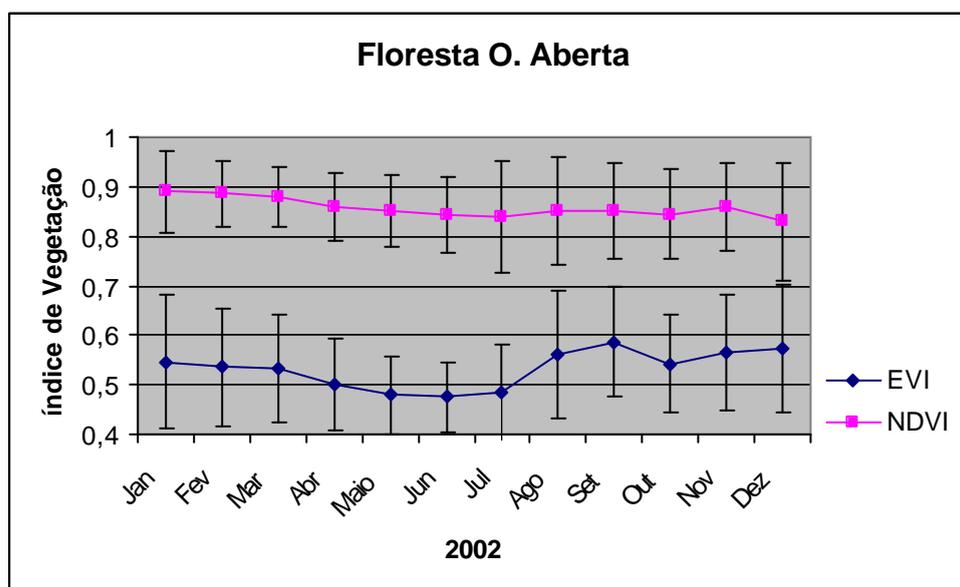


FIGURA 5.10 - Variação do NDVI e EVI (+ 1 desvio padrão) para a classe Floresta Ombrófila Aberta para o ano de 2002.

Conforme o esperado, não existe uma grande variação da resposta da vegetação ao NDVI devido à estrutura da vegetação, composição florística e disponibilidade de água constante durante o ano. Observando-se a curva para os valores do EVI (gráfico da Figura 5.10) notou-se que os valores mensais deste índice apresentam uma maior variação durante o ano. Estes valores apresentam-se também mais baixos que os valores de NDVI. Esta característica persistiu em todas as classes analisadas, e, além disso, nota-se uma elevação dos valores entre os meses de agosto e outubro, característica também observada nas outras classes analisadas. Estes resultados apresentados pelo índice EVI provavelmente foram devidos à presença de nuvens e a correção atmosférica.

Na Figura abaixo (Figura 5.11), observa-se o resultado dos testes de Tukey e de correlação realizados para a classe Floresta Ombrófila Aberta:

Tukey HSD test; variable EVI (Floresta)				Tukey HSD test; variable NDVI (Floresta)				Área 1	coef correl	1 mês	2 meses
Probabilities for Post Hoc Tests				Probabilities for Post Hoc Tests				EVI	0,41	0,04	-0,17
MAIN EFFECT: AREA				MAIN EFFECT: AREA				NDVI	0,28	0,33	-0,10
	{1}	{2}	{3}		{1}	{2}	{3}	Área 2	coef correl	1 mês	2 meses
	197,7801	196,5215	196,2008		240,766	240,2790	239,8854	EVI	0,02	-0,32	-0,54
1 {1}		0,65	0,51	1 {1}		0,69	0,30	NDVI	0,06	0,36	0,15
2 {2}	0,65		0,97	2 {2}	0,69		0,78	Área 3	coef correl	1 mês	2 meses
3 {3}	0,51	0,97		3 {3}	0,30	0,78		EVI	0,31	0,01	-0,40
								NDVI	0,25	0,09	-0,11
Floresta Norte	Floresta Centro	Floresta Xingu									
Área 1	Área 2	Área 3									

FIGURA 5.11 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Floresta Ombrófila Aberta e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

Na Figura 5.11 observou-se que não existe uma diferença significativa entre as três áreas amostradas, ou seja, o comportamento da vegetação, tanto a partir de dados NDVI como EVI, é similar, e podemos considerar que se trata do mesmo tipo de formação vegetal nestas áreas. Em relação à resposta da vegetação a precipitação, tanto para o mesmo mês quanto se levando em consideração a defasagem da resposta para 1 e 2 meses, os coeficientes de correlação apresenta-se bastante baixos, indicando que as variações das taxas mensais de precipitação não influenciam na resposta medida através dos índices.

Para as formações Savânicas, Batista et al.(1994) encontraram um valor médio de NDVI de 0,36 e 0,41. Du Pleiss (1999) estudou diversas formações de savanas na Namíbia, e encontrou valores de NDVI variando de 0,02 a 0,4 para o período de outubro de 1994 a abril de 1995. Rodriguez Yi (1998) encontrou o valor médio de 0,27 para a área mapeada como savana. Neste estudo, encontrou-se o valor de NDVI variando de 0,51 para Savana Gramíneo-lenhosa no mês de agosto até 0,85 para Savana Parque no mês de janeiro (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 – Média Mensal dos Valores NDVI e EVI para a Série Temporal Estudada, para as Formações Savânicas

CLASSE	MÊS	VALORES DE NDVI		VALORES DE EVI	
		Média	Des Pad	Média	Des Pad
Savana Gramíneo-lenhosa	Jan	0,81	0,10	0,50	0,14
Média anual NDVI:0,67	Fev	0,78	0,09	0,46	0,11
Média anual EVI: 0,40	Mar	0,78	0,09	0,46	0,11
	Abr	0,72	0,10	0,41	0,10
	Mai	0,67	0,11	0,38	0,09
	Jun	0,64	0,11	0,36	0,09
	Jul	0,55	0,13	0,30	0,08
	Ag	0,51	0,13	0,27	0,08
	Set	0,58	0,13	0,36	0,11
	Out	0,61	0,12	0,37	0,11
	Nov	0,66	0,13	0,42	0,12
	Dez	0,74	0,12	0,48	0,13
Savana Parque	Jan	0,85	0,10	0,43	0,16
Média anual NDVI:0,73	Fev	0,84	0,09	0,40	0,15
Média anual EVI: 0,39	Mar	0,83	0,09	0,40	0,14
	Abr	0,77	0,11	0,39	0,12
	Mai	0,74	0,11	0,38	0,10
	Jun	0,73	0,11	0,38	0,10
	Jul	0,66	0,14	0,33	0,11
	Ag	0,64	0,16	0,33	0,12
	Set	0,65	0,18	0,40	0,15
	Out	0,66	0,16	0,39	0,14
	Nov	0,69	0,15	0,43	0,15
	Dez	0,75	0,14	0,47	0,16
Savana Parque/Área inundação na época de chuva	Jan	0,83	0,09	0,38	0,13
Média anual NDVI:0,73	Fev	0,85	0,08	0,35	0,13
Média anual EVI: 0,37	Mar	0,85	0,08	0,35	0,13

Continua

TABELA 5.2 – Conclusão.

	Abr	0,79	0,09	0,36	0,11
	Mai	0,75	0,08	0,36	0,09
	Jun	0,73	0,09	0,36	0,08
	Jul	0,64	0,11	0,31	0,07
	Ag	0,62	0,11	0,32	0,08
	Set	0,67	0,11	0,42	0,12
	Out	0,66	0,11	0,40	0,12
	Nov	0,67	0,13	0,41	0,13
	Dez	0,75	0,12	0,46	0,14
Savana Arbóreo Aberta	Jan	0,84	0,10	0,50	0,14
Média anual NDVI:0,73	Fev	0,82	0,08	0,46	0,12
Média anual EVI: 0,42	Mar	0,82	0,08	0,46	0,11
	Abr	0,77	0,10	0,42	0,10
	Mai	0,73	0,10	0,39	0,09
	Jun	0,71	0,10	0,38	0,08
	Jul	0,65	0,13	0,34	0,09
	Ag	0,62	0,13	0,34	0,10
	Set	0,66	0,12	0,41	0,12
	Out	0,68	0,12	0,41	0,11
	Nov	0,73	0,12	0,46	0,13
	Dez	0,77	0,12	0,50	0,13

O valor médio de NDVI para as formações savânicas mapeadas foi de 0,72. Estes valores apresentam-se consideravelmente mais altos que os dos estudos citados acima principalmente devido à utilização das imagens referentes aos meses chuvosos. Ao contrário das florestas, as savanas apresentam grande variação na sua sazonalidade nas épocas chuvosas e secas (Figura 5.12).

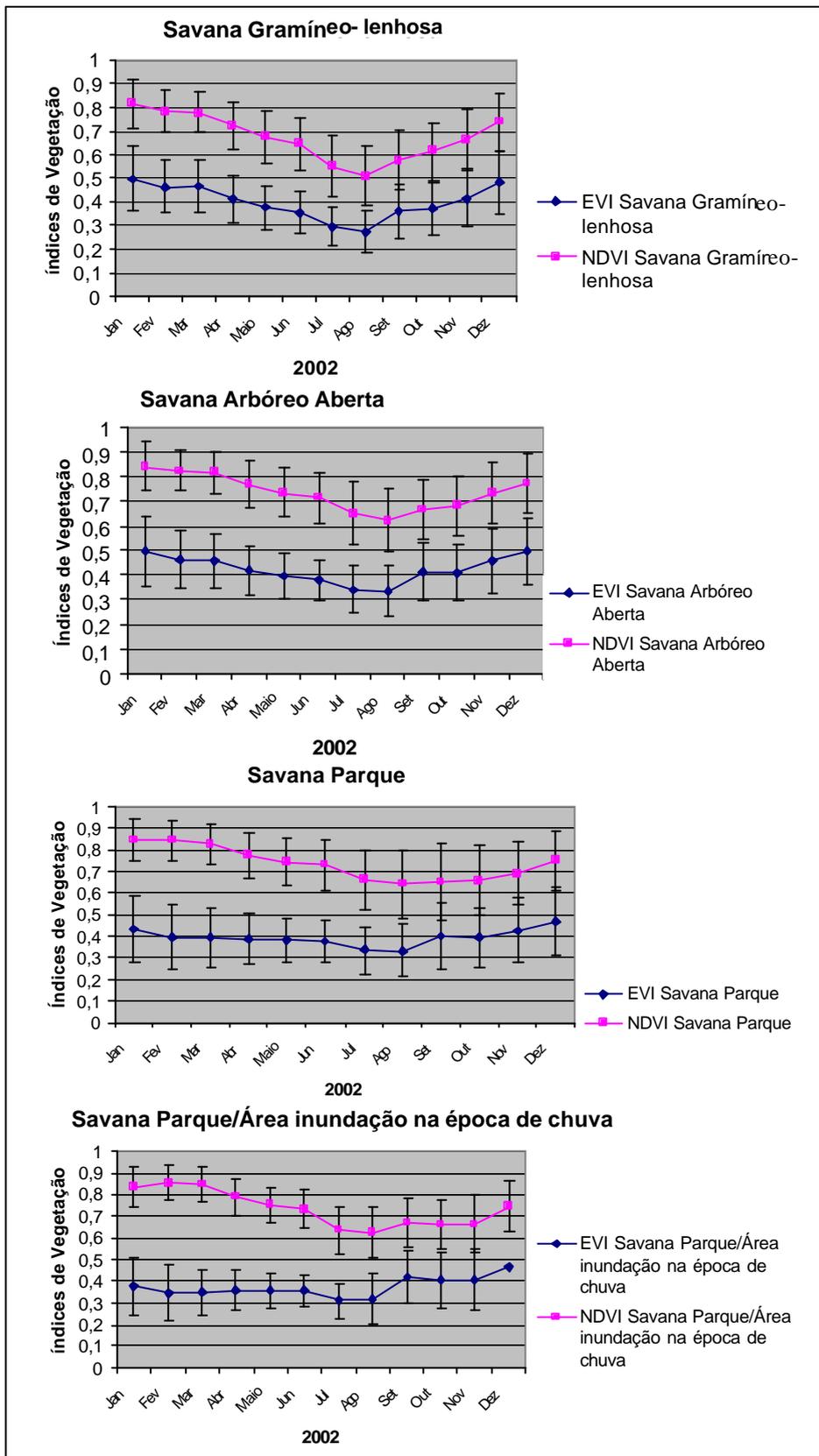


FIGURA 5.12 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para as classes Savana Gramíneo-lenhosa, Savana Parque, Savana Parque em áreas inundadas no período chuvoso de 2002, e Savana Arbórea Aberta, para o ano de 2002.

As variações dentro desta classe podem ser avaliadas com base no teste de Tukey, Figura 5.13. Nesta mesma figura, mostra-se também a resposta destas duas áreas amostradas para esta classe, em relação à precipitação.

Tukey HSD test; variable EVI (Savana Gramíneo-lenhosa)		Tukey HSD test; variable NDVI (Savana Gramíneo-lenhosa)						
Probabilities for Post Hoc Tests		Probabilities for Post Hoc Tests						
MAIN EFFECT: AREA		MAIN EFFECT: AREA		Área1	coef correl	1 mês	2 meses	
	{1}	{2}	{1}	{2}	EVI			
	171,9179	188,6275	203,2971	221,0629	NDVI	0,84	0,88	0,66
1	{1}	0,0001	1	{1}		0,77	0,91	0,79
3	{2}	0,0001	3	{2}	0,000105			
					Área 2	coef correl	1 mês	2 meses
					EVI	0,59	0,48	0,28
					NDVI	0,77	0,48	0,72
SGL centro	SGL leste							
Área 1	Área 2							

FIGURA 5.13 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Gramíneo-lenhosa e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

O resultado do teste de Tukey, apresentado na Figura 5.13, mostra que existe diferença significativa entre as duas áreas de Savana Gramíneo-lenhosa, tanto a partir de dados NDVI quanto EVI. Esta diferença pode estar associada ao padrão de precipitação e a altitude de cada uma das áreas amostradas. Na área 1, as amostras estão localizadas entre 100 e 300 metros de altitude, com uma precipitação anual para o ano de 2002 entre 1077 e 1427 mm. Já na área 2, as amostras tomadas estão em uma altitude de 300 a 600 metros, enquanto que a precipitação para o ano de 2002 variou de 1077 a 1777 mm. O coeficiente de correlação que melhor explicou a relação entre os índices de vegetação e a precipitação foi para o NDVI com 1 mês de defasagem na área 1 (NDVI - $r = 0,91$) e para o NDVI relacionado a precipitação do mesmo mês na área 2 (NDVI - $r = 0,77$).

Para a Formação Savana Arbórea Aberta, os resultados obtidos no teste Tukey e nas correlações entre esta formação e a precipitação estão na Figura 5.14. Nesta Figura, observou-se que, com base nas imagens EVI, existem diferenças significativas entre as três áreas amostradas, enquanto que a partir de dados NDVI, as áreas 2 e 3 não apresentam diferenças significativas. As amostras adquiridas na área 1 estão em uma altitude entre 500 e 800 metros, enquanto que as amostras adquiridas na área 2 estão em altitudes entre 100 e 500 metros e na área 3 entre 500 e 900 metros de altitude.

Analisando-se o mapa de precipitação gerado, observou-se que as amostras da área 1 estão sob um regime pluviométrico diferente daquele encontrado nas áreas amostradas 2 e 3 (área 1: 1427-1777mm; área 2 e 3:1077-1427mm). Este diferente padrão de precipitação provavelmente ocasionou a diferença na resposta deste tipo de vegetação, sendo detectado como um padrão diferente na análise de Tukey. Analisando-se a relação entre estas áreas e os dados de precipitação, observou-se que para as três áreas amostradas, o resultado que melhor explicou a relação entre a precipitação e os índices de vegetação foi o NDVI com 1 mês de defasagem (área 1: $r = 0,92$; área 2: $r = 0,92$; área 3: $r = 0,88$).

Tukey HSD test; variable EVI (Savana Arbórea Aberta)				Tukey HSD test; variable NDVI (Savana Arbórea Aberta)							
Probabilities for Post Hoc Tests				Probabilities for Post Hoc Tests							
MAIN EFFECT: AREA				MAIN EFFECT: AREA				Área 1	coef	correl 1mês	2 meses
	{1}	{2}	{3}		{1}	{2}	{3}	EVI			
	162,8191	175,9147	182,6161		204,9768	218,8743	222,6125	0,58	0,47	0,29	
1 {1}		2,2E-05	2,18153E-05	1 {1}		0,00	0,00	0,77	0,92	0,81	
2 {2}	2,2E-05		0,000152826	2 {2}	0,00		0,26	Área 2	coef	correl 1mês	2 meses
3 {3}	2,2E-05	0,00015		3 {3}	0,00	0,26		EVI	0,87	0,87	0,67
								NDVI	0,78	0,92	0,85
								Área 3	coef	correl 1mês	2 meses
								EVI	0,83	0,86	0,71
								NDVI	0,77	0,88	0,86

SAA centro	SAA chapada	SAA sul
Área 1	Área 2	Área 3

FIGURA 5.14 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Arbórea Aberta e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

Para a Formação Savana Parque, os resultados do teste de Tukey apontaram uma diferença significativa entre as quatro áreas amostradas para os dados EVI, e apenas não detectou diferença significativa entre as áreas 1 e 4 com base nos dados NDVI (Figura 5.15).

Tukey HSD test; variable EVI (Savana Parque) Probabilities for Post Hoc Tests MAIN EFFECT: AREA				Tukey HSD test; variable NDVI (Savana Parque) Probabilities for Post Hoc Tests MAIN EFFECT: AREA				Área 1 coef correl 1mês 2 meses						
	{1}	{2}	{3}	{4}		{1}	{2}	{3}	{4}	EVI	0,83	0,94	0,79	
	180,7947	191,3696	161,3110	170,8968		219,3403	233,8778	206,7657	216,5206	NDVI	0,72	0,88	0,88	
1 {1}		7,7E-06	7,689E-06	7,868E-06	1 {1}		8,76E-06	4,38094E-05	0,74	Área 2 coef correl 1mês 2 meses	EVI	-0,10	-0,04	0,07
2 {2}	7,7E-06		7,689E-06	7,689E-06	2 {2}	8,8E-06		7,689E-06	7,689E-06	NDVI	0,66	0,89	0,96	
3 {3}	7,7E-06	7,7E-06		7,689E-06	3 {3}	4,4E-05	7,69E-06		0,0003097	Área 3 coef correl 1mês 2 meses	EVI	0,50	0,20	-0,06
4 {4}	7,9E-06	7,7E-06	7,689E-06		4 {4}	0,74	7,69E-06	0,000309706		NDVI	0,61	0,86	0,85	
										Área 4 coef correl 1mês 2 meses	EVI	0,11	0,28	-0,01
										NDVI	0,47	0,74	0,88	
SP Norte	SP Oeste	SP sul	SP sul alaga											
Área 1	Área 2	Área 3	Área 4											

FIGURA 5.15 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de Savana Parque e Coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

Na Figura 5.15, observou-se que para a Savana Parque, na área 1, o EVI foi o que explicou melhor a relação entre esta formação vegetal e os dados de precipitação com 1 mês de defasagem, obtendo-se um $r = 0,94$. Nas outras três áreas amostradas, o NDVI foi o índice que obteve melhor correlação com os dados de precipitação. Para a área 2, o resultado foi de $r = 0,96$ com dois meses de defasagem, na área 3, o $r = 0,86$ com 1 mês de defasagem e na área 4, o $r = 0,88$ com dois meses de defasagem.

As regiões de contato apresentaram um valor médio de 0,53 no estudo de Batista et al. (1994), valor igual ou mais alto que os apresentados nas áreas de floresta (0,49 para Floresta Densa; 0,52 para Floresta Densa Submontana; e 0,53 para Floresta Aberta) do mesmo estudo. Os resultados encontrados nesta pesquisa apontam um valor médio de NDVI de 0,82. Este valor é mais baixo que para as áreas de Floresta (NDVI médio=0,86) e mais alto que para as Formações Savânicas (NDVI médio=0,72). Os valores mensais para esta classe podem ser observados na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - Média Mensal dos Valores NDVI e EVI para a Série Temporal Estudada, para a Formação de Contato.

CLASSE	MÊS	VALORES DE NDVI		VALORES DE EVI	
		Média	Des Pad	Média	Des Pad
Contato OE (Fl.Ombrofila-Savana)	Jan	0,88	0,13	0,53	0,08
Média anual NDVI:0,82	Fev	0,87	0,12	0,50	0,07
Média anual EVI: 0,49	Mar	0,87	0,11	0,49	0,07
	Abr	0,83	0,10	0,47	0,08
	Mai	0,81	0,08	0,45	0,08
	Jun	0,80	0,07	0,44	0,08
	Jul	0,78	0,09	0,42	0,11
	Ag	0,77	0,11	0,45	0,11
	Set	0,78	0,11	0,52	0,10
	Out	0,78	0,11	0,50	0,10
	Nov	0,81	0,12	0,52	0,10
	Dez	0,82	0,13	0,55	0,11

Para melhor visualização da resposta da classe de Contato OE (Fl.Ombrófila-Savana), com base nos índices de vegetação, ao longo do ano de 2002, gerou-se a Figura 5.16.

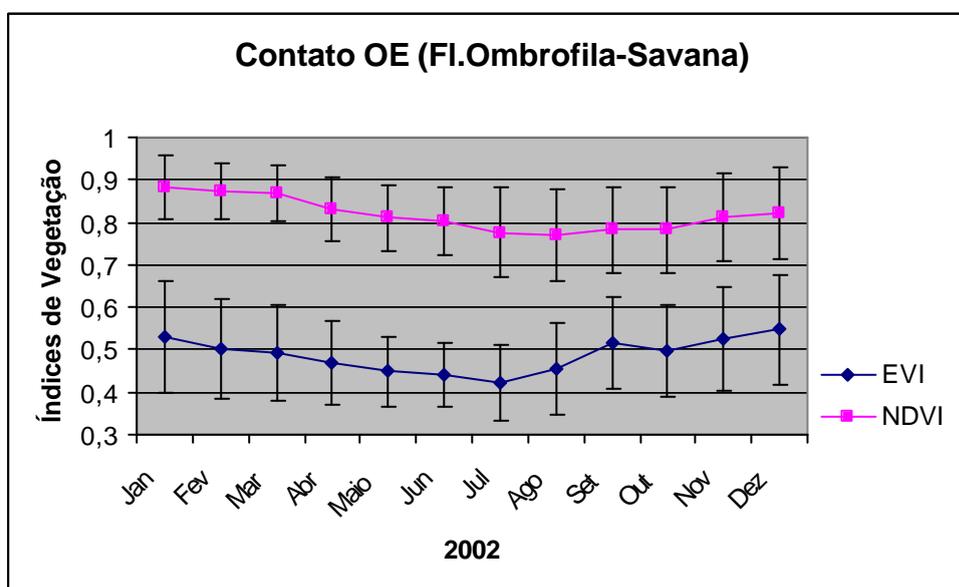


FIGURA 5.16 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a classe Contato OE (Fl.Ombrofila-Savana) para o ano de 2002.

Os resultados das análises do teste de Tukey para as áreas de contato podem ser observados na Figura 5.17. Nesta Figura observa-se que com base nos dados EVI, a área

3 apresenta-se diferente apenas da área 1, enquanto que a partir dos dados NDVI, não é detectada diferença significativa entre as três áreas amostradas.

Tukey HSD test; variable EVI (Contato FI.Om-Savana)				Tukey HSD test; variable NDVI (Contato FI.Om-Savana)							
Probabilities for Post Hoc Tests				Probabilities for Post Hoc Tests				Área 1	coef correl 1mês	2 meses	
MAIN EFFECT: AREA				MAIN EFFECT: AREA				EVI	0,61	0,33	-0,02
	{1}	{2}	{3}		{1}	{2}	{3}	NDVI	0,84	0,95	0,77
	190,4239	191,3710	187,4413		235,1908	234,1575	233,1457	Área 2	coef correl 1mês	2 meses	
1 {1}		0,71	0,08	1 {1}		0,56	0,19	EVI	0,34	-0,08	-0,45
2 {2}	0,71		0,01	2 {2}	0,56		0,66	NDVI	-0,22	0,23	0,54
3 {3}	0,08	0,01		3 {3}	0,19	0,66		Área 3	coef correl 1mês	2 meses	
								EVI	0,43	0,13	-0,14
								NDVI	0,74	0,93	0,68
	Contato centro-sul Área 1	Contato entre soja Área 2	Contato NL Área 3								

FIGURA 5.17 - Resultado do Teste Tukey para as áreas de contato e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

A correlação entre os índices de vegetação e a precipitação para as áreas de contato amostradas, apontaram, conforme se observou na Figura 5.17, uma melhor relação com os dados NDVI, sendo que para a área 1 e 3, a melhor resposta foi com 1 mês de defasagem ($r = 0,95$ e $r = 0,93$, respectivamente), na área 2, com dois meses de defasagem ($r = 0,54$).

A classe de vegetação identificada como Formações Pioneiras não foi discriminada em nenhum dos outros trabalhos referenciados acima, e a discussão dos resultados baseou-se apenas nos dados obtidos nesta pesquisa.

Na Tabela 5.4 apresenta-se os valores mensais de NDVI e EVI para esta classe para o ano de 2002.

TABELA 5.4 - Média Mensal dos Valores NDVI e EVI para a Série Temporal Estudada, para Formações Pioneiras.

CLASSE	MÊS	VALORES DE NDVI		VALORES DE EVI	
		Média	Des Pad	Média	Des Pad
Formações Pioneiras	Jan	0,85	0,11	0,48	0,11
Média anual NDVI:0,79	Fev	0,85	0,15	0,43	0,13
Média anual EVI: 0,42	Mar	0,84	0,16	0,43	0,15
	Abr	0,80	0,08	0,39	0,12
	Mai	0,79	0,10	0,40	0,15
	Jun	0,79	0,14	0,40	0,11
	Jul	0,77	0,12	0,40	0,11
	Ag	0,77	0,12	0,42	0,11
	Set	0,77	0,08	0,46	0,11
	Out	0,75	0,14	0,43	0,14
	Nov	0,77	0,14	0,45	0,12
	Dez	0,78	0,14	0,46	0,13

Para uma melhor visualização do comportamento da vegetação classificada como Formação Pioneira, gerou-se a Figura 5.18.

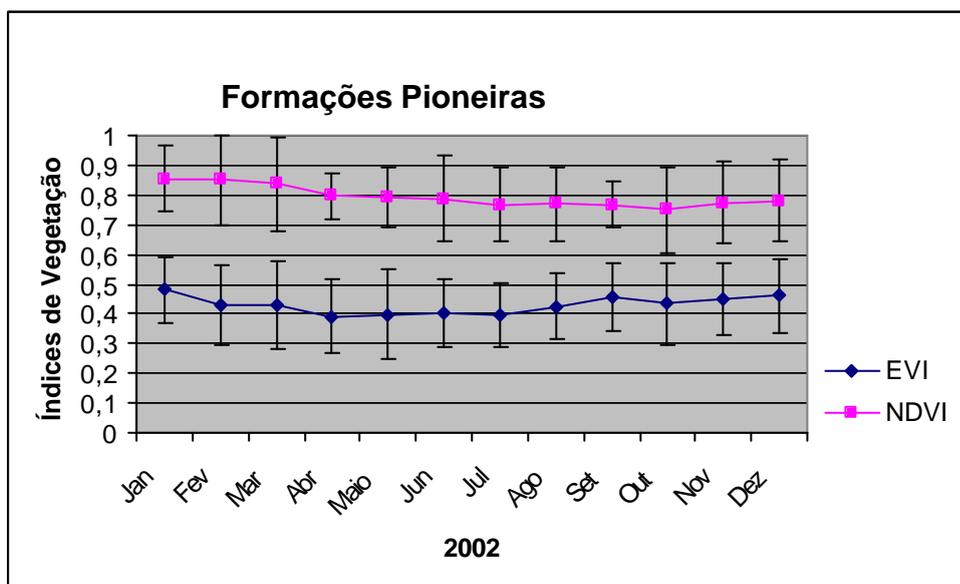


FIGURA 5.18 - Variação do NDVI e EVI (+- 1 desvio padrão) para a classe Formação Pioneira para o ano de 2002.

Os resultados das análises do teste de Tukey para as áreas de Formação Pioneira podem ser observados na Figura 5.19. Neste caso, trabalhou-se com as amostras independentemente devido à pequena extensão territorial desta formação. Nesta Figura

observou-se que com base nos dados EVI, que a amostra 1 é diferente das demais amostras coletadas, e com base nos dados NDVI a amostra 1 é diferente da amostra 3.

Tukey HSD test; variable EVI (Formações pioneiras)					Tukey HSD test; variable NDVI (Formações pioneiras)											
Probabilities for Post Hoc Tests					Probabilities for Post Hoc Tests											
MAIN EFFECT: AREA					MAIN EFFECT: AREA											
	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	{1}	{2}	{3}	{4}	{5}	Área 1	coef	correl	1mês	2 meses	
	194,1124	184,7578	183,7305	184,4148	186,2778	236,8643	233,8882	232,2360	233,4350	233,5115	EVI	0,31	-0,03	-0,39		
1 {1}		0,00054	0,00020647	0,0003648	0,0044	1	{1}	0,16	0,16	0,01	0,07	0,08	NDVI	0,32	0,51	0,54
2 {2}	0,00054		0,988416612	0,9998562	0,9513	2	{2}	0,16	0,70	1,00	1,00					
3 {3}	0,00021	0,98842		0,9976054	0,7487	3	{3}	0,01	0,70	0,88	0,86					
4 {4}	0,00036	0,99986	0,997605443		0,9027	4	{4}	0,07	1,00	0,88	1,00					
5 {5}	0,00443	0,95135	0,748747349	0,902735		5	{5}	0,08	1,00	0,86	1,00					

FIGURA 5.19 - Resultado do Teste Tukey para áreas de Formações Pioneiras, e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

A correlação entre os índices de vegetação e a precipitação para a área de Formação Pioneira amostrada, apontou uma melhor relação com os dados NDVI, para dois meses de defasagem ($r = 0,54$) (Figura 5.19).

Dentre as áreas antropizadas, foi possível separar apenas as áreas de cultura de soja das demais, onde se incluem áreas de agricultura e pastagem. O comportamento dos índices de vegetação para as áreas de soja pode ser observado na Tabela 5.5.

TABELA 5.5 - Média Mensal dos Valores NDVI e EVI para a Série Temporal Estudada, para as Áreas de Soja.

CLASSE	MÊS	VALORES DE NDVI		VALORES DE EVI	
		Média	Des Pad	Média	Des Pad
Soja	Jan	0,88	0,11	0,70	0,19
Média anual NDVI:0,60	Fev	0,77	0,15	0,55	0,20
Média anual EVI: 0,40	Mar	0,75	0,14	0,53	0,19
	Abr	0,64	0,18	0,41	0,17
	Mai	0,58	0,17	0,35	0,14
	Jun	0,52	0,16	0,30	0,12
	Jul	0,36	0,15	0,19	0,09
	Ag	0,33	0,14	0,18	0,09
	Set	0,47	0,16	0,30	0,14
	Out	0,52	0,17	0,33	0,15
	Nov	0,61	0,17	0,41	0,17
	Dez	0,74	0,17	0,57	0,21

Os valores apontados na Tabela 5.5 foram plotados em um gráfico para melhor visualização (Figura 5.20).

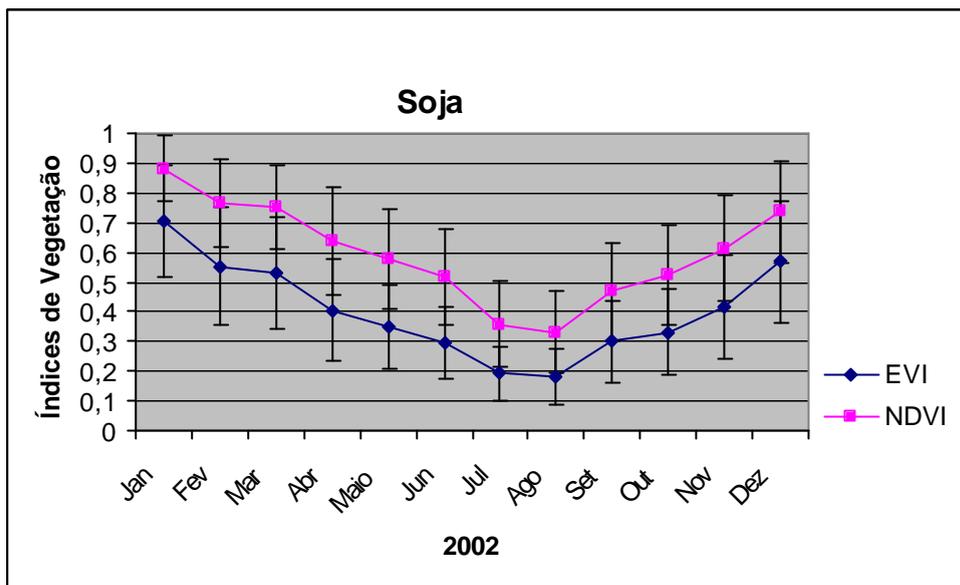


FIGURA 5.20 - Variação do NDVI e EVI (+ 1 desvio padrão) para a Soja, durante o ano de 2002.

Na Figura 5.20, observou-se que tanto para o NDVI quanto para o EVI, existe uma grande amplitude entre os valores dos índices na estação chuvosa e estação seca. Isso se deve ao fato de que no período da época seca (junho-outubro) geralmente não é plantada nenhuma outra cultura nestas áreas, permanecendo-se assim com solo exposto, ou palhas após a coleta dos grãos.

Na Figura 5.21, observa-se os resultados do teste de Tukey para as áreas de cultura de soja, e os resultados da correlação entre esta classe e os dados de precipitação.

Tukey HSD test; variable EVI (Soja)				Tukey HSD test; variable NDVI (Soja)				Área 1				
Probabilities for Post Hoc Tests				Probabilities for Post Hoc Tests				coef correl				
MAIN EFFECT: AREA				MAIN EFFECT: AREA				1mês				
	{1}	{2}	{3}		{1}	{2}	{3}				2 meses	
	179,1400	179,8825	176,7765		202,994	202,3382	197,4734		0,96	0,90	0,63	
1	{1}			0,87	1	{1}			0,95	0,86	0,61	
2	{2}	0,99		0,79	2	{2}			0,80	0,79	0,62	
3	{3}	0,87	0,79	3	{3}		0,48	0,56	0,77	0,81	0,68	
									Área 2			
									coef correl			
									1mês			
									0,80	0,79	0,62	
									2 meses			
									0,77	0,81	0,68	
									Área 3			
									coef correl			
									1mês			
									0,73	0,87	0,87	
									2 meses			
									0,60	0,78	0,81	

FIGURA 5.21 - Resultado do Teste Tukey para áreas de Soja, e coeficientes de correlação do NDVI e EVI com a precipitação destas áreas, para o mesmo mês, e para 1 e 2 meses de defasagem.

A análise do teste de Tukey, mostrado na Figura acima (Figura 5.21), não detectou diferenças significativas entre as áreas de soja amostradas, tanto para o NDVI quanto para o EVI. Para as amostras adquiridas em áreas de florestas, o índice que apresentou melhor resultado em relação a precipitação foi o EVI, relacionado a precipitação do mesmo mês ($r = 0,96$). Já para as amostras coletadas em áreas de Savana Arbórea Aberta, o índice que melhor explicou a relação deste tipo de cobertura com a precipitação foi o NDVI com 1 mês de defasagem, e nas amostras coletadas sobre áreas de Savana Gramíneo-lenhosa, novamente o EVI apresenta uma melhor correlação, tanto para 1 quanto para 2 meses de defasagem ($r = 0,87$).

A partir dos valores encontrados para todas as classes analisadas, foram gerados dois gráficos, um referente aos valores médios mensais de NDVI, e o outro aos valores de EVI, para cada uma delas (Figura 5.22).

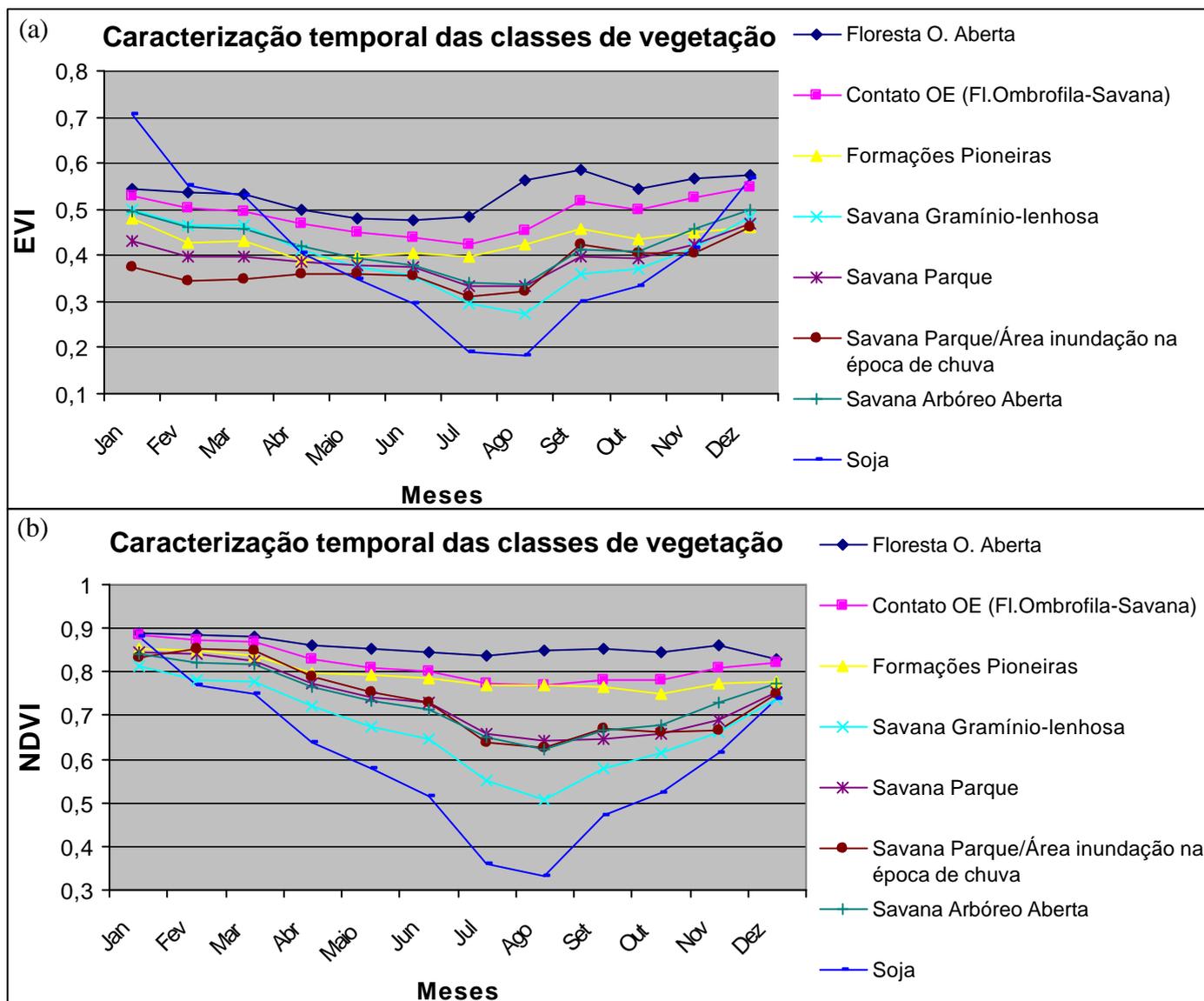


FIGURA 5.22 - Caracterização temporal das classes de vegetação mapeadas, em (a) através de dados EVI, e em (b) através de dados NDVI.

5.2.2 Detecção de Áreas Desmatadas Utilizando Dados do Sensor MODIS

Neste item são analisados os resultados obtidos nos processamentos dos dados multitemporais das imagens MODIS, para o período dos dias julianos 166 ao dia 278, que compreendem o período de junho a outubro do ano de 2002. Estes resultados são comparados com os resultados obtidos para o sensor ETM+, utilizado como dado de verdade terrestre.

As áreas desmatadas acumuladas em cada uma das datas analisadas, detectadas pelos sensores ETM+ e MODIS podem ser observadas na Figura 5.23. Observou-se que mais de 50% do desmatamento realizado no ano de 2002 já havia ocorrido na data da primeira cena analisada, que correspondeu ao dia Juliano 166 (15 de junho), sendo que esta foi à primeira cena Landsat, desta órbita/ponto, disponível livre de nuvens para o ano estudado. Esta constatação ressalta a necessidade da utilização de um sensor com uma melhor resolução temporal para o monitoramento e detecção de desflorestamentos, pois aumentam as chances de se obter cenas livres de cobertura de nuvens.

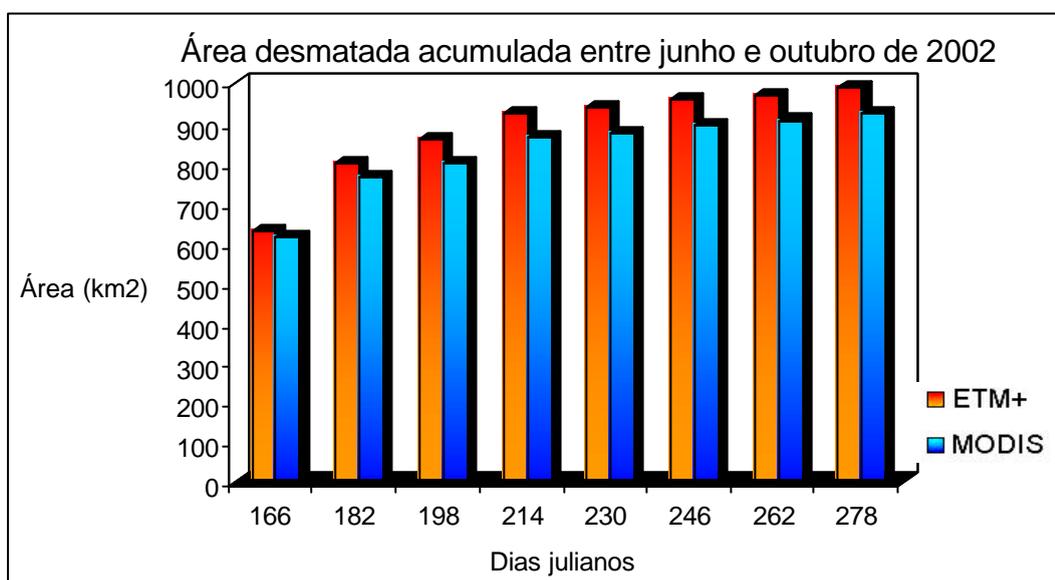


FIGURA 5.23 – Evolução das áreas desmatadas para a cena 227/68, para o período analisado, detectado pelo sensor MODIS e ETM+.

Na Figura 5.24 observa-se o desmatamento ocorrido de forma temporal, assim como a espacialização dos polígonos em relação a desmatamentos anteriores ao ano de 2002. A imagem utilizada foi a fração solo, gerada a partir dos dados do sensor MODIS, referente ao dia 278, evidenciando a diferença entre floresta e solo.

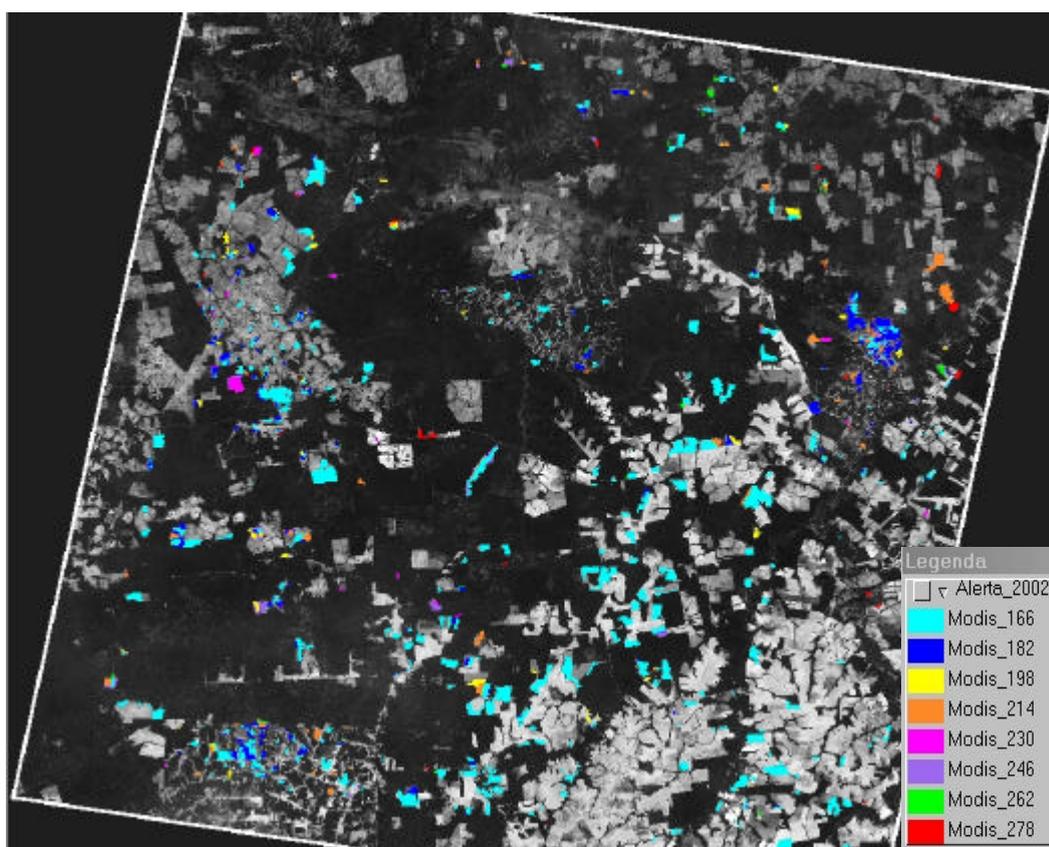


FIGURA 5.24 – Evolução das áreas desmatadas em cada período pelo sensor MODIS, sobre a imagem fração solo.

De acordo com as informações fornecidas pela FEMA (Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEMA-MT) (2004), Unidade Regional de Alta Floresta, no Estado do Mato Grosso não existe um calendário do desmatamento, ou seja, a partir do momento em que é emitido o protocolo permitindo a abertura de uma área, fica a cargo do proprietário definir a época. Os meses em que ocorrem as maiores taxas de desmatamentos são bastante variáveis de região para região dentro do Estado. Segundo a FEMA, os desmatamentos geralmente iniciam-se em janeiro/ fevereiro dependendo apenas das condições meteorológicas (regime de chuvas) e finalizam-se em outubro/ novembro, quando se inicia a época das chuvas.

No intervalo de tempo estudado, o período entre junho e início de julho (dia 166-182) foi o que apresentou a maior taxa de desmatamento. A quantidade de áreas desmatadas

diminuiu entre julho e agosto (dias 182-198 e 198-214), e tornou-se ainda menor a partir de agosto (após dia 214) (Figura 5.25a).

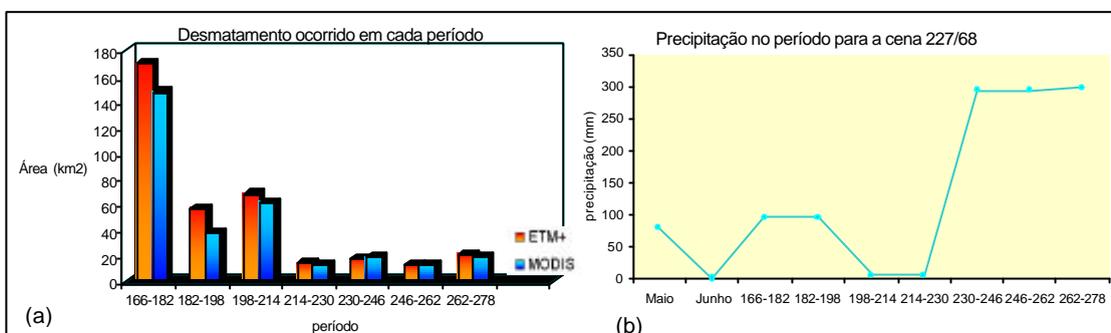


FIGURA 5.25 - Desmatamentos ocorridos em cada período (intervalo de 16 dias) entre junho e outubro de 2002 (a) e curva de precipitação, com base em três estações de medição localizadas dentro dos limites da cena (b).

O gráfico de precipitação, gerado a partir de três estações de medições localizadas dentro dos limites da cena utilizada, demonstra uma queda nas chuvas nos meses de maio e junho, favorecendo as condições para as atividades de desmatamento. No período entre junho e julho, a taxa de chuvas permanece baixa, aumentando a partir da segunda quinzena de agosto, quando as taxas de desmatamento tornam-se mais baixas também.

Baseando-se nos tamanhos dos polígonos de desmatamento, analisou-se a detecção destas áreas pelo sensor MODIS, em relação ao sensor ETM+. Na Figura 5.26, as áreas desmatadas são divididas em classes de tamanho. Estas classes de novos desflorestamentos são distribuídas com base na referência dos dados do projeto PRODES, e apresentam-se distribuídas em 7 faixas de tamanhos distintos. Estas foram definidas de modo que os resultados gerados pelo projeto PRODES possam ser melhor utilizados em análises por órgão governamentais e não-governamentais como um indicador das possíveis causas do desflorestamento na Amazônia (INPE, 2002). As faixas de tamanhos são: áreas menores que 15 ha; entre 15 e 50 ha; entre 50 e 100 ha; entre 100 e 200 ha; entre 200 e 500 ha, entre 500 e 1000 ha, e maiores que 1000 ha.

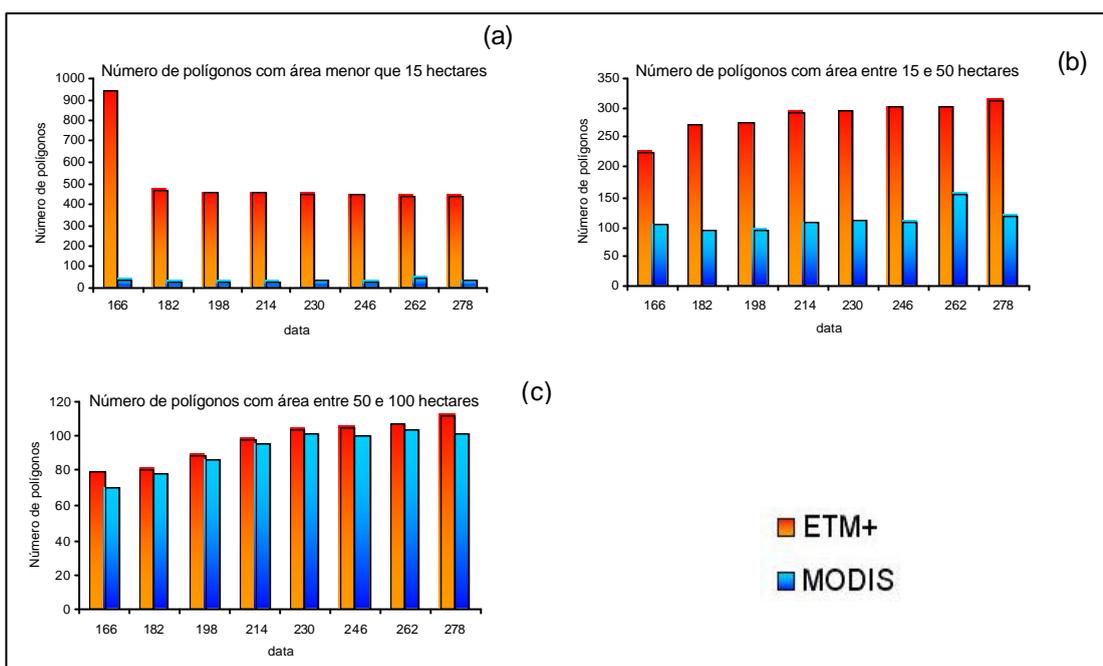


FIGURA 5.26 - Número de polígonos detectados pelos sensores ETM+ e MODIS, distribuídos segundo três classes de tamanhos, para todo o período analisado. Em (a) número de polígonos detectados com área menor que 15 ha; (b) número de polígonos detectados com área entre 15 e 50 ha; (c) número de polígonos detectados com área entre 50 e 100 ha.

Na Figura 5.26 observou-se que conforme a área dos polígonos desmatados aumentou, mais se aproximou o número de polígonos detectados pelo sensor MODIS e pelo sensor ETM+. O número de polígonos desmatados com uma área menor do que 15 ha é subestimado pelo sensor MODIS, considerando os dados do sensor ETM+ como verdade terrestre (Figura 5.26a). Esta tendência diminui conforme o tamanho das áreas desmatadas aumenta (Figura 5.26b e c). No subitem 5.26a observou-se também que o número de polígonos com área menor que 15 ha diminuiu do dia 166 para as datas seguintes, que depois se mantiveram constantes, indicando que estas áreas tiveram um incremento no tamanho nas datas seguintes. Analisou-se a imagem ETM+ referente ao dia 166, constatando-se que grande parte dos desmatamentos ocorreu em áreas agregadas a desmatamentos anteriores a 2002, assim como os desmatamentos com áreas inferiores a 15 ha não ocorreram de forma isolada sobre as áreas de florestas.

Na Figura 5.27a observou-se um aumento no número de polígonos com área entre 100 e 200 ha detectados pelo sensor MODIS do dia 246 para o dia 262, e não é observado pelo sensor ETM+. Este aumento deveu-se a polígonos com área entre 50 e 100 ha que tiveram suas áreas aumentadas, sejam individualmente, seja pelo agregamento de dois polígonos menores (Figura 5.27) passando assim a pertencer a data seguinte (dia 278) a classe de polígonos com área entre 100 e 200 ha. Este fato deve-se à resolução espacial do sensor MODIS. Isso foi constatado quando se observou a área total dos polígonos com área entre 50 e 100 ha no dia 262: 7.385 ha para o sensor ETM+ e 7.424 ha detectado pelo sensor MODIS; e para o dia 278: 7.654 ha para o sensor ETM+ e 7.288 ha para o sensor MODIS.

Observou-se também a diminuição do número de polígonos da classe de 100 a 200 ha no dia 278 (Figura 5.27a), ocorrendo o mesmo processo descrito acima. Polígonos com área entre 100 e 200 ha passaram desta classe no dia 262 para a classe de polígonos com área entre 200 e 500 ha (Figura 5.27b). Observou-se a área total (Figura 5.27b e d) detectada pelo sensor ETM+ e MODIS: dia 262: 12.844 e 14.231 ha para o sensor ETM+ e MODIS, respectivamente; dia 278: 13.675 e 11.597 ha, para o sensor ETM+ e MODIS, respectivamente; No entanto, a análise da classe de polígonos com área entre 200 e 500 ha, não demonstrou um aumento da área no dia 278 tão expressivo como o esperado (dia 246: 24.510 e 24.200; dia 262: 25.099 e 28.800 ha; e dia 278: 25.610 e 25.264 ha para o sensor ETM+ e MODIS respectivamente). O crescimento da área total para esta classe no dia 278, deveu-se a dois fatores: primeiramente ao aumento da área de alguns polígonos entre 100 e 200 ha, que passaram para a classe de área entre 200 a 500 ha. Segundo, alguns polígonos pertencentes à classe de 200 a 500 ha que tiveram um incremento na sua área, sem, contudo, ultrapassar o tamanho de 500 ha, permanecendo assim na mesma classe. Caso os polígonos entre 100 e 200 ha que tiveram um aumento de sua área passassem para a classe de 200 a 500 ha, seria esperado um aumento de mais 2 mil ha na área final do dia 278 para a classe de 200 a 500 ha. Este aumento de área não foi observado nos dados, e atribuiu-se a um erro de classificação, representando cerca de 2% da área total para esta data.

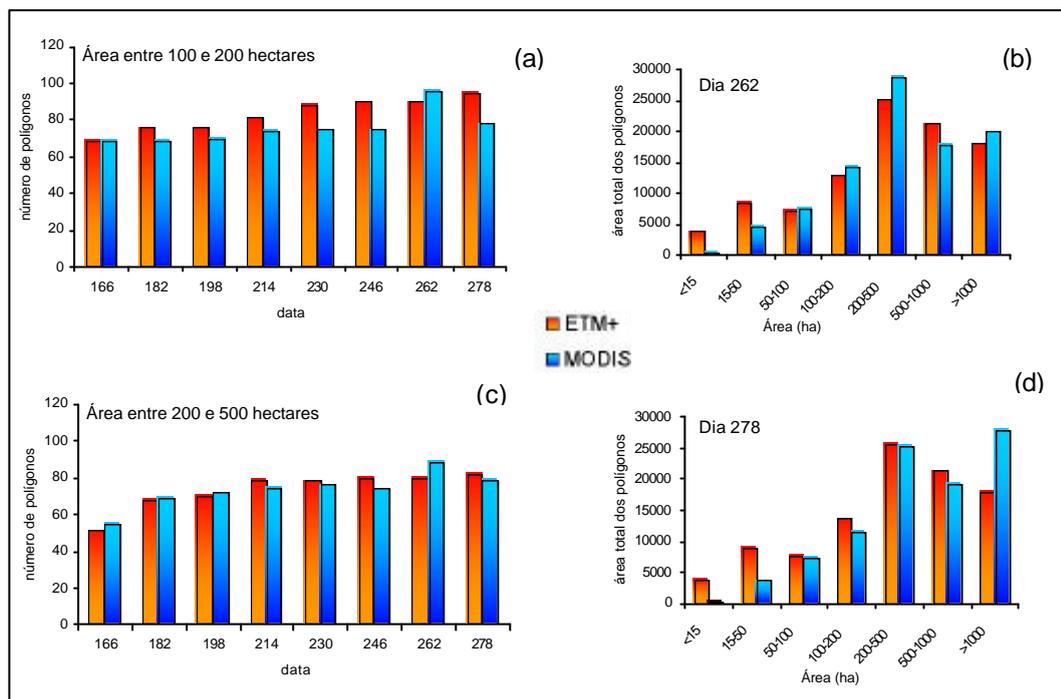


FIGURA 5.27 - Desmatamentos detectados pelos sensores ETM+ e MODIS. Em (a) Área desmatada com polígonos entre 100 e 200 ha; (b) Área total dos polígonos detectados para o dia 262; (c) Área desmatada com polígonos entre 200 e 500 ha; (d) Área total dos polígonos detectados para o dia 278.

Nos desmatamentos com área entre 200 e 500 ha observou-se um aumento no número de polígonos no dia 262, e na data seguinte, uma diminuição para o sensor MODIS (Figura 5.27a) enquanto que para o sensor ETM+ manteve-se quase constante. Este fato pode ser explicado a partir da área total detectada para esta classe (Figura 5.27c e d). Na Figura 5.28, observou-se que para a classe de 200 a 500 ha no dia 262 e no dia 278, existe apenas um pequeno aumento da área total detectada pelo sensor ETM+ (de 25.099 ha no dia 262 para 25.610 ha no dia 278) enquanto que para o sensor MODIS foi estimada uma área de 28.800 ha no dia 262 e 25.264 ha para o dia 278, ou seja, a área total diminuiu. No entanto, observando-se a área total para a classe de 500 a 1.000 ha (Figura 5.28d), detectada pelo sensor ETM+ para as duas datas não foram alteradas, enquanto que foi observado um aumento estimado pelo sensor MODIS.

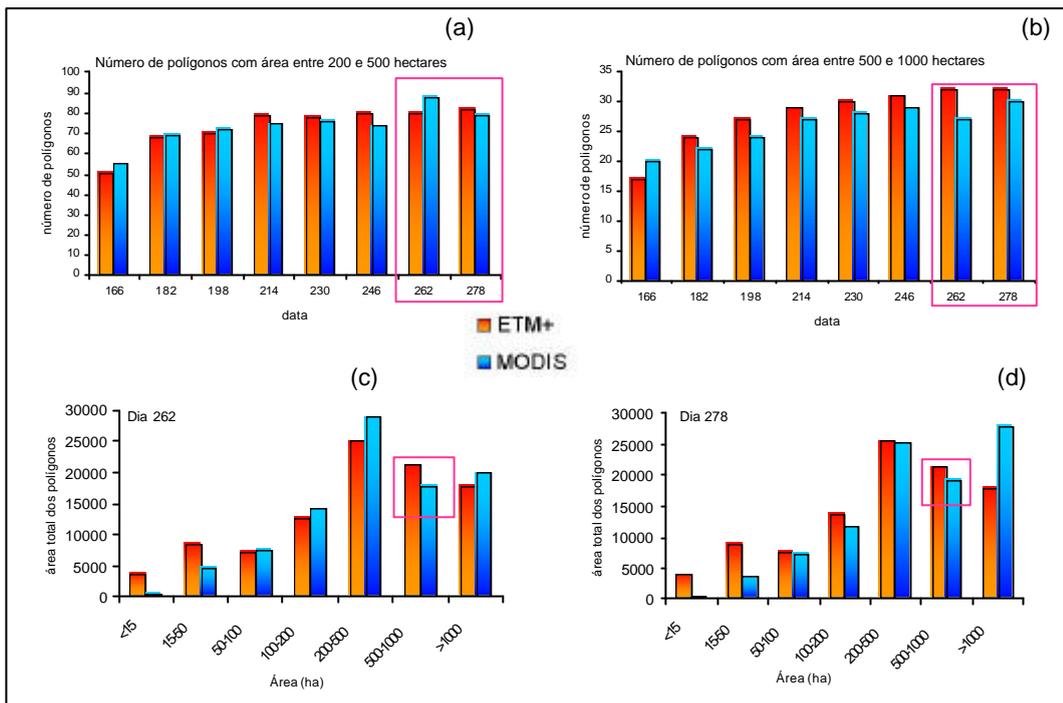


FIGURA 5.28 - Gráficos das análises dos polígonos com áreas superiores a 200 ha. Em (a) evolução temporal dos polígonos com área entre 200 e 500 ha; (b) evolução temporal dos polígonos com áreas entre 500 e 1000 ha; (c) divisão dos polígonos por classes de tamanho para o dia 262, por área total dos polígonos; (d) divisão dos polígonos desmatados por classes de tamanho para o dia 278, por área total dos polígonos.

Este resultado indicou que alguns polígonos com área entre 200 e 500 ha, que tiveram um incremento de sua área, foram detectados pelo sensor MODIS como sendo apenas um polígono, devido à espacialização apresentada pelo desflorestamento e a resolução do sensor (Figura 5.29).

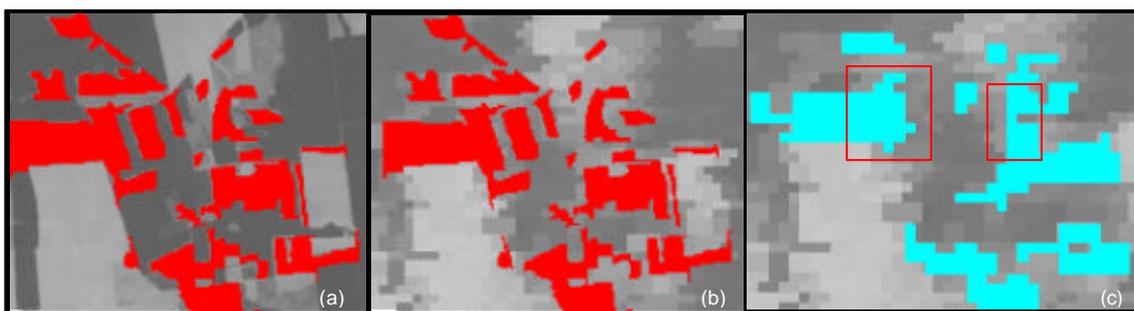


FIGURA 5.29 - Polígonos desmatados detectados pelo PRODES e pelo sensor MODIS. Em (a) imagem fração solo ETM+ com os desmatamentos detectados pelo PRODES para o ano de 2002; (b) imagem fração solo MODIS com os desmatamentos detectados pelo PRODES para o ano de 2002; (c) imagem fração solo MODIS com os desmatamentos detectados através da metodologia adotada mostrando a junção de polígonos, devido à espacialização dos polígonos e resolução espacial do sensor.

Para esta cena utilizada como verdade terrestre para a validação dos dados do sensor MODIS, verificou-se que no total, 26% da área total detectada pelo sensor ETM+ corresponde a desmatamentos com área entre 200-500 ha, e 21% aos desmatamentos com área entre 500 e 1000 ha. Para o sensor MODIS, 30% da área total detectada corresponde a desmatamentos com área maior que 1000 ha, e 26% a desmatamentos com área entre 200 e 500 ha (Figura 5.30a e b). Em relação ao número de polígonos desmatados, verificou-se que para o sensor ETM+ 40% dos polígonos possuem área menor que 15 ha, e 29% dos polígonos com área entre 15 e 50 ha. Para o sensor MODIS, estes valores são 7% e 26%, respectivamente. A classe mais representativa no número de desmatamentos detectados pelo sensor MODIS corresponde aos polígonos com área entre 15 e 50 ha, com 26%, seguido de polígonos com área entre 50 a 100 ha, com 22% do total (Figura 5.30c e d).

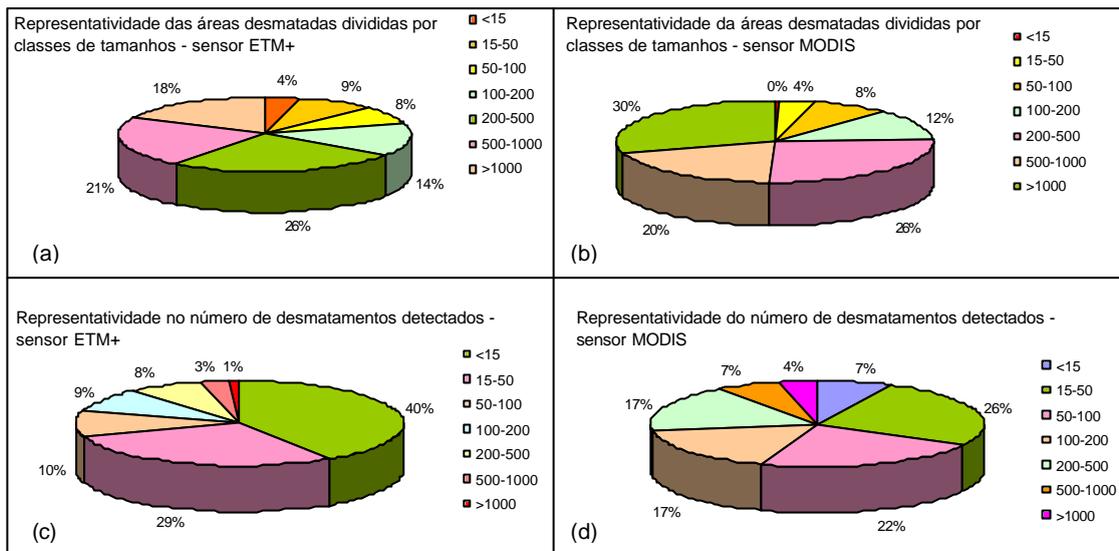


FIGURA 5.30 - Análise geral da área e número de polígonos para os dados ETM+ e MODIS. Em (a) representatividade das áreas divididas por classe de tamanho detectado pelo sensor ETM+; (b) representatividade das áreas divididas por classe de tamanho detectado pelo sensor MODIS; (c) representatividade do número de polígonos desmatados detectados pelo sensor ETM+; (d) representatividade do número de polígonos desmatados detectados pelo sensor MODIS.

Alves (2002) mostrou que de 1991 a 1997, 90% das taxas de desflorestamento para a Amazônia Legal ocorreram dentro de 100 km dos principais eixos de desenvolvimento. Estas eram áreas correspondentes às terras devolutas destinadas aos projetos de colonização e aos pólos de desenvolvimento concebidos nas décadas de 70 e 80. Observou também que as maiores taxas de desflorestamento ocorreram geralmente em regiões onde derrubadas maiores são predominantes, e que áreas desflorestadas tendem a agrupar-se ao longo do tempo, formando clareiras cada vez maiores. O autor estimou que para a Amazônia Legal áreas entre 50 e 200 ha correspondem, respectivamente, a 74% e 50% da área total desflorestada entre o período de 1991 a 1997.

Os resultados obtidos nesta pesquisa retratam as particularidades da região de estudo, assim como as novas tendências das áreas que vem sendo desflorestadas, das quais os principais objetivos são grandes áreas de agricultura mecanizada. Os dados mostraram que 20% da área total desmatada detectada pelo sensor MODIS são desflorestamentos com área entre 50 e 200 ha, enquanto que para o sensor ETM+ esta porcentagem é de 22. Para ambos os sensores, áreas entre 200 e 500 ha foram as maiores responsáveis

pelos desflorestamentos analisados, sendo que na Figura 5.30 (b), aparece para o sensor MODIS as maiores áreas desflorestadas como as maiores que 1000 ha, no entanto isto deve-se ao agrupamento de grandes desflorestamentos próximos um ao outro. Segundo Alves (2002), os desflorestamentos iniciais na Amazônia tiveram como incentivo à implantação dos eixos e pólos de desenvolvimento, permanecendo elevado nas regiões que estabeleceram sistemas produtivos encadeados ao Centro-oeste, Sul e Nordeste. Para a região de estudo, assim como para a área de validação estudada, hoje a maior fonte de pressão para o desflorestamento é o crescimento da cultura da soja e da indústria madeireira.

No geral, conforme é observado na Figura 5.23, existe uma tendência do sensor MODIS subestimar a detecção das áreas desmatadas em relação ao sensor ETM+. Aplicou-se o teste estatístico t-Student, para analisar a tendência a subavaliação da área total detectada pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+. Os resultados obtidos sugeriram que com uma confiança de 95% podemos afirmar que o sensor MODIS tem uma tendência de subavaliar as áreas desmatadas. Este fato decorre devido à resolução espacial do sensor (Figura 5.31).

Dia	ETM+	MODIS	ETM+ Real	(ETM+) - (MODIS) Diferença
prodes 01	624,6			
166	631,4	617,7	631,4	13,7
182	801,7	765,3	801,7	36,4
198	859,0	802,9	859,0	56,2
214	927,3	864,3	927,3	62,9
230	941,3	876,5424	941,3	64,8
246	959,1	896,0004	959,1	63,1
262	971,4	908,0964	971,4	63,3
278	992,0	927,486	992,0	64,5
prodes 02	1009,2			
			Média Amostra =	53,10
			Desvio Padrão =	18,55

Teste de Hipótese sobre a subavaliação:

H₀: $\mu = 0$
H₁: $\mu > 0$

Rejeita H₀ pois $t_{n-1} > t_{n-1,\alpha}$

$t_{n-1} = (\text{MédAmostra} - 0) / (\text{DesvPadAmostra} / \sqrt{8}) = 8,098$

$t_{n-1,\alpha} = t_{7,5\%} = 1,895$ Tabela Distribuição t de Student

FIGURA 5.31 - Teste da hipótese de avaliação na detecção de área desmatada pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+, utilizando-se o teste t-Student.

A partir deste resultado, foi analisada a medida de quanto o sensor MODIS subestima a estimativa das áreas desmatadas, em relação ao sensor ETM+ (Figura 5.32). Utilizando-se a análise de regressão linear, chegou-se ao resultado que existe uma taxa esperada de subestimação de 5,1%, e pode-se afirmar que com 95% de confiança, essa taxa é superior a 0,042 e inferior a 0,061 km² por km².

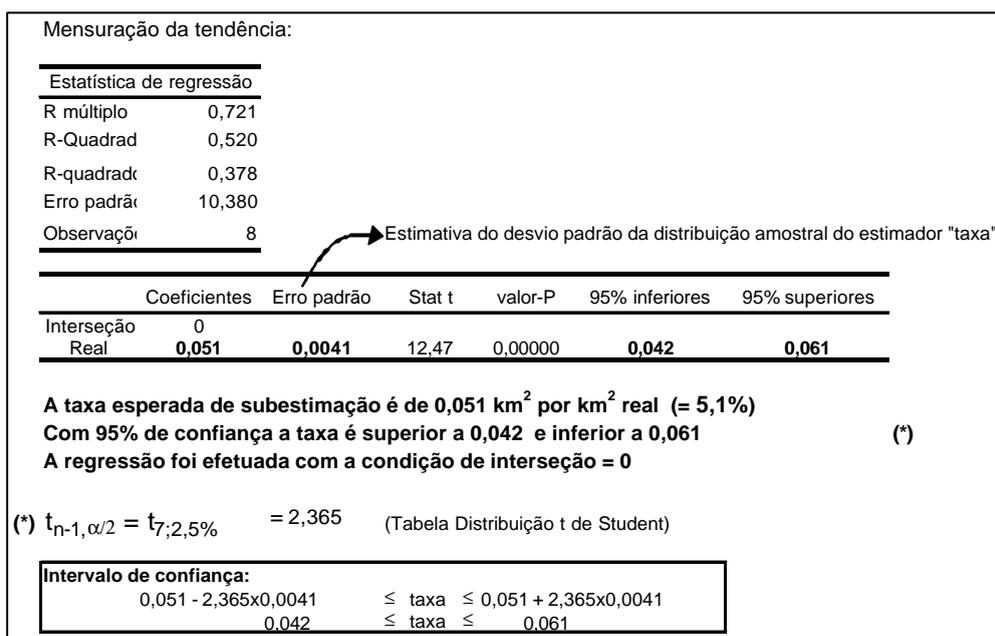


FIGURA 5.32 - Teste de medida da taxa de subestimativa do sensor MODIS em relação ao sensor ETM+ para a detecção de áreas desmatadas.

Com o objetivo de analisar de que forma o sensor MODIS detecta pequenos e grandes desmatamentos, selecionaram-se visualmente polígonos desmatados, a partir da diferença entre as cartas temáticas dos dias 182 e 166, por ser o período em que ocorreu maior taxa de desmatamento (Figura 5.33). A seleção destes polígonos foi realizada de forma a abranger diversos tamanhos de pequenos e grandes polígonos, distribuídos por toda a cena (Figura 5.33).

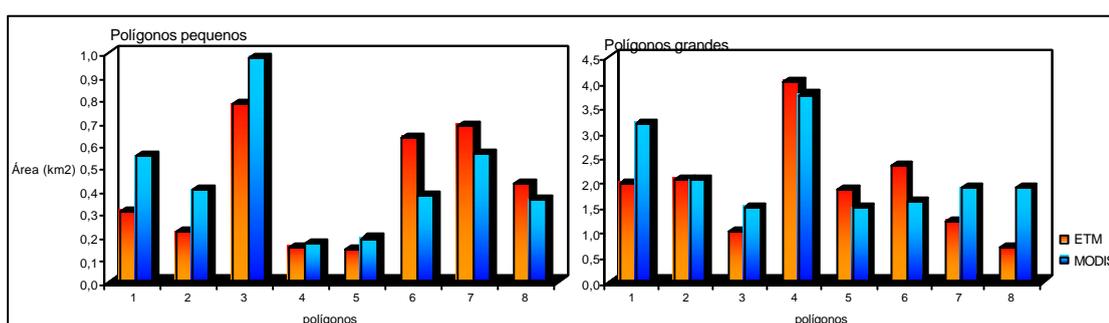


FIGURA 5.33 - Tamanho dos polígonos selecionados para a avaliação da detecção destes pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+.

Foram realizados os testes de hipóteses sobre a tendência de subavaliação para polígonos grandes e pequenos, através da análise estatística de t-Student. Os resultados obtidos indicam que não existem evidências para afirmar que o sensor MODIS

subestima a área detectada tanto por polígonos pequenos quanto por polígonos grandes. (Figura 5.34).

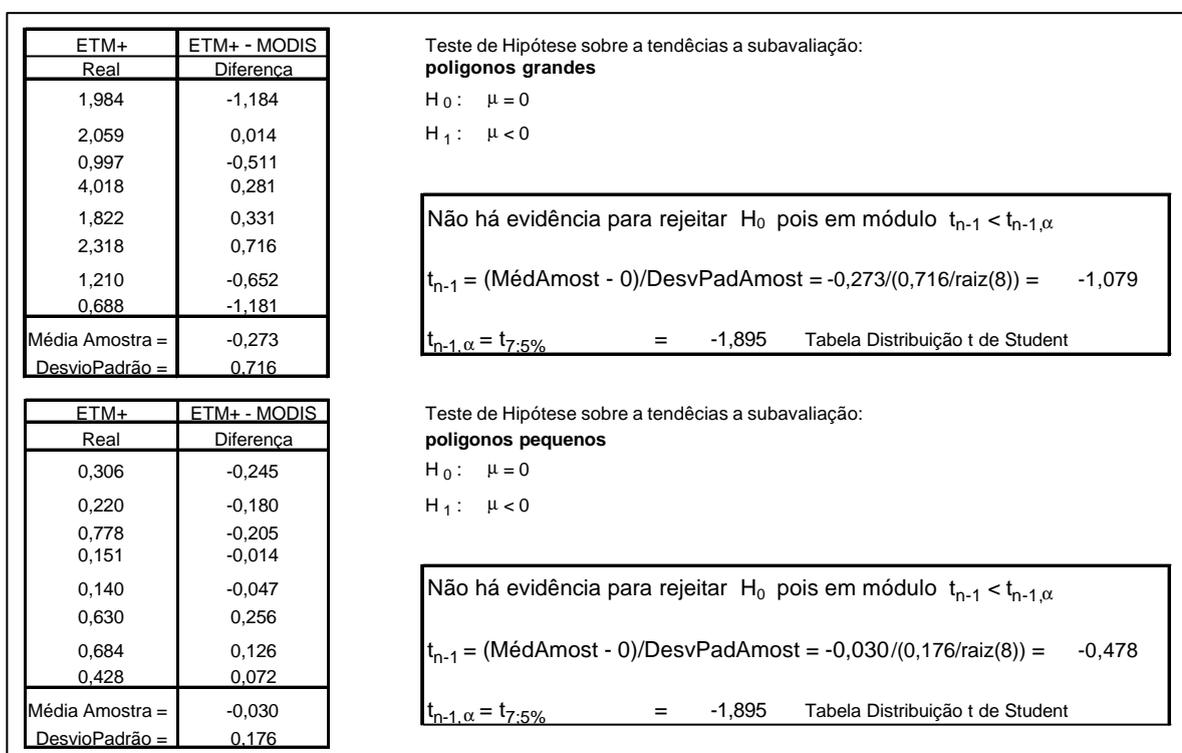


FIGURA 5.34 - Análise estatística de t-Student para as tendências de subavaliação da área detectada por polígonos grandes e pequenos pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+.

Como o resultado geral encontrado para todas as datas analisadas indica uma subestimativa na área total detectada pelo sensor MODIS em relação ao sensor ETM+ concluiu-se que a partir do momento em que o sensor MODIS detecta uma área desmatada, a estimativa de área em relação a realizada com o sensor ETM+ é praticamente igual (Figura 5.34). No entanto, existem polígonos que não são detectados por este sensor, por dois motivos: o primeiro é devido à extensão geográfica x resolução espacial do sensor, que inclui uma grande quantidade de mistura de feições na resposta espectral do pixel, resultando em que pequenos polígonos desmatados sejam tratados como áreas de floresta; e segundo devido ao padrão espacial do desmatamento. A análise das cartas temáticas e imagens mostraram que pequenos desmatamentos visíveis

em imagens ETM+ espacializados distantes e isolados um do outro não foram detectados como desmatamentos pelo sensor MODIS.

Zhan et al. (2002) testaram o algoritmo VCC em três métodos que utilizam o domínio espectral, e dois baseados em textura: (1) método do particionamento do espaço vermelho-IVP; (2) Método de mudança de vetor vermelho-IVP; (3) método da modificação do limiar do espaço delta; (4) mudanças em textura espacial; e (5) mudanças nas feições lineares. Para a validação dos resultados de detecção do desmatamento, foram gerados bitmaps de referência em imagens ETM+, através de métodos de detecção de mudanças mais usuais e envolvimento humanos mais intensivos.

Os resultados obtidos por Zhan et al. (2002) e nesta pesquisa estão na Tabela 5.6.

TABELA 5.6 – Taxas de Erro E Precisão (%) dos Métodos de Detecção de Mudança Utilizando o VCC e Segundo os Resultados Obtidos Nesta Pesquisa, para a Detecção de Desmatamentos Ocorridos no Brasil.

Método	Particionamento do espaço	Mudança de vetor	Delta modificado	Mudança na textura	Feição linear	Metodologia proposta nesta pesquisa
Erro de inclusão	84,1	73,6	77,5	64	57,5	25
Erro de omissão	90,3	15,9	35,9	69	100	29
Detecção de precisão	9,7	84,1	64,1	31	0	70,61

Zhan et al. (2002) demonstraram que as detecções de pequenas áreas são relativamente difíceis, e todas as metodologias testadas apresentaram altas taxas de inclusão. Apesar da taxa de detecção da precisão pelo método de mudança de vetor ser mais alta que a obtida nesta pesquisa, a taxa de inclusão observada foi também mais alta, ou seja, mais áreas desmatadas foram detectadas, no entanto, áreas que não eram desmatamentos

foram incluídas nesta classe também. Em relação ao erro de omissão, o resultado obtido nesta pesquisa foi relativamente bom quando comparado aos resultados obtidos no trabalho de Zhan et al. (2002). O resultado da detecção de precisão apresentou-se com 70,6%, provavelmente devido ao grande número de pequenas áreas desmatadas na área de estudo (Tabela 5.6).

A análise da utilização das imagens índice de vegetação para detectar desmatamentos foi realizada com base no teste Tukey, no qual foram comparados simultaneamente amostras de florestas, desmatamentos e solo exposto. O resultado do teste pode ser visualizado na Figura 5.35, e indicou que existe diferença significativa entre os três padrões de amostras. Isso indica que, com base nas amostras coletadas, é possível utilizar as imagens índice de vegetação NDVI e EVI para detectar desmatamentos.

EVI			
Tukey HSD test (correl.sta)			
Probabilities for Post Hoc Tests			
MAIN EFFECT: AMOSTRAS			
	SOLO	FLORESTA	DESMAT
MÉDIA	146,5280	190,8472	174,9576
1 {1}		0,0*	0,0*
2 {2}	0,0*		0,0*
3 {3}	0,0*	0,0*	
NDVI			
Tukey HSD test (correl.sta)			
Probabilities for Post Hoc Tests			
MAIN EFFECT: AMOSTRAS			
	SOLO	FLORESTA	DESMAT
MÉDIA	160,8928	239.3078	209.0993
1 {1}		0,0*	0,0*
2 {2}	0,0*		0,0*
3 {3}	0,0*	0,0*	

FIGURA 5.35 - Resultado do teste de Tuckey para os índices de vegetação EVI e NDVI, com base nas amostras de solo exposto, floresta e desmatamentos. (*) indica diferença significativa.

Os resultados alcançados indicam a potencialidade dos dados MODIS para a detecção e mapeamento de áreas desmatadas, mostrando a aplicabilidade desta abordagem em um sistema de detecção de desflorestamento em tempo quase real.

5.2.3 Análise das Áreas Queimadas Utilizando Dados do Sensor MODIS

Neste item são analisados os resultados obtidos na avaliação de áreas queimadas, a partir de imagens fração sombra geradas para o sensor MODIS. Estes dados são comparados com as imagens fração sombra ETM+, utilizados como verdade terrestre. As análises foram realizadas com base em polígonos amostrais, adquiridos na imagem ETM+, referente ao dia 278.

Das 126 amostras coletadas, eliminou-se os polígonos com tamanho de 1 pixel no sensor MODIS, com o objetivo de minimizar os efeitos de mistura e melhorar os resultados de correlação (Figura 5.36). Desta forma, as análises estatísticas foram baseadas em 101 amostras.

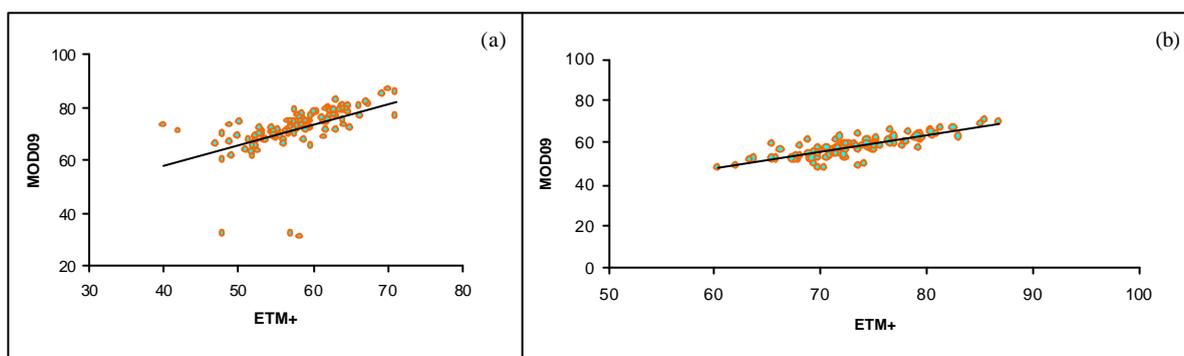


FIGURA 5.36 - Gráfico de dispersão das imagens fração sombra ETM+ em relação ao produto MOD09. Em (a) apresenta-se todas as amostras coletadas; (b) amostras coletadas com área maior que 1 pixel do sensor MODIS.

Na Figura 5.37 apresenta-se os resultados obtidos para os testes estatísticos de avaliação das amostras entre o produto MOD09 e dados ETM+. Observou-se no gráfico desta Figura, que existe uma correlação linear positiva, com uma pequena dispersão em torno da reta. O coeficiente de correlação (R) apresentou um valor de 0,8, e o teste de variância (F de significância = $1,1 \times 10^{-25}$) determinou que a correlação é significativa (Spiegel, 1985). Estas análises indicam a potencialidade da utilização de imagens fração sombra para identificar áreas queimadas no produto MOD09 do sensor MODIS.

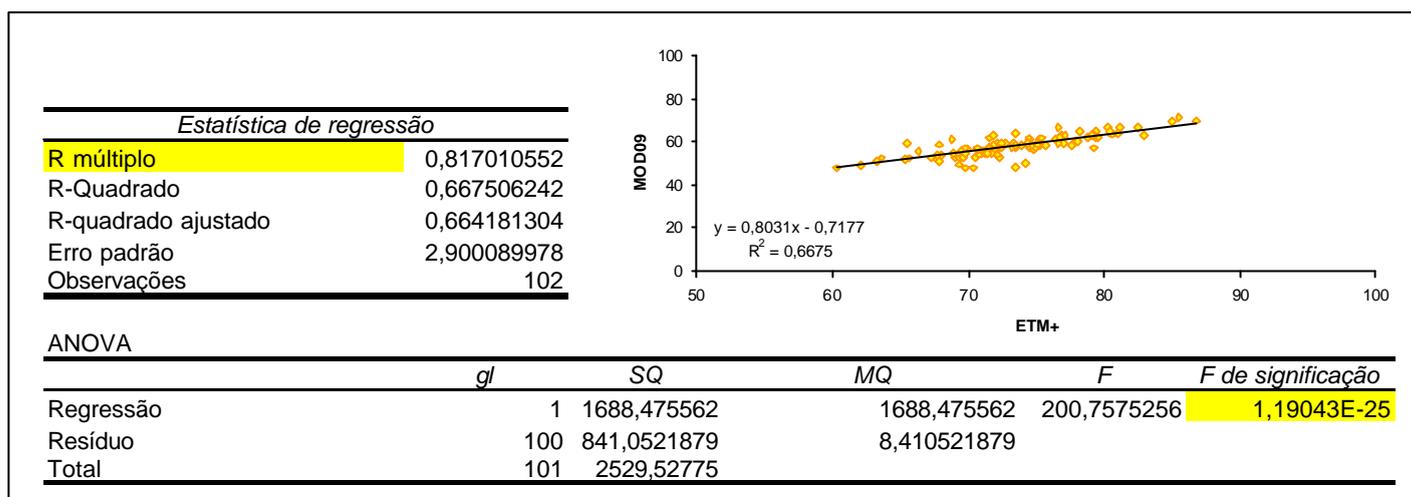


FIGURA 5.37- Resultados das análises das amostras adquiridas nas imagens fração sombra dos sensores MODIS e ETM+ em polígonos amostrais em áreas queimadas.

Na Figura 5.38, apresenta-se os resultados obtidos para as análises entre os dados das imagens fração sombra do sensor ETM+ e as composições mensais geradas com base no produto MOD13. No subitem (a), são apresentados os dados referentes às análises da imagem fração sombra ETM+ e MOD13, mês de outubro. O coeficiente de correlação apresenta um valor bastante baixo ($R=0,3$). Apesar da dispersão dos valores apresentarem-se aparentemente próximos a reta do gráfico deste mesmo subitem, o teste de significância comprova que não há uma correlação (F de significância = 0,0018).

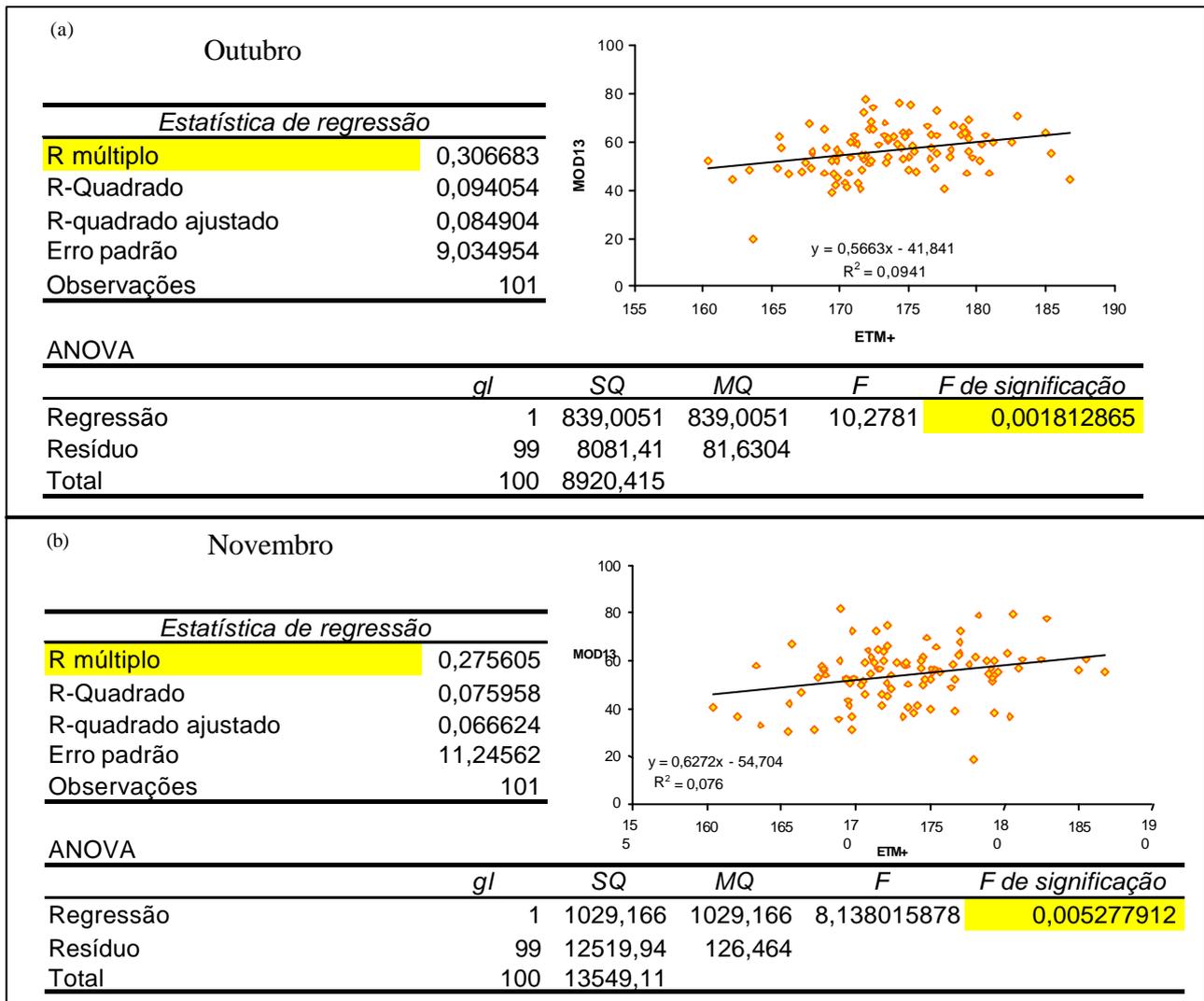


FIGURA 5.38 - Resultados das análises entre os produtos MOD13 e ETM+ em polígonos amostrais em áreas queimadas.

Devido ao fato das imagens utilizadas do produto MOD13 serem compostas a partir do máximo valor do NDVI, aplicaram-se os mesmos testes para o mês de novembro, com o intuito de verificar se o método de composição destes mosaicos poderia estar mascarando a resposta da imagem fração sombra. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 5.38b. Observando-se o gráfico de dispersão, nota-se que os valores estão ainda mais distantes da reta que o observado no subitem a. O valor do coeficiente de correlação (R) é de 0,2 e o teste de significância (F) é de 0,05. Estes valores mostram que a imagem fração sombra do mês de novembro está mais

descorrelacionada com a imagem fração sombra do sensor ETM+ que a imagem fração sombra do mês de outubro. Este fato pode ser explicado pelo fato da composição do mês de outubro utilizar-se apenas da imagem do dia 289 (única data com imagem neste mês), enquanto que o mês de novembro é composto pelas datas 305 e 321. Assim, é possível que no dia 321 já tenha havido alguma recuperação da vegetação sobre as áreas queimadas, pois trata-se do início da estação chuvosa, mascarando desta forma os pixels com um NDVI mais baixo, e logo, a imagem fração sombra.

Roy et al. (2002) analisaram a utilização do NDVI para a detecção de áreas queimadas, concluindo que este índice oferece uma baixa discriminação entre áreas queimadas e não queimadas, assim como a banda 1 (0,645 μm) e os dados de temperatura de superfície. Segundo os autores, as bandas 3 (0,469 μm), 4 (0,555 μm) e 7 (2,130 μm) do sensor MODIS, apresentam nenhuma separabilidade entre as áreas queimadas e não queimadas. Barbosa et al. (1999) estudaram a utilização de índices de vegetação, derivados do sensor AVHRR para o mapeamento de áreas queimadas. As análises foram realizadas com base na queda dos valores dos índices e aumento na temperatura de superfície. Os resultados encontrados por estes autores indicaram que os índices de vegetação que utilizam os canais 2 (0,72-1,1 μm) e 3 (3,5-3,9 μm) do sensor AVHRR são superiores na detecção de áreas queimadas em relação a índices que utilizam os canais 1 (0,58-0,68 μm) e 2.

Neste estudo, observou-se o comportamento das áreas queimadas, a partir de polígonos selecionados em imagens ETM+, para os índices de vegetação NDVI e EVI para as composições mensais do produto MOD13 (Figura 5.39). A Figura 5.39 foi analisada em duas partes: a primeira referente ao primeiro semestre e a segunda, a partir do mês de julho. Observou-se que no mês de janeiro, o NDVI apresentou o valor médio mais baixo que nos demais meses referentes à estação chuvosa, e entre fevereiro e junho, os valores apresentaram apenas uma pequena oscilação. O EVI apresentou para o mês de janeiro um valor médio mais alto que nos meses de fevereiro a junho, e uma leve queda mês a mês até junho. A queda no valor médio de NDVI e alta no valor médio de EVI para o mês de janeiro pode ser explicado pela alta presença de nuvens nesta região nesta época. A maior presença de nuvens na região faz com que ocorra um maior número de

particulados dispersos na atmosfera, afetando a reflectância dos comprimentos de ondas menores (no caso destes índices de vegetação, o azul e o vermelho). O NDVI que é afetado mais pela resposta da banda do vermelho que a do infravermelho próximo, apresentou um valor maior no divisor que no dividendo da equação da fórmula, tornando o resultado um valor médio mais baixo. Já o EVI para este mesmo mês, apresentou um valor mais alto, devido aos coeficientes de correção atmosférica das bandas do vermelho e do azul, presentes na fórmula. Isso ocorreu porque devido a maior quantidade de partículas na atmosfera, estes coeficientes corrigem “mais” a resposta da reflectância nestas bandas (diminuem o valor de reflectância que chega ao sensor), tornando o valor do divisor mais baixo, e logo, o resultado final da equação mais alto.

A pequena oscilação dos valores de NDVI para os meses de fevereiro a junho, e a queda constante nos valores de EVI para o mesmo período pode ser explicada pela saturação do NDVI e maior sensibilidade do EVI aos polígonos amostrados, que tiveram suas áreas desmatadas ao longo dos meses, conforme foi mostrado no item 5.2 deste Capítulo.

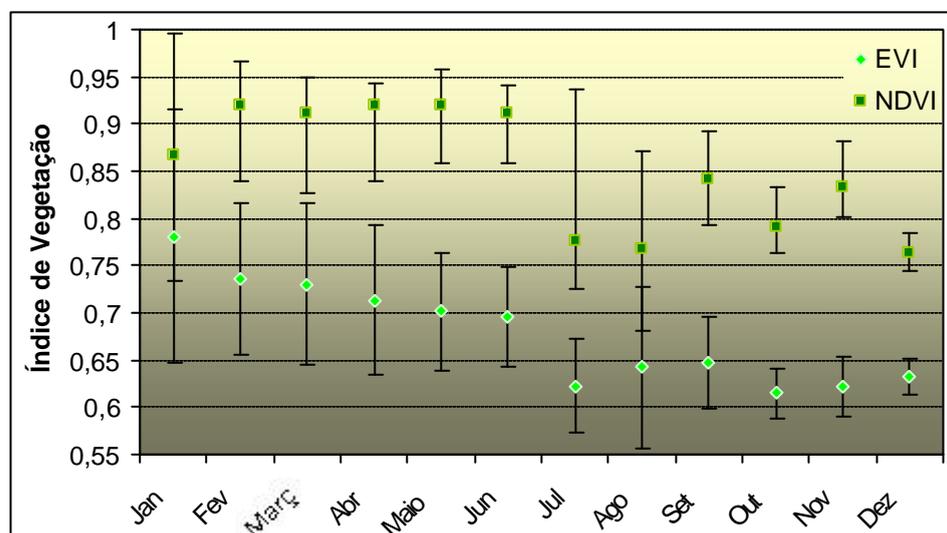


FIGURA 5.39 - NDVI e EVI dos polígonos amostrados na data 278, com base na imagem ETM+. Para cada um dos meses, apresenta-se o valor médio das amostras, assim como o valor mais alto e mais baixo registrado por cada um dos índices.

O mês de julho é o que apresentou os valores médios mais baixos para ambos os índices, devido à condição da vegetação da área de transição ser sensível a diminuição da precipitação e grande parte dos polígonos amostrados apresentarem-se desmatados. No mês de setembro nota-se um pequeno aumento nos valores dos dois índices, que pode ser devido a uma rebrota ou crescimento de gramíneas nestas áreas. No mês de outubro, ocorre uma nova queda nos valores dos índices, pois todas as amostras estavam localizadas em áreas queimadas. Neste mês é que se registrou os menores valores dos dois índices. Para o mês de dezembro, observam-se valores baixos dos dois índices. Neste caso, assim como no mês de janeiro, este resultado deve-se a presença de nuvens, e o comportamento se repete: o NDVI apresenta-se mais baixo e o EVI mais alto que no mês de julho.

Os resultados encontrados neste tópico apontam a potencialidade da utilização dos dados MODIS e da aplicação do modelo de mistura espectral para a análise e monitoramento das áreas queimadas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesse trabalho de classificação e monitoramento da cobertura da terra para o Estado do Mato Grosso, a partir de dados multitemporais do sensor MODIS, permitiram as seguintes conclusões e recomendações.

6.1 Conclusões

◆ Quanto à classificação da cobertura vegetal:

- a) A análise da assinatura espectral das amostras adquiridas nas imagens NDVI, de janeiro a dezembro, com o objetivo de selecionar as melhores datas para garantir a classificação do maior número de classes mostrou-se fundamental para atingir o resultado. Aliado a isso, a etapa de segmentação de imagens, que se utilizou apenas 4 imagens NDVI selecionadas, e a etapa de extração de regiões, em que se utilizou todas as imagens mensais do NDVI e das imagens fração, mostraram-se essenciais para o mapeamento das classes.
- b) Com base na metodologia utilizada no processo anterior à classificação, o número de imagens usadas para a aplicação dos algoritmos de classificação não mostrou ser um fator crucial para se atingir o resultado esperado.
- c) O processo de mosaicagem das classes selecionadas, a partir dos resultados obtidos por diferentes classificadores, permitiu a verificação e edição destas classes separadamente para a geração do mapa final de cobertura da terra.
- d) O resultado final da classificação da cobertura da terra para o ano de 2002 foi considerado satisfatório, pois permitiu o mapeamento de um maior número de classes que os mapas já gerados com sensores de baixa resolução espacial, temporal e espectral.

e) As resoluções espacial e espectral mostraram-se adequadas para a realização desta etapa do trabalho.

◆ Quanto ao monitoramento da fenologia das classes de vegetação mapeadas:

a) Os índices de vegetação disponibilizados nos produtos MOD13 mostraram-se sensíveis para a detecção da sazonalidade da vegetação, sendo que o índice NDVI apresentou resultados mais consistentes que o EVI.

b) As curvas geradas para o EVI para as diferentes formações vegetais, mostraram que este dado provindo do produto MOD13 apresentou maior sensibilidade à influência de nuvens, o que mascarou a resposta fenológica das classes mapeadas em determinados meses.

c) A utilização de amostras dentro de uma mesma classe de cobertura da terra espacializadas em regiões distintas do Estado mostrou a existência de variabilidade dentro de cada formação vegetal. A resposta à precipitação dentro da mesma classe em diferentes regiões mostrou-se variável também. Estas variações podem ser explicadas segundo os padrões de precipitação e a altitude, e a diferenças nas composições florísticas onde as amostras foram adquiridas.

◆ Quanto ao monitoramento do processo de desmatamento:

a) A aplicação do modelo linear de mistura espectral nos dados do sensor MODIS mostrou-se uma técnica robusta para a detecção de novos desmatamentos.

b) A utilização das imagens diárias do sensor MODIS mostrou a viabilidade da sua utilização para a detecção de desmatamentos em uma série temporal. Este resultado reforça a idéia da utilização desta metodologia para o desenvolvimento de um sistema de detecção de áreas desmatadas em tempo real (Sistema de Alerta do Desmatamento). A utilização das imagens proveniente do produto MOD13 mascara as novas áreas de desmatamentos

devido à forma como o produto é gerado (seleção de pixels com base no máximo valor de NDVI).

c) De um modo geral, os dados MODIS subestimam o total das áreas desmatadas detectadas, quando comparadas com os dados ETM+ considerados como verdade terrestre. Esta subestimativa é maior em relação a pequenos polígonos de desmatamento (menores que 15 ha), e esta tendência começa a diminuir conforme aumenta-se o tamanho das áreas desmatadas.

d) Outros fatores que influenciam a detecção e estimativa da área desmatada são a forma e a espacialização dos polígonos onde ocorreu a mudança na cobertura da terra.

e) Do total dos desmatamentos ocorridos na área de validação, 20% do total das áreas desmatadas tinham entre 50 e 200 ha, enquanto que segundo o número de polígonos desmatados, 26% deles encontraram-se entre 15 e 50 ha.

◆ Quanto ao monitoramento das áreas queimadas:

a) A avaliação das imagens fração sombra, geradas a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral nas imagens diárias do sensor MODIS mostrou-se eficiente para a identificação de áreas queimadas, exibindo a potencialidade desta técnica para o monitoramento de áreas queimadas.

b) A utilização das bandas do azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio proveniente do produto MOD13 mascararam as áreas queimadas devido à forma como o produto é gerado (seleção de pixels com base no máximo valor de NDVI).

3) A partir das imagens NDVI e EVI foi possível detectar as áreas queimadas, com a defasagem de 1 mês devido ao método de composição destas imagens.

6.2 Recomendações

Com base nestas conclusões, pode-se fazer as seguintes recomendações para a continuação de trabalhos nesta linha de pesquisa:

Em relação à classificação da cobertura vegetal:

- (a) Para uma melhor caracterização das fisionomias vegetais, assim como para uma melhor definição dos limites entre as classes mapeadas, recomenda-se à integração do mapa de vegetação com os mapas de solo, altimetria e pluviosidade, de forma a realizar as análises quantitativas.
- b) A utilização de dados de campo, como a medição do Índice de Área Foliar (LAI), levantamento da porcentagem de cobertura arbórea, análise de solos, etc., podem ser úteis para a caracterização e delimitação dos diferentes tipos de vegetação mapeados.

Em relação ao monitoramento da fenologia:

- a) Sugere-se fazer a análise e avaliação da fenologia com base nas imagens derivadas do modelo linear de mistura espectral.
- b) A utilização de imagens interanuais de anos que ocorreram fenômenos climáticos extremos (como El Niño ou La Niña) pode ajudar a compreender melhor a resposta fenológica da vegetação.
- c) A geração de um mapa de precipitação com dados de uma série temporal longa (10 anos, como geralmente é encontrado na literatura) podem fornecer um padrão de precipitação que explique melhor a relação da resposta fenológica da vegetação com a precipitação.
- d) A utilização de dados como mapa de solos, mapa altimétrico e irradiação solar ao longo do ano podem ser úteis para a realização de análises quantitativas da resposta da vegetação ao meio ambiente.

Em relação à detecção e monitoramento de desmatamento e queimadas:

- a) Nas diferentes regiões da Amazônia, os processos de desmatamento ocorrem em diferentes épocas. Sugere-se a realização de um estudo para avaliar nestas diferentes áreas os padrões temporais do desmatamento, com o objetivo de se traçar um perfil e caracterizar este processo a fim de facilitar um processo de monitoramento desta atividade pelas autoridades competentes.
- b) A validação dos resultados apresentados nesta pesquisa tem como base os dados do PRODES. Recomenda-se a realização de um estudo de avaliação do erro da estimativa de áreas desmatadas detectadas pelo sensor MODIS.
- c) Recomenda-se um estudo mais específico para esclarecer questões referentes a detecção de desmatamentos no nível de pixel do sensor MODIS, com dados de campo e dados de satélites com resolução espacial mais fina.
- d) A validação deste estudo foi feita com imagens ETM+ em áreas de floresta. Recomenda-se a avaliação desta metodologia para estudos de detecção de desmatamentos em outros tipos de formação vegetal, onde ocorrem também fenômenos de sazonalidade da vegetação.
- e) Recomenda-se a realização de um estudo utilizando os dados de focos de calor para a avaliação da detecção de áreas queimadas com base nas imagens fração sombra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achard, F.; Eva, H.; Glinni, A.; Mayaux, P.; Richards, T.; Sibig, H.J. **Identification of deforestation hot spot areas in the humid tropics**. Luxembourg: European Commission. 1998. TREES Series B, Research Report No. 4.
- Achard, F.; Eva, H.; Stibig, H.J.; Mayaux, P.; Gallego, J.; Richards, T.; Malingreau, J.P. **Determination of the world's humid tropical deforestation rates during the 1990's**. Luxembourg: European Communities. TREES Series- II Research Programme, 140p. 2002.
- Adams, J.B.; Sabol, D.E.; Kapos, V.; Almeida-Filho, R.; Roberts, D.A.; Smith, M.O.; Gillespie, A.R. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v.52, n.2, p. 137-154, 1995.
- Aguiar, A.P.D; Shimabukuro, Y.E.; Mascarenhas, N.D.A. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 4, p. 647-657, 1999.
- Almeida- Filho, R.; Shimabukuro, Y.E. Digital processing of Landsat-TM time series for mapping and monitoring degraded areas caused by independent gold miners, Roraima State, Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v.79, n. 1, p. 42-50, 2002.
- Almeida, F.F.M. Geologia da Serra da Bodoquena (Mato Grosso). **Boletim do DNPM**, v. 219, p. 1-59, 1965.
- Alves, D.S. O processo de desmatamento na Amazônia. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. **Parcerias estratégicas**, n.12, p 259-275. set. 2001.
- Alves, D.S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 14, p. 2903-2908, 2002.
- Amaral, S. **Imagens do sistema sensor AVHRR/NOAA na detecção e avaliação de desmatamentos na Floresta Amazônica: relações com dados do sistema TM/Landsat**. 1992. 195p. (INPE-5501-TDI/516). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1992.
- Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E.; Arai, E. Multitemporal fraction images derived from Terra MODIS data for analysing land cover change over the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, 2003. Aceito para publicação.
- Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E.; DeFries, R.; Morton, D. Assessment of land cover and land use change in the Brazilian Amazon using multitemporal fraction images derived from TERRA MODIS: examples from the State of Mato Grosso. **International Journal of Remote Sensing**, Submetido.
- Anderson, L.O.; Latorre, M.L.; Shimabukuro, Y.E.; Arai, E.; Carvalho Júnior, O. A. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos, 2003. (INPE-10131-RPQ/752).

- Anderson, L.O.; Mendoza, E.H.R.; Shimabukuro, Y.E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE
- Arai, E. **Convgeotiff**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002). Comunicação pessoal.
- Assunção, G.V. **Avaliação do incremento de áreas preparadas para plantio no Estado do Mato Grosso entre os anos 84/85 e 85/86 utilizando dados Landsat**. São José dos Campos: INPE, nov. 1987. 29 p. (INPE-4416-RPE/557).
- Vermote, E. F. ; Vermeulen A. **Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09)**. Version 4.0 Washington: NASA, Apr. 1999. 107p. Disponível em: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf Acesso em 14 mar. 2005. Algorithm technical background document
- Azzali, S.; Menenti, M. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 5, p. 973-996, 2000.
- Barbosa, P.M.; Stroppiana, D.; and Grégoire, J-M. An assessment of vegetation fire in Africa (1981-1991): burned areas, burned biomass, and atmospheric emissions. **Global Geochemical Cycles**, v.13, n. 4, p.933-950, 1999
- Barbosa, P.M.; Gregoire, J-M.; Pereira, J.M.C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, n. 3, p. 253-263. 1999.
- Batista, G.; Shimabukuro, Y.E.; Lawrence, W.T. The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazon region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 15, p. 3195-3210, 1997.
- Batista, G.T.; Tucker, C.J. Assessment of AVHRR data for deforestation estimation in Mato Grosso (Amazon Basin). **Remote Sensing Reviews**, v. 10, n.1-3, p. 35-50, 1994.
- Bentz, C.R. **Avaliação da transformação radiométrica dos dados TM/Landsat-5 em reflectâncias**. São José dos Campos. 172 p. (INPE-5210-TDL/431). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1990.
- Bins, L.S.; Erthal, G.J.; Fonseca,L.M.G. Um método de classificação não supervisionada por regiões. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens, 7., 1993, Recife. **Anais...** São José dos Campos: INPE, v. 4, p. 65-68, 2001. Seção Comunicações.
- Boken, V.K.; Shaykewich, C.F. Improving an operational wheat yield model using phenological phase-based normalized difference vegetation index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 20, p. 4155-4168, 2002.
- Câmara, 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, May-June.1996.

- Carreiras, J.M.B.; Pereira, J.M.C.; Shimabukuro, Y.E.; Stroppiana, D. Evaluation of compositing algorithms over Brazilian Amazon using SPOT-4 VEGETATION data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 17, p. 43427-3440, 2003.
- Carreiras, J.M.B.; Shimabukuro, Y.E.; Pereira, J.M.C. 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, G.; Nepstad, D.; McGrath, D.; Diaz, M.C.V; Santilli, M.; Barron, A.C. Frontier expansion in the Amazon: Balancing development and sustainability. **Remote Sensing of Environment**, v.44, n.3, p.34-45, 2002.
- Chavez Jr., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459-479 Apr. 1988.
- Chen, S.C.; Godoy Jr., M.; Herz, R. **Correção atmosférica através do método de subtração – aplicabilidade para analisar imagens da região amazônica**. São José dos Campos: INPE, 1995. 12 p. (INPE-5622-NTC/316).
- Cihlar, J.; Manak, D.; D'Iorio, M. Evaluation of Compositing Algorithms for AVHRR Data over Land. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 427-437, 1994.
- Colwell, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 3, p. 175-183, Mar. 1974.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Anuário brasileiro de soja**. Brasília, 138p. 2003.
- Coppin, P. R.; & Bauer, M. E. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 918– 927, 1994.
- Corr, D.G.; Tailor, A.M.; Cross, A.; Lawrence, D.H.; Manson, D.C.; Petrou, M. Progress in automatic analysis of multi-temporal remotely-sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 1175-1195, 1989.
- Cunha, A.S. **Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos cerrados**. Brasília: IPEA, 1994. 204 p.
- Data Products Handbook - Volume 2 **Vegetation dynamics, land cover** . Disponível em: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD_44.pdf. Acesso em: 31 mar. 2005.
- DeFries, R.S; Hansen, M.; Townshend, J.R.G.; Sohlberg, R. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 16, p. 3141- 3168, 1998.
- DeFries, R.S.; Hansen, M.; Steininger, M.; Dubayah, R.; Sohlberg, R.; Townshend, J.R.G. Subpixel forest cover in Central Africa from multisensor, multitemporal data. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, n. 3, p. 228-246, 1997.
- DeFries, R.S.; Houghton, R.A.; Hansen, M.C.; Field, C.B.; Skole, D. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and

- 1990s. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** v. 99, n. 22, p. 14256-14261, Out. 2002. Disponível em: <www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.182560099>. Acesso em 7 dez. 2002.
- Derenne, M.; Setzer, A.; França, H. O cinturão de soja e milho em Mato Grosso nos mosaicos IVDN/AVHRR. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 41-49.
- Dobson, M.C.; Kobayashi, T.; Pierce, L.E.; Santos, J.R.; Krug, T. Detection of selective logging and regrowth by SAR and LANDSAT. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 21-26 abr. 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos Sessão Técnica Oral.
- Domenikiotis, C.; Dalezios, N.R.; Loukas, A.; Karteris, M. Agreement assessment of NOAA/AVHRR NDVI with Landsat TM NDVI for mapping burned forested areas. **International Journal of Remote Sensing**, v.23, n.20, p.4235-4246, 2002.
- Du, Y.; Teillet, P.M.; Cihlar, J. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. **Remote Sensing of Environment**, v.82, n.1, p. 123-134, 2002.
- Duchemin, B.; Guyon, D.; Lagouarde, J. P. Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.5, p. 895-917, 1999.
- Du Pleiss, W.P. Linear regression relationships between NDVI, vegetation and rainfall in Etosha National Park, Namibia. **Journal of Arid Environments**, v.42, n. 4, p. 235-260, 1999.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A cultura da Soja no Brasil**. Brasília: Embrapa Soja, 2000. 1 CD ROM
- European Space Agency (ESA). **Using PCI Software (PCI)**. Ontário, Canadá: Dez. 1994. 478 p.
- Escada, M.I.S.; Alves, D.S. Indicadores para compartimentação da paisagem em unidades de ocupação em uma região da fronteira agrícola em Rondônia. In: In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001, p. 585-587.
- Fearnside, P. Desmatamento na Amazônia brasileira: com que intensidade vem ocorrendo? **Acta Amazônica**, v.12, n.3, 579-590, 1982.
- Fearnside, P.M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environment Conservation**, v.28,n.1, p.23-38, 2001.
- Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEMA-MT). **Sistema de detecção de focos de calor**. Cuiabá., 2001. Relatório Anual.
- Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEMA-MT). **Período de Desmatamento**. (FEMA-Cuiabá). Comunicação pessoal por telefone. jan. 2002.

- Fenshold, R.; Sandholt, I; Rasmussen, M.S. Evaluation of MODIS LAI fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3-4, p. 490-507, 2004.
- Friedl, M.A.; McIver, D.K.; Hodges, J.C.F.; Zhang, X.Y.; Muchoney, D.; Strahler, A.H.; Woodcock, C.E.; Gopal, S.; Schneider, A.; Cooper, A.; Baccini, A.; Gao, F.; Schaaf, C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 287-302, November 2002.
- Gao, X.; Huete, A.R.; Ni, W.; Miura, T. Optical- biophysical relationships of vegetation spectra, without background contamination. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 3, p. 609-620, 2000.
- Gregoire, J.M.; Tansey, K.; Silva, J.M.N. The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. **International Journal of Remote Sensing** , v.24, n.6, p.1369-1376, 2003.
- Gurgel, H.C.; Ferreira, N.J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate. **International Journal of Remote Sensing**, v.24 ,n.18, p.3595-3609, 2003.
- Gutman, G.G.; Ignatov, A. Global land monitoring from AVHRR: potential and limitations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 13, p.2301-2309, 1995.
- Hall, F.G.; Strebel, D.E.; Nickeson, J.E.; Goetz, S.J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 1, p. 11-27, 1991.
- Hansen, M.C.; DeFries, R.S.; Townshed, 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. 320-335, Nov. 2002.
- Houghton R.A.; Lawrence K.T.; Hackler J.L.; Brown S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v.7, n. 7, p.731-746, 2001.
- Houghton, R.A. The Worldwide Extent of Land-use Change. **Bioscience**, v. 44, n. 5, p. 305-313, 1994.
- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- Huete, A.R.; Justice, C.; van Leeuwen, W. **MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document**. Versão 3, p. 1-142, 1999. Disponível em: <modis-land.gsfc.nasa.gov/pdfs/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2002.
- Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- Huete, A.; Justice, C.; Liu, H. Development of vegetation and soil indexes for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v.49,n. 3, p.224– 234, 1994.

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

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)/ Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Mapa de vegetação do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 1993.

Innocêncio, N.R. Hidrografia. **Geografia do Brasil - região centro-oeste**. Rio de Janeiro: IBGE, 364 p., 1977.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **SIDRA**. Disponível em: <www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/protabl.asp?z=t&o=11>. Acesso em: 05 jan. 2003b.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite**. São José dos Campos, 2002. 22p.

_____. **Manual do SPRING**. São José dos Campos. Disponível em: <www.inpe.br/spring>. Acesso em: 20 jan. 2003.

_____. (INPE). Avaliação da alteração da cobertura florestal na Amazônia legal utilizando sensoriamento remoto orbital. Contribuição ao programa “Nossa Natureza”. São José dos Campos. 2ª Edição. 1989. 45p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE.CPTEC). **Programas especiais**: grupo queimado. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/products/queimadas/queimaestadoacu.html>. Acesso em: 20 jan. 2003.

Justice, C.O.; Townshend, J.R.G.; Vermote, E.F.; Masuoka, E.; Wolfe, R.E.; Saleous, N.; Roy, D.P.; Morisette, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n, 1-2, p. 3 –15, 2002.

Justice, C.O.; Giglio, B.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.T.; Roy, D.P.; Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F.; Kaufman, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n. 1-2, p.244-262, 2002b.

Justice, C.O.; Vermote, E.; Townshend, J.R.G.; DeFries, R.; Roy, D.P.; Hall, D.K.; Salomonson, V.V.; Privette, J.L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, R.B.; Knyazikhin, Y.; Running, S.W.; Nemani, R.R.; Wan, Z.; Huete, A.R.; van Leeuwen, W.; Wolfe, R.E.; Giglio, L.; Muller, J.P.; Lewis, P.; Barnsley, M.J. The moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, July 1998.

Krug, T. **O quadro do desflorestamento da Amazônia**. Causas e dinâmica do desenvolvimento na Amazonia. São José dos Campos, 2001. (INPE-8362-PRE/4142).

Kumar, R. **Radiation from plants-reflection and emission**: a review. Lafayette. Purdue Research Foundation), 1974, 88p. (Research Project n:5543

- Kux, H.J.H.; Santos, J.R.; Ahern, F.J.; Pietsh, R.W.; Lacruz, M.S.P. Evaluation of Radarsat for land use and land cover in the Southwestern Brazilian Amazon State of Acre. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v.24, n.4, p. 350-359, 1998.
- Lambin, E.F. Modeling and monitoring land-cover changes processes in tropical regions. **Progress in Physical Geography**, v. 2, n. 3, p. 375-393, 1997.
- Lambin, E.F.; Geist, H. Regional differences in tropical deforestation. **Remote Sensing of Environment**, v.45, n.6, p.22-36, 2003.
- Lambin, E.F.; Geist, H.J.; Lepers, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, v.28, p. 205-241, 2003.
- Lashof, D.A. The contribution of biomass burning to global warming: an integrated assessment. In: Levine, J.S. (Ed.) **Global biomass burning**. Cambridge: MIT Press, p. 441-444, 1996.
- Lee, R.; Yu, F.; Price, K.P. Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 12, p. 2505-2512, 2002.
- Levine, J.S.; Wesley III, R.C.; Winstead, E.L.; Thinehart, R.P.; Cahoon Jr., D.R.; Sebacher, D.K.; Sebacher, S.; Stocks, B.J. Biomass burning: combustion emissions, satellite imagery, and biogenic emissions. In Levine J.S. (Ed.) **Global biomass burning**. Cambridge: MIT Press., p. 264-271. 1991
- Lillesand, T.M.; Kiefer, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 724p.
- Lombardi, R.J.R. **Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/LANDSAT**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- INPE, São José dos Campos, 2003.
- Los, S.O. Calibration adjustment of the NOAA AVHRR Normalized Difference Vegetation Index without recourse to component channel 1 and 2 data. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, p.1907-1917, 1993.
- Lu, H.; Raupach, M.R.; Mcvicar, T.M.; Barret, D.J. .Decomposition of vegetation cover into woody and herbaceous components using AVHRR NDVI time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 1, p. 1-18, 2003.
- Markham, B.L.; Barker, J.L. **Landsat MSS and TM post calibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures**. Lanham: EOSAT, 1986. 21 p. (Landsat Technical notes n. 1).
- Maselli, F.; Romanelli, S.; Bottai, L.; Zipoli, G. Use of NOAA-AVHRR NDVI images for estimation of dynamic fire risk in Mediterranean areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 2, p.187-197, 2003.
- Mas, J-F. Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v.20, n. 1, p.139-152, 1999.
- Matsushita, B.; Tamura, M. Integrating remotely sensed data with na ecosystem model to estimate net primary productivity in East Ásia. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 1, p. 58-66, 2002.

- Meinzer, F.C.; Andrade, J.L.; Goldstein, G.; Holbrook, N.M.; Cavelier, J.; Wright, S.J. Partitioning of soil water among canopy trees in a seasonally dry tropical forest. **Oecologia**, v.121, p. 293-301, 1999.
- Mather, P.M. **Computer processing of remotely-sensed images**. Chichester: John Wiley & Sons, 1999, 292p.
- Mayaux, P.; Lambin, E.F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: A two-step correction function for proportional errors due to spatial aggregation. **Remote Sensing of Environment**, v.53, n. 1, p.1–16, 1995.
- Menzel, A.; Estrella, N.; Peter, F. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. **Global Change Biology**, v.7, n. 6, p.657-666, 2001.
- Moran, E.; Brondizio, E.; Paul, M. Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data. **BioScience**, v.44, n. 5, p. 329-338, 1994.
- Moreira, A.A.N. Relevô. In: Galvão, M. G. (Coord). **Geografia do Brasil**. Região Centro-Oeste. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. v. 4, p. 1-34.
- Moreira, M.A.; Shimabukuro, Y.E. **Índices de vegetação**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002). Comunicação Pessoal.
- Moreira, R.C. **Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação**. 181p. (INPE-7528-TDI/735) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2000.
- Myers, N. **Conversion of tropical moist forest**. Washington, DC: National Academy of Science (NAS), 1980.
- Myers, N. Tropical forest and their species going? In: E. O. Wilson (ed). **Biodiversity**. Washington: National Academy Press, p. 28- 35. 1988.
- Myneni, R.B.; Keeling, C.D.; Tucker, C.J.; Asrar, G.; Nemani, R.R. Increase in plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. **Nature**, v.386, n. 6626, p. 698-701, 1997.
- Nations, J. D. **Tropical rainforest**: endangered environment. New York: 1988.
- Nimer, E. Clima. **Geografia do Brasil**. Região Centro-Oeste. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. 364 p.
- Page, S.E.; Siegert, F.; Rieley, J.O.; Boehm, H.D.V.; Jaya, A.; Limin, S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. **Nature**, v. 420, n.6911, p. 61-65, Nov. 2002.
- Pereira, A.C.; Setzer, A.W. Comparison of fire in savannas using AVHRR's Channel 3 and TM images. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.10, p.1925-1937, 1996.
- Pereira, J.M.C.; Chuvieco, E.; Beaudoin, A.; Desbois N. Remote sensing of burned areas: a review. In: Chuvieco, E. (ed). **A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires**. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, 1997. p. 127-183.

- Ponzoni, F.J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: **Sensoriamento Remoto - reflectância dos alvos naturais**. Brasília: UnB, 2001., Cap. 5, p. 157-202.
- Price, J.C. Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook. **Remote Sensing of Environment**, v.22, n.1, p. 3-9, 1987.
- Price, J.C. Comparing MODIS and ETM+ data for regional and global land classification. **Remote Sensing of Environment**, v.86, n. 4, p. 491-499, 2003.
- Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia (PRODES). Disponível em: <www.grid.inpe.br/amz/html1/Pag-01.htm>. Acesso em: 27 jan. 2003.
- RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SC. 21 - Juruena. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1980. 456 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.20).
- RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SD. 21 - Cuiabá. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1982. 540 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.26).
- RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SE. 21 - Corumbá. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1982a. 448 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v.27).
- Ratter, J.A.; Ribeiro, J.F.; Bridgewater, S. The Brazilian cerrado and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, n. 80, p. 223-230, 1997.
- Richards, J.A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Campbell, Australia: Springer-Verlag, 1993. 339 p.
- Ridao, E.; Conde, J.R.; Mínguez, M.I. Estimating fAPAR from Nine Vegetation Indices for Irrigated and Nonirrigated Faba Bean and Semileafless Pea Canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 1, p.87-100, 1998.
- Robinove, C.J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 5, p. 781-784, 1982.
- 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, 167-172. 2000.
- Rodriguez-Yi, J.L. **Mapeamento e Monitoramento da vegetação do estado do Mato Grosso através de imagens AVHRR-NOAA**. São José dos Campos. 135p. (INPE-6816-TDI/638). Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - INPE, 1998.
- Roy, D.P.; Lewis, P.E.; Justice, C.O. Burned area mapping using multi-temporal moderate resolution data – a bi-direcional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p.263-286, 2002.
- Royer, A.; Goïta, K.; Ansseau, C.; Faizoun, A.; Saint, G. Analysis of boreal forest dynamics using the global vegetation index. **Remote Sensing Reviews**, v. 15, p. 265-282, 1996.
- Rudel, T.K. Population, Development, and Tropical Deforestation: A cross-national study. **Rural Sociology**. v. 54, n. 3, p. 327-338. 1989.

Sá, A.C.L.; Pereira, J.M.C.; Vasconcelos, M.J.P.; Silva, J.M.N.; Ribeiro, N.; Awasse, A. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, n. 24, p.1783-1796, 2003.

Salomonson, V.V.; Barker, J.L. EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: phase C/D status and comments on calibration and georeferencing approaches. In: Annual AAS Guidance and Control Conference, 15., Keyston, Colorado, Feb. 8-12, 1992. **Proceedings...** Keystone, CO: AAS, 1992. Paper AAS 92-004.

Salomonson, V.V.; Toll, D.L. Execution phase (C/D) spectral band characteristics of the EOS Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS-N) facility instrument, **Advances in Space Reserach**, v.2, n.3, p.231-236, 1990.

Schimel D.S.; House, J. I.; Hibbard, K. A.; Bousquet, P.; Ciais, P.; Peylin, P.; Braswell, B. H.; Apps, M. J.; Baker, D.; Bondeau, A.; Canadell, J.; Churkina, G.; Cramer, W.; Denning, A. S.; Field, C. B.; Friedlingstein, P.; Goodale, C.; Heimann, M.; Houghton, R. A.; Melillo, J. M.; Moore, B.; Murdiyarso, D.; Noble, I.; Pacala, S. W.; Prentice, I. C.; Raupach, M. R.; Rayner, P. J.; Scholes, R. J.; Steffen, W. L.; Wirth, C. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. **Nature**, v.414, p.169-172. 2001

Schott, J.R.; Salvaggio, C; Volchok, W. Radiometric Scene normalization using pseudoinvariant features. **Remote Sensing of Environment**, v.26 , n. 6860, p. 1-6, 1988.

Schowengerdt, R.A. **Remote sensing and image interpretation**. San Diego: Lehigh Press, 1997. 522 p.

Seen, D.L.; Mougín, E.; Rambal, S.; Gaston, A.; Hiernaux, P. Coupled with Multispectral Satellite Data II: Toward the control of its simulations by remotely sensed indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, p.194-206, 1995.

Sellers, P.J.; Dickinson, R.E.; Randall, D.A.; Betts, A.K.; Hall, F.G.; Berry, J.A.; Collatz, G.J.; Denning, A.S.; Mooney, H.A.; Nobre, C.A.; Sato, N.; Field, C.B.; Henderson-Sellers, A. Modeling the exchange of energy, water and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, n. 5299, p. 502-509, 1997.

Setzer, A.W.; Malingreau, J.P. AVHRR monitoring of vegetation fires in the tropics: toward the developmemnt of a global product. In: Levine, J.S. ed. **Biomass burning and global change**. Cambridge/London, MIT Press, Cap. 3, p. 25-39. v.1. 1996.

Shimabukuro, Y.E.; Mello, E.M.K.; Moreira, J.C.; Duarte, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra do modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1997. 16 p. (INPE-6147-PUD/029).

Shimabukuro, Y.E.; Novo, E.M.; Mertes, L.K. **Mosaico digital de imagens Landsat-TM da planície do Rio Solimões-Amazonas no Brasil**. São José dos Campos: (INPE-6746-RPQ/681). 1998. 45 p.

Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 67-74, 1995.

- 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.
- Silveira Júnior, J.C.; Alves, D.S.; Escada, M.I. Utilização de técnicas de análise espacial no estudo da correlação entre expansão das áreas desflorestadas e da fronteira agropecuária no Estado do Mato Grosso. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 503-508.
- Singh, A. Digital change detection techniques using remotely sensed data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.
- Skole, D.L.; Chomentowski, W.H.; Salas, W.A.; Nobre, C.A. Physical and human dimensions of deforestation in Amazônia. **Biosciences**, v.44, n. 5, p. 314-322, 1994.
- Slater, P.N.; Biggar, S.F.; Holm, R.G.; Jackson, R.D.; Mao, Y.; Moran, M.S.; Palmer, J.M.; Yuan, B. Reflectance- an radiance –based methods for the In-flight absolute calibration of multispectral sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.22, n.1, p. 11-37, 1987.
- Soares Filho, B.S. Fragmentação da paisagem florestal em função da estrutura e dinâmica fundiária no norte do Mato Grosso. In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001. p. 987-995.
- Solar Spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35, n. 3, p. 675-232, 1997.
- Sousa, A.M.O.; Pereira, J.M.C.; Silva, J.M.N. Evaluating the performance of multitemporal image compositing algorithms for burned area analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.6, p.1229-1236, 2003.
- Souza, I.M.; Martini, P.R.; Duarte, V.; Moreira, M.A.; Aulicino, L.C.N.; Rodriguez Yi, J.L.; Shimabukuro, Y.E.; Rudorff, B.F.T. Parques indígenas e fronteiras agrícolas na Chapada dos Parecis (MT): uma análise temporal por imagens TM-LANDSAT. [CD-ROM] In: Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9. , Santos, 1998. **Anais...** São José dos Campso: INPE, 1998.
- Spanner, M. A., Pierce, L. L., Running, S. W., and Peterson, D. L. The seasonality of AVHRR data of temperate coniferous forests: relationship with leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n.2, p. 97–112, 1990.
- Spiegel, M.R. **Estatística**. 2.ed. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 454p. 1985.
- Strahler, A.; Muchoney, D.; Borak, J.; Friedl, M.; Gopal, S.; Lambin, E.; Moody, A. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document**. Versão 5.0, p. 1-72, may 1999. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/atdb/atdb_mod12.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2002.

Strahler, A.; Townshend, J.R.G.; Muchoney, D.; Borak, J.; Friedl, M.; Gopal, S.; Hyman, A.; Moody, A.; Lambin, E. **MODIS land cover product algorithm theoretical basis document (ATBD)**. Version 4.1. Washington: NASA, EOS-MTPE, 1996, 102p.

Strahler, A.H.; Moody, A.; Lambin, E. **MODIS Land cover product: Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)**. Version 3.0, 1995. Disponível em: <modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MOD_14_40.PDF>. Acesso em: 7 nov. 2002.

Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia/Instituto de Pesquisa Aplicada (SUDAM/IPEA). **Diagnóstico e caracterização macrossocial da Amazônia Legal** – perfil da saúde na Amazônia Legal e o contexto brasileiro. Disponível em: www.ada.gov.br/gedes/estudos_diagnostico_cenarizacao/perfil_saude/projeto02.pdf> Acesso em: nov. 2003.

Tanré D.; Deroo C.; Duhaut P.; Herman M.; Morcrette J.J.; Perbos J.; Deschamps P.Y.; Description of a computer code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum. **Inteational Journal of Remote Sensing**, v.11, n. 4, p. 659-668, 1990.

Tardin, A.T.; Cunha, R.P. **Avaliação da alteração da cobertura florestal na Amazônia legal utilizando sensoriamento remoto orbital**. São José dos Campos: INPE, 1989. 43 p. (INPE-5010-RPE/607).

Telles, J.; Samii, M.V.; Doll, C.E. Overview of TDRSS. **Advances in Space Research**, 16, n. 12. p. 1267-1276, 1995.

Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n.1-2, p. 351-359, 2002.

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**. n.35, n. 2-3, p.243–255, 1991.

Townshend, J.R.G.; Justice, C.O. Selecting the spatial resolution of satellite sensors required for global monitoring of land transformations. **International Journal of Remote Sensing**, v.9, n. 2, p.187–236, 1988.

Tucker, C.J.; Townshend, J.R.G.; Goff, T.E. African land-cover classification using satellite data. **Science**, v.227, n. 4685, p. 369–375, 1985.

Tucker, C.J.; Sellers, P.J. Satellite remote sensing of primary productivity. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, p. 1395-1416, 1986.

Unganai, L.S; Kogan, F.N. Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v.63, n. 3, p. 219-232, 1998.

van Leeuwen, W.; Huete, A.R.; Jia, S.; Walthall, C.L. Comparison of vegetation index compositing scenarios: BRDF versus maximum VI approaches. In: International Geoscience and Remote Sensing Seminar, IEEE-IGARSS '96, 1996, Lincoln Nebraska. **Proceedings...** Lincoln, Nebraska: IEEE-IGARSS, v.3, p. 1423-1425. 1996.

van Leeuwen, W.; Huete, A.R.; Laing, T.W. MODIS vegetation index compositing approach: a prototype with AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 69, p. 264-280, 1999.

Velloso, H.P. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. estudo fitogeográfico. In: RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral **Folha SC. 22 - Araguaia. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: DNPM, 1974. 426 p. (Levantamento dos Recursos Naturais,v.4.)

Vermote, F.; Tanré, D.; Deuzé, J. L.; Herman, M.; Morcrette, J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35 n. 3 p. 675-232, 1997.

Walthall, C.L.; Norman, J.M.; Welles, J.M.; Campbell, G.; Blad, B. L. Simple equation to approximate the bi-directional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. **Applied Optics**, v.24, n.3, p. 383-387, 1985.

Zhan, X.; Sohlberg, R.A.; Townshend, J.R.G.; DiMiceli, C.; Carroll, M.L.; Eastman, J.C.; Hansen, M.C.; DeFries, R.S. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 336-350, Nov. 2002.

APÊNDICE A

EXEMPLOS DOS PROGRAMAS GERADOS EM ANÁLISE LEGAL (LINGUAGEM ESPACIAL DE GEOPROCESSAMENTO ALGÉBRICO) NESTA DISSERTAÇÃO

- Geração de mosaicos a partir de valores máximos de NDVI.

{Imagem p1, p2, p3, p4, p5, p6 ("data 1");

Imagem p7, p8, p9, p10, p11, p12 ("1data 2");

Imagem p13, p14, p15, p16, p17, p18 ("Final");

//Primeira Data

p1 = Recupere (Nome = "bandaBLUE");

p2 = Recupere (Nome = "bandaMIR");

p3 = Recupere (Nome = "bandaNIR");

p4 = Recupere (Nome = "bandaRED");

p5 = Recupere (Nome = "bandaNDVI");

p6 = Recupere (Nome = "bandaEVI");

//Segunda Data - 113

p7 = Recupere (Nome = "bandaBLUE");

p8 = Recupere (Nome = "bandaMIR");

p9 = Recupere (Nome = "bandaNIR");

p10 = Recupere (Nome = "bandaRED");

p11 = Recupere (Nome = "bandaNDVI");

p12 = Recupere (Nome = "bandaEVI");

//Imagens Novas na categoria

p13 = Novo(Nome="_BLUEbanda",ResX=250,, ResY=250,);

```

p14 = Novo( Nome="_MIRbanda",ResX=250,, ResY=250,);
p15 = Novo( Nome="_NIRbanda",ResX=250, ResY=250,);
p16 = Novo( Nome="_REDBanda",ResX=250, ResY=250,);
p17 = Novo( Nome="_NDVIbanda",ResX=250, ResY=250,);
p18 = Novo( Nome="_EVIbanda",ResX=250, ResY=250,);

p13 = (p5>p11) ? p1 : p7;
p14 = (p5>p11) ? p2 : p8;
p15 = (p5>p11) ? p3 : p9;
p16 = (p5>p11) ? p4 : p10;
p17 = (p5>p11) ? p5 : p11;
p18 = (p5>p11) ? p6 : p12;}

```

- Geração da grade de precipitação acumulada.

```
{Numerico
```

```
Numerico0,Numerico1,Numerico2,Numerico3,Numerico4,Numerico5,Numerico6,Num
erico7,Numerico8,Numerico9,Numerico10,Numerico11,Numerico12 ("precipita2002");
```

```
Numerico0= Novo(Nome="precipita-anual",      ResX=250,ResY=250, Escala =
500000,Min=0, Max=6000);
```

```
Numerico1= Recupere(Nome="janeiro");
```

```
Numerico2= Recupere(Nome="fevereiro");
```

```
Numerico3= Recupere(Nome="março");
```

```
Numerico4= Recupere(Nome="abril");
```

```
Numerico5= Recupere(Nome="maio");
```

```
Numerico6= Recupere(Nome="junho");
```

```
Numerico7= Recupere(Nome="julho");
```

```
Numerico8= Recupere(Nome="agosto");
```

```
Numerico9= Recupere(Nome="setembro");
```

```

Numerico10= Recuperar(Nome="outubro");

Numerico11= Recuperar(Nome="novembro");

Numerico12= Recuperar(Nome="dezembro");

Numerico0= (Numerico1+ Numerico2+ Numerico3+ Numerico4+ Numerico5+
Numerico6+ Numerico7+ Numerico8+ Numerico9+ Numerico10+ Numerico11+
Numerico12);

}

```

- Conversão de DN para reflectância aparente.

```

{
Imagem Im1, Im2, Im3, Im4, Im5, Im7, Im8, Imare1, Imare2, Imare3, Imare4,
Imare5, Imare7, Imare8
("imag_c_agosto_1999");
Digital Imnt1, Imnt2, Imnt3, Imnt4, Imnt5, Imnt7, Imnt8
("imag_c_agosto_1999_ref");
Im1=Recupere (Nome="b1");
Im2=Recupere (Nome="b2");
Im3=Recupere (Nome="b3");
Im4=Recupere (Nome="b4");
Im5=Recupere (Nome="b5");
Im7=Recupere (Nome="b7");

//Imagem reflectância (numérico)

Imnt1=Novo (Nome="ref_b1_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);
Imnt2=Novo (Nome="ref_b2_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);
Imnt3=Novo (Nome="ref_b3_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);
Imnt4=Novo (Nome="ref_b4_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);
Imnt5=Novo (Nome="ref_b5_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);
Imnt7=Novo (Nome="ref_b7_255", ResX=30, ResY=30, Escala=50000, Min=0,
Max=100);

// imagem "exibição" da reflectância

Imare1=Novo (Nome="ref_b1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Imare2=Novo (Nome="ref_b2", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);

```

```
Imare3=Novo (Nome="ref_b3", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Imare4=Novo (Nome="ref_b4", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Imare5=Novo (Nome="ref_b5", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Imare7=Novo (Nome="ref_b7", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
```

```
elev=50.49277578219856/57.2957795130;
zen=90/57.2957795130 - elev;
pi=3.141592654;
dmax=255;
d=1,014918631;
```

```
//Parâmetros de calibração são obtidos em: //Brockmann C. and H. Schiller, 1994: A
//Recalibration of the Thematic Mapper sensor on-board Landsat-5 for //visible and
//near--infrared radiation. In preparation for submission to //International Journal of
//Remote Sensing.
```

```
//Eosat Landsat Technical Notes (1986)
// Considerando a pós calibracao dos detectores
//http://earth.esa.int/0xc1cce41c_0x0000069c
```

```
//Brockmann C. and H. Schiller, 1994: A Recalibration of the Thematic Mapper sensor
//on-board Landsat-5 for //visible and near--infrared radiation. In preparation for
//submission to International Journal of Remote //Sensing.
```

```
//Due to the changed sensitivity of the detectors, the prelaunch radiometric ranges,
//expressed in Lmin and //Lmax and given in Table 1, are no longer appropriate. The
//output of a detector to a constant input //radiance changes with time, (Brockmann and
//Schiller, 1994). Therefore, the radiometric ranges have been //changed and the new
//values are given in Table 2. Because the time series of the calibration parameters
//became comparable constant after the initial time in space, it is not expected to adjust
//the radiometric //range another time.
```

```
//PATH ROW
```

```
//227 62
```

```
//considerando sensor TM depois de ser realizado um estudo de pós-calibracao devido a
perda de sensibilidade do sensor//
```

```
Lmin1=-1.5;
Lmin2=-3.1;
Lmin3=-2.7;
Lmin4=-2.5;
Lmin5=-0.45;
Lmin7=-0.30;
```

```
Lmax1=185;
```

Lmax2=342;

Lmax3=245;

Lmax4=270;

Lmax5=36;

Lmax7=19;

Esun1=1957;

Esun2=1829;

Esun3=1557;

Esun4=1047;

Esun5=219.3;

Esun7=74.52;

Imnt1= ((Lmin1 + (Lmax1 - Lmin1) * (Digital (Im1 - 1)/ dmax)) * pi * d^2) /
(Esun1*cos(zen));

Imare1= Imagem (Imnt1*255);

Imnt2= ((Lmin2+(Lmax2-Lmin2) * (Digital (Im2 - 1)/ dmax)) * pi * d^2) /
(Esun2*cos(zen));

Imare2= Imagem (Imnt2*255);

Imnt3= ((Lmin3 + (Lmax3 - Lmin3) * (Digital (Im3 - 1) / dmax)) * pi * d^2) /
(Esun3*cos(zen));

Imare3 = Imagem (Imnt3 * 255);

Imnt4= ((Lmin4 + (Lmax4 - Lmin4) * (Digital (Im4 - 1) / dmax)) * pi * d^2) /
(Esun4*cos(zen));

Imare4 = Imagem (Imnt4 * 255);

Imnt5= ((Lmin5+(Lmax5-Lmin5)*(Digital (Im5 - 1)/dmax)) * pi * d^2)/(Esun5*cos
(zen));

Imare5 = Imagem (Imnt5 * 255);

Imnt7= ((Lmin7+(Lmax7-Lmin7)*(Digital (Im7 - 1)/dmax)) * pi * d^2)/(Esun7*cos
(zen));

Imare7 = Imagem (Imnt7 * 255);

}