



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.05.16.14-TDI

ABORDAGEM MULTISENSOR APLICADA AO MONITORAMENTO DE FLORESTAS TROPICAIS ATINGIDAS POR INCÊNDIOS EM RORAIMA

Haron Abraham Magalhães Xaud

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pelo Dr. João
Roberto dos Santos, aprovada em
25 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DRRE8E>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.05.16.14-TDI

ABORDAGEM MULTISENSOR APLICADA AO MONITORAMENTO DE FLORESTAS TROPICAIS ATINGIDAS POR INCÊNDIOS EM RORAIMA

Haron Abraham Magalhães Xaud

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pelo Dr. João
Roberto dos Santos, aprovada em
25 de abril de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DRRE8E>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

X17a Xaud, Haron Abraham Magalhães.
Abordagem multisensor aplicada ao monitoramento de florestas tropicais atingidas por incêndios em Roraima / Haron Abraham Magalhães Xaud. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxvi + 127 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.05.16.14-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientador : Dr. João Roberto dos Santos.

1. incêndios florestais. 2. degradação florestal.
3. ALOS/PALSAR. 4. MODIS. 5. TM. 6. áreas queimadas. I.Título.

CDU 528.88(814.4)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

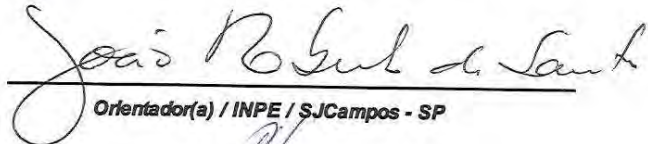
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



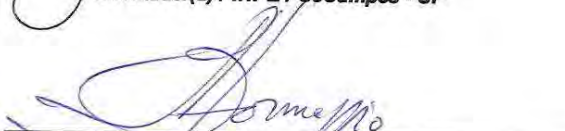
Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. João Roberto dos Santos




Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Antonio Roberto Formaggio



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Eduardo Oliveira Cruz Aragão



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Irving Foster Brown



Convidado(a) / UFAC / Rio Branco - AC

Dra. Luciana Spinelli Araujo



Convidado(a) / EMBRAPA / Campinas - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Haron Abraham Magalhães Xaud**

São José dos Campos, 25 de Abril de 2013

*A meu pai, Jaber, com saudades eternas,
a minha mãe, Yêda,
a minha esposa, Maristela,
a meus filhos, Felipe, Henrique e Pedro,
a meus irmãos, Hadime e Jeane,
a todos os meus familiares e amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a oportunidade da realização deste trabalho à Embrapa e ao INPE, pelo suporte recebido em todas as etapas do doutorado. Representando a Embrapa Roraima e meus colegas de trabalho, agradeço a meus Chefes Francisco Joaci de Freitas Luz, Marcelo Francia Arco-Verde e Otoniel Ribeiro Duarte, pelo máximo suporte recebido. Ao meu orientador, Dr. João Roberto dos Santos, sou grato pela confiança, paciência, pelas cobranças, pelos ensinamentos e por todos os momentos de convívio. Na figura do Dr. Flávio Ponzoni agradeço aos coordenadores da pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Sou grato a todos os professores do INPE em seu exemplo de compromisso e dedicação, em especial àqueles que pude conviver mais de perto: os Doutores, Yosio Shimabukuro, Antônio Roberto Formaggio, Alberto Setzer, Lênio Galvão, Milton Kampel, Nelson de Jesus, Antônio Miguel, Camilo Rennó, e as Doutoradas, Maria Isabel S. Escada, Cláudia Almeida, Leila Fonseca e Evlyn Novo. Agradeço aos Doutores Paulo Inácio e João Batista, por terem me recebido tão bem em sua disciplina na USP. Aos colegas Egídio Arai e Ramon Freitas, agradeço o aprendizado e a cedência de dados relativos ao MODIS. Ao Márcio Pupin Mello, todas as tiradas de dúvidas relativas ao uso do “R”. Ao André Lima, agradeço as primeiras discussões sobre produtos para detecção de áreas queimadas. Aos colegas, Polyanna Bispo, Emerson Servelo, Viviana Aguilar, Denilson Ribeiro, Daniela França, Yhasmin Mendes, Marcos Freitas e Daniel Silva, agradeço as diversas discussões estatísticas, ecológicas e “remoteiras”. Aos colegas Igor Narvaes, Cleber Gonzalez e Arnaldo Queiroz, agradeço às discussões sobre RADAR. Aos colegas Carolina Pinho e Thales Korting, os ensinamentos na utilização de classificação orientada a objetos. Agradeço à Flora, que esteve comigo em campo junto com nosso orientador e que dividiu grande parte das dúvidas e acertos nos processamentos para análise da vegetação. A todos os colegas do INPE, em especial os da turma de 2008, obrigado por toda a convivência positiva. Agradeço aos moradores da região do Apiaú, Roxinho e P.A. Vila Nova em Roraima, que me receberam

sempre com muita atenção e fraternidade, em especial ao Baer, Pedro, Chico, Nice, Militão, só para citar alguns. Ao Sr. Erli Pedrosa, parobotânico aposentado da Embrapa, agradeço a eficiência e dedicação ao trabalho. Às pessoas que estão conosco não apenas nos momentos de trabalho, com muito carinho agradeço à minha esposa e colega, Maristela R. Xaud, especialmente seu amor, suas palavras de apoio e a oportunidade de nosso crescimento, acadêmico, profissional, matrimonial e fraternal. O desafio de fazermos todas as etapas do doutorado juntos foi imenso e sua compreensão, força e apoio foram fundamentais. Se Deus quiser vamos conseguir realizar tudo o que tivemos que adiar para algum momento após a conclusão do doutorado. Aos meus filhos queridos, agradeço o nosso aprendizado diário, os abraços, as massagens, e, principalmente, os “Poxa pai, você só quer saber de escrever esta tese! Ao meu pai (Boa Vista-03.ago.1931/SJC-18.dez.2010) com eterno amor e saudades e à minha mãe sempre amiga, fundamentais na minha vida, agradeço todos os ensinamentos recebidos, toda a confiança irrestritamente depositada, o amor incondicional, a amizade infinitamente crescente e a solidez de sua fé em Deus. Aos meus queridos irmãos, sobrinhos, sogra, cunhados e demais familiares, agradeço o amor e a torcida constantes. Aos meus amigos do Humaitá (RJ), aos “camarões” da Rural (UFRRJ) e aqueles que se tornaram indeléveis com o passar dos anos, agradeço todo o carinho e torcida. Ao Padre Rinaldo e a toda a comunidade da Catedral São Dimas (SJC), agradeço pelo abençoado porto seguro de conhecimento e exercício da fé cristã. À amiga Sonia Redi, agradeço todo o apoio, aprendizado, energia positiva e os momentos de partilha e fraternidade. Agradeço a todos aqueles que eventualmente não tenha lembrado de citar, mas que de uma forma ou de outra, contribuíram para este tempo positivo de doutorado, no qual busquei aproveitar ao máximo nesta instituição a qual considero minha segunda casa de trabalho, o INPE. E por fim e sobretudo, agradeço a Deus, pois “sem amor eu nada seria”.

Muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho analisou a degradação de florestas tropicais causada por incêndios florestais de origem antrópica que vem acometendo uma região no Estado de Roraima de forma recorrente e intensa. Na região localizada no chamado Arco do Fogo no Estado, foram inventariadas 50 parcelas amostrais (12,5ha), divididas em 5 diferentes níveis de degradação por fogo, desde áreas não atingidas até áreas atingidas por 3 grandes incêndios em menos de 10 anos: 1998, 2003 e 2007. As diferentes coberturas vegetais resultantes (florestas degradadas) foram inventariadas, caracterizadas e analisadas quanto a seus aspectos florísticos e fitossociológicos e comparadas às áreas não atingidas pelos incêndios. Além dos levantamentos de campo foram testadas e utilizadas técnicas de sensoriamento remoto com sensores (Landsat/TM-ETM+, ALOS/PALSAR e Terra/MODIS) de características complementares quanto às resoluções espectrais, espaciais e temporais, visando o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento em abordagem multisensor para a detecção das áreas afetadas pelos incêndios. Os resultados revelaram a intensa degradação principalmente para as áreas atingidas de duas a três vezes por incêndios, bem como uma complexa dinâmica de espécies ao longo do tempo. De acordo com a maior recorrência destes eventos impactantes, alguns indicadores avaliados tais como, riqueza de espécies (S), diversidade de Shannon (H'), área basal, altura total média, tiveram tendência de redução, enquanto aumentaram: a densidade relativa, a frequência e a dominância de espécies pioneiras, principalmente de Cecropias. No extremo da degradação florestal as áreas mais intensamente impactadas perderam suas características florestais assemelhando-se a áreas de sucessão secundária típicas de corte raso seguido de rotações de agricultura itinerante de derruba e queima. Em relação às alternativas de sensoriamento remoto empregadas, as imagens MODIS foram eficientes para a detecção das áreas afetadas por incêndios na área de estudo, com complementaridade advinda das imagens Landsat TM ETM+ e das imagens texturas derivadas das imagens ALOS/PALSAR (HH). Utilizando produtos MOD-09 e MOD-13 foi verificado que foi possível classificar áreas atingidas pelo incêndio de 2003, enquanto o MCD45A1 não conseguiu. O ambiente de classificação orientado a objetos e técnicas de otimização na escolha de atributos para a classificação mostraram-se robustos e flexíveis para apoiarem metodologias baseadas em abordagem multisensor. A série temporal NDVI filtrada (derivada do MOD-13) revelou-se uma boa alternativa para a realização de levantamento de áreas queimadas para a área de estudo, adicionando informações que melhoraram as classificações em abordagem multisensor. Os levantamentos florestais de campo foram adequados para a caracterização e confirmação do mosaico de degradação florestal presente na área de estudo em consequência dos incêndios florestais recorrentes.

MULTISENSOR APPROACH APPLIED TO MONITORING TROPICAL FORESTS AFFECTED BY FIRES IN RORAIMA

ABSTRACT

In this study we analyzed the degradation of tropical forests caused by forest fires of anthropogenic origin that have been affecting a region in the state of Roraima on a recurring and intense way. An inventory has been made of 50 sample plots (12.5 ha) located in the region called Arc of Fire, which are divided into 5 different levels of degradation by fire, from “areas not affected by” to “areas affected 3 times by” fires in less than 10 years: 1998 , 2003 and 2007. Different resulting vegetation covers (degraded forest) were inventoried, characterized, analyzed for their floristic and phytosociological aspects, and compared to areas not affected by the fires. In addition to field surveys, remote sensing techniques with different sensors (Landsat TM, ALOS / PALSAR and MODIS) with complementary characteristics (spectral, spatial and temporal resolutions) were tested for the development of a monitoring methodology in a multisensor approach, aimed to detecting areas affected by fires. Results showed rapid degradation mainly to the affected areas two to three times by fire, as well as a complex dynamic species over time. According to an increased recurrence of these events and their impacts, some indicators such as species richness (S), Shannon diversity (H'), basal area, and total height average tended to decrease, while the relative density, frequency and dominance of pioneer species increased. Areas of extreme forest degradation which were more intensely impacted have lost their forest characteristics and now resemble areas of secondary succession typical of clearcutting followed by rotations of itinerant slash and burn agriculture. Regarding alternative remote sensing employed, MODIS had higher efficiency for the detection of areas affected by fires in the study area, with complementary of Landsat TM images and textures derived from ALOS / PALSAR (HH). Using MOD-09 and MOD-13 it was found that it was possible to classify areas affected by the fire of 2003, while the MCD45A1 failed. The environment of object-based image analysis and feature space optimization were robust and flexible to support methodologies based on multisensor approach. The filtered NDVI time series (derived from MOD-13) proved to be a good alternative for conducting survey of burned areas for the study area, adding information that improved classifications in multisensor approach. Forest field surveys were essential for the characterization and confirmation of this mosaic of forest degradation in the study area as a result of recurrent wildfires.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Figura 2.1 – Áreas avaliadas no grande incêndio de Roraima em 1998 por IBAMA (1998) e Nascimento et al. (2000). A linha tracejada em vermelho realça as duas áreas mais fortemente atingidas..... | 7 |
| Figura 2.2 – Comportamento espectral de cicatrizes de queimadas em imagem TM. | 10 |
| Figura 2.3 – Aplicação de índices espectrais para realce de áreas queimadas; em (a) e (b) as áreas de vegetação saudável aparecem em tons claros (NDVI claro), em (b) as áreas queimadas aparecem em tons escuros; já em (d) o BAI realça as áreas queimadas em tons claros..... | 12 |
| Figura 2.4 – Acertos e erros em função da área do polígono queimado usando imagens MODIS (MOD-14) e TM (referência). | 15 |
| Figura 3.1 – Localização da área de estudo..... | 25 |
| Figura 3.2 – Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990)..... | 28 |
| Figura 3.3 - Distribuição de focos de calor para Roraima (1999-2004). | 29 |
| Figura 3.4 - Focos de calor por município em Roraima (1999-2007), NOAA-12..... | 31 |
| Figura 3.5 - Distribuição dos focos de calor 1999-2009, NOAA-12 e NOAA-15. | 31 |
| Figura 3.6 – Exemplo do comportamento de uma série temporal de índices de vegetação (EVI2) medida para um “pixel” do MODIS de área florestal, antes (linha em azul) e depois da filtragem (linha em vermelho). | 34 |
| Figura 3.7 – À esquerda, imagem PALSAR (HH) em intensidade nas três datas utilizadas 2008-2009-2010 (composição RGB); à direita, imagem TM de março de 2007 bandas 5,4,3 (composição RGB). | 35 |
| Figura 3.8 – Fluxograma da pesquisa mostrando as 4 principais etapas do trabalho: (1) Levantamento de campo; e os Experimentos I, II e III de sensoriamento remoto. | 36 |
| Figura 4.1 – Curvas espécie-área para cada um dos estratos temáticos: (FN) Florestas primárias não incendiadas; (FQ1B) Florestas atingidas por 01 incêndio | |

- de baixa intensidade; (FQ1A) Florestas atingidas por 01 incêndio de alta intensidade; (FQ2) Florestas atingidas por 02 incêndios; (FQ3) Florestas atingidas por 03 incêndios..... 46
- Figura 4.2 – Riqueza (S) e uniformidade (J') para as 5 classes de degradação por incêndios em florestas na região do “Arco do Fogo”, no Apiaú e Roxinho, em Roraima; variação dos dados (50%) entre o 1º e 3o quartis delimitado pelo box, mostrando mediana (linha horizontal interna), valores máximos e mínimos (linhas tracejadas) e outliers (pontos)..... 48
- Figura 4.3 – Intervalo de confiança (IC) para Índices de Shannon (H') analisados segundo procedimento de Jacknife, considerando a presença e ausência de indivíduos de *P. guyannense*..... 48
- Figura 4.4 – Área basal, altura total, volume e percentual de Cecropia, das 50 parcelas em cinco classes de degradação pelo fogo na região do Apiaú-Roxinho em Roraima; letras diferentes representam diferença significativa, teste de Tukey ($\alpha=0,05$); variação dos dados (50%) entre o 1º e 3o quartis delimitado pelo box, mostrando mediana (linha horizontal interna), valores máximos e mínimos (linhas tracejadas) e outliers (pontos)..... 50
- Figura 4.5 – Médias de densidade absoluta (DA) e altura total (Ht) por classe diamétrica em diferentes classes de degradação por fogo: **FN**-Florestas primárias, não queimadas; **FQ1B**-Florestas afetadas por um incêndio - de BAIXA intensidade; **FQ1A**-Florestas afetadas por um incêndio - ALTA intensidade; **FQ2**-Florestas afetadas por 2 incêndios; **FQ3**- Florestas afetadas por 3 incêndios..... 52
- Figura 4.6 - Gráfico da ordenação (RDA) usando diferentes variáveis (setas pretas): Percentual de Cecropia (Perc.Cec); número de indivíduos (N); área basal (AB); volume (V); altura total (Ht); riqueza (S); índice de Shannon (H.); uniformidade (J); nas fotos, exemplos de áreas conservadas (à direita) e degradadas, à esquerda..... 54
- Figura 5.1 – (a) Imagem sem nuvens do NDVI-MOD-13; (b) ampliação em composição RGB das bandas Vermelha, Infravermelho Próximo-NIR, e Azul do MOD-13, com círculos mostrando nuvens e outros ruídos. 64

| | |
|--|----|
| Figura 5.2 – (a) Composição colorida do produto MOD-09, mostrando baixa ocorrência de nuvens na região de interesse, canto inferior direito (Sudeste); (b) a parte cinza da imagem MOD-11 indica áreas não computadas na estimativa de temperatura, indicando áreas com nuvens ou sem imageamento. | 64 |
| Figura 5.3 – Exemplo de mosaicos de 16 dias NDVI e EVI (MOD-13) que apresentaram ruídos, provavelmente devido à presença de nuvens nas imagens originais; 06.mar.2002. | 65 |
| Figura 5.4 – Imagem EVI com realce de área com ruídos provocados pelo processo de formação dos mosaicos multitemporais (16 dias) do MOD-13; as áreas a Leste e a Norte, são formações savânicas, as áreas mais claras são florestas; a área de ruído poderia facilmente ser confundida com uma área afetada por incêndios florestais. | 65 |
| Figura 5.5 – (a) Imagem classificada a partir dos produtos MOD-09 (mar.2003) revelando áreas florestais queimadas em vermelho; no detalhe em (b) uma imagem EVI (MOD-13) para o mesmo período, evidenciando a mancha de floresta afetada. | 68 |
| Figura 5.6 – Comportamento de valores de NDVI e EVI do MOD-13 e NDVI derivado do MOD-09 para região de floresta queimada em 2003, em Roraima-Brasil. | 69 |
| Figura 5.7 – Estimativas de áreas queimadas pelo MCD45A1 para os meses de incidência de queimadas e incêndios em Roraima, ano 2003. FAO-GFIMS: http://www.fao.org/nr/gfims/burned-area/en/ , WebFireMapper. | 71 |
| Figura 5.8 – Focos de calor (pontos laranja) detectados pelo MODIS-AQUA, período de Janeiro a Março de 2003, Roraima. FAO-GFIMS: http://www.fao.org/nr/gfims/burned-area/en/ , WebFireMapper. | 72 |
| Figura 5.9 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008. | 73 |
| Figura 5.10 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008 e a amostragem de áreas de referência de acordo com a recorrência de incêndios florestais | 76 |

- Figura 5.11 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008 e a amostragem de áreas de referência para validação das classificações. Nem todas as amostras utilizadas para o PALSAR foram usadas no MODIS, devido à escala. 79
- Figura 5.12 – Resultado de uma segmentação multiresolução realizada utilizando-se como base as 6 bandas (VIS e NIR) das imagens TM; o polígono em vermelho realça a área mais afetada nos incêndios de 2007, mais difícil de visualizar na imagem-amplitude ALOS/PALSAR HH (jan.2008). 81
- Figura 5.13 – Resultado de uma segmentação multiresolução utilizando-se somente a imagem-intensidade ALOS/PALSAR de jan.2008; o tamanho dos polígonos (objetos) foi determinado principalmente pelos diferentes fatores de escala empregados nas segmentações; imagem intensidade na esquerda, imagem amplitude na direita; o polígono realçado em vermelho denota as possibilidades de detalhamento dos objetos. 82
- Figura 5.14 – A segmentação multiresolução aplicada, evidenciando (a) uma imagem PALSAR com as amostras (FN, FQ1B, FQ1A, FQ2 e FQ3); (b) uma imagem TM (RGB) + PALSAR com o nível de resolução mais detalhado; (c) nível de resolução médio; (d) e o nível menos detalhado. 83
- Figura 5.15 – Exemplo de observação da sobreposição (ou não) entre classes (e.g. FN x FQ3), duas a duas e para cada imagem-atributo; os histogramas da esquerda representam o comportamento da classe FN e o da direita o da classe FQ3. 84
- Figura 5.16 - Gráfico de saída no ambiente de otimização do espaço de atributos, demonstrando estabilização da separabilidade já a partir do 7º. Atributo. 84
- Figura 5.17 – Imagens do PALSAR que obtiveram o melhor desempenho em separabilidade visando a realização da classificação para a detecção de florestas degradadas por incêndios na região do Apiaú / Roxinho. 87
- Figura 5.18 – Resultado do mapeamento de degradação florestal por incêndios na área de estudo (Apiaú-Roxinho), a partir da detecção com dados

| | |
|--|-----|
| PALSAR, FBS, polarização HH; à esquerda o resultado da classificação e à direita uma imagem intensidade do PALSAR..... | 87 |
| Figura 5.19 – Comportamento temporal de valores de NDVI (série MOD-13 filtrada) para áreas de florestas não atingidas por incêndios (FN) e florestas atingidas 3 vezes (FQ3), região do Apiaú / Roxinho, Roraima..... | 89 |
| Figura 5.20 – Amostras de referência, exemplificando as classes FN acima e FQ3 abaixo, para validação das classificações. | 91 |
| Figura 5.21 – Segmentação multiresolução em diferentes níveis de detalhamento; em linha vermelha um objeto formado de objetos menores (linhas azuis); abaixo, à esquerda a segmentação selecionada como base. | 93 |
| Figura 5.22 – Seleção dos melhores atributos para mapeamento de áreas florestais atingidas por incêndios, considerando Landsat, ALOS/PALSAR e MODIS em ambiente de classificação orientada a objetos (OBIA). | 98 |
| Figura 5.23 – Resultado da classificação utilizando dados multisensor TM, MODIS e PALSAR, segundo a utilização dos 14 melhores atributos; ao lado direito uma imagem ETM+ R5G4B3 do ano de 2003. | 100 |
| Figura 5.24 - Resultado da classificação utilizando dados multisensor TM, MODIS e PALSAR, segundo a utilização de 5 dos melhores atributos; ao lado esquerdo uma imagem TMR5G4B3 do ano de 2007..... | 100 |
| Figura 5.25 – Detalhe do incêndio de 1998 em imagens TM: ainda durante o incêndio à esquerda (11.03.1998); e em julho de 1998, à direita, com alta ocorrência de nuvens, mostrando o avanço da área atingida a qual não seria mapeada só com a imagem de março de 1998. | 101 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Tabela 2.1 – Índices espectrais desenvolvidos ou adaptados para detecção de variações na cobertura vegetal e cicatrizes de queimadas. | 11 |
| Tabela 3.1 - Quadro geral com a série histórica de imagens TM e ETM+ utilizadas no estudo..... | 33 |
| Tabela 4.1 – Classes de degradação por fogo, ano(s) de ocorrência de incêndio(s), número (n), área total de parcelas e coordenadas geográficas iniciais das parcelas (Projeção Lat-Long; datum WGS84). Roraima, Brasil. | 41 |
| Tabela 4.2 - Parâmetros florístico e fitossociológico de florestas (DAP ≥ 10 cm) da área de estudo, segundo as classes de degradação por fogo. Região do Apiaú/Roxinho, Roraima, Brasil. | 47 |
| Tabela 4.3 – Densidade Absoluta (DA) das 10 espécies de maior abundância nos 50 transectos por classe de degradação por fogo. Região do Apiaú/Roxinho, Roraima, Brasil. | 51 |
| Tabela 5.1 – Desempenho da classificação supervisionada (MAXVER) para diferentes combinações de bandas, na detecção de cicatrizes de fogo na região de Mucajaí-RR-Brasil, em ordem decrescente de desempenho. | 66 |
| Tabela 5.2 – Descrição das imagens ALOS/PALSAR utilizadas | 74 |
| Tabela 5.3 – Síntese das avaliações das imagens-atributos PALSAR visando a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes.. | 85 |
| Tabela 5.4. Fatores de escala testados para segmentação multiresolução das imagens TM de 2007. | 92 |
| Tabela 5.5 – Avaliação das imagens-atributos para a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes, considerando 2 classes: Floresta Queimada (em qualquer período) e Floresta não queimada; região do Apiaú / Roxinho, Roraima. | 94 |
| Tabela 5.6 – Análise conjunta multisensor para avaliação das imagens-atributos visando a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes, considerando 5 classes de interesse: FN, FQ1B, FQ1A, FQ2, FQ3; região do Apiaú / Roxinho, Roraima..... | 97 |

Tabela AP.1 - 30 espécies de maior Valor de Importância (VI) em 50 parcelas de 25m x 100m. Onde: (N) número de indivíduos; (U) total de parcelas em que ocorreram as respectivas espécies; (AB) Área Basal; (D) Densidade; (F) Frequência; (Do) Dominância; (A) absolutas e (R) relativas. 125

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|--------|--|
| AVHRR | Advanced Very High Resolution Radiometer |
| CBERS | Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres |
| DA | Densidade Absoluta |
| DAP | Diâmetro a 1,30m do solo |
| DoA | Dominância Absoluta |
| DoR | Dominância Relativa |
| DR | Densidade Relativa |
| ETM+ | Enhanced Thematic Mapper Plus |
| EVI | Enhanced Vegetation Index |
| FA | Frequência Absoluta |
| FR | Frequência Relativa |
| H' | Índice de Diversidade de Shannon |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IRS | Indian Remote Sensing Satellite |
| IVI | Índice de Valor de Importância |
| J' | Uniformidade ou Equilíbrio de Pielou |
| MERIS | Medium Resolution Imaging Spectrometer |
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| PALSAR | Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar |
| QM | Coeficiente de Mistura de Jentsch |

| | |
|------|--|
| SAR | Radar de Abertura Sintética |
| SPOT | Satellite Pour l'Observation de la Terre |
| TM | Thematic Mapper |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 5 |
| 2.1. Incêndios em florestas tropicais | 5 |
| 2.2. Incêndios florestais no Brasil e no mundo | 5 |
| 2.3. Levantamentos de campo para diagnosticar impactos de incêndios em florestas tropicais..... | 6 |
| 2.4. Sensoriamento remoto na detecção de áreas afetadas por incêndios florestais | 9 |
| 2.5. Sensoriamento remoto em abordagem multisensor..... | 16 |
| 2.6. Principais finalidades da abordagem multisensor | 17 |
| 2.6.1. Substituição..... | 18 |
| 2.6.2. Complementação..... | 19 |
| 2.6.3. Calibração | 19 |
| 2.6.4. Intercalibração ou fusão de dados | 20 |
| 2.6.5. Contextualização | 20 |
| 2.6.6. Casos multifinalitários | 21 |
| 2.7. Monitoramento regional e global da vegetação..... | 22 |
| 2.8. Perspectivas futuras para o monitoramento sistemático de áreas queimadas em regiões tropicais..... | 23 |
| 3 METODOLOGIA GERAL | 25 |
| 3.1. Descrição e localização da área de estudo | 25 |
| 3.2. Produtos de sensoriamento remoto utilizados..... | 29 |
| 3.2.1. Dados Temáticos | 30 |
| 3.2.1.1. Dados de remanescentes florestais | 30 |
| 3.2.1.2. Dados de focos de Calor..... | 30 |
| 3.2.2. Imagens Landsat | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.2.3. | Imagens MODIS | 32 |
| 3.2.4. | Imagens ALOS-PALSAR..... | 35 |
| 3.3. | Fluxograma geral da pesquisa | 36 |
| 4 | COLETA E ANÁLISE DE DADOS DE CAMPO: INVENTÁRIO FLORESTAL DE ÁREAS AFETADAS POR INCÊNDIOS EM RORAIMA | 39 |
| 4.1. | Metodologia | 40 |
| 4.1.1. | Imagem de satélite utilizada como suporte na fase de campo..... | 40 |
| 4.1.2. | Estratégia de amostragem..... | 40 |
| 4.1.3. | Dados coletados no inventário florestal | 42 |
| 4.1.4. | Parâmetros florísticos e fitossociológicos utilizados | 42 |
| 4.1.5. | Análises estatísticas aplicadas ao inventário | 43 |
| 4.2. | Resultados: Levantamentos de campo..... | 44 |
| 4.2.1. | Quanto à suficiência amostral do inventário | 44 |
| 4.2.2. | Descrição florística da área total inventariada | 45 |
| 4.2.3. | Análise da degradação causada por incêndios florestais usando parâmetros florísticos..... | 46 |
| 4.2.4. | Análise da degradação das florestas através de parâmetros fitossociológicos 49 | |
| 4.2.5. | Avaliação da degradação da floresta através de parâmetros florísticos e fitossociológicos conjuntamente | 53 |
| 4.3. | Discussão: Levantamentos de Campo | 55 |
| 4.3.1. | Florestas tropicais afetadas por incêndios recorrentes: uma paisagem complexa..... | 55 |
| 4.3.2. | A situação atual e a resistência ao fogo..... | 56 |
| 4.3.3. | As principais tendências para as florestas no "Arco de Fogo" em Roraima após incêndios recorrentes | 57 |
| 5 | SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À DETECÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM FLORESTAS TROPICAIS | 61 |

| | |
|--|-----|
| 5.1. Experimento I: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando imagens MOD-09 e MOD-13 (sensor MODIS) no período de 2000 a 2005. ... | 61 |
| 5.1.1. Metodologia..... | 61 |
| 5.1.2. Resultados (Experimento I) | 63 |
| 5.2. Experimento II: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando imagens ALOS/PALSAR FBS (HH)..... | 73 |
| 5.2.1. Metodologia..... | 73 |
| 5.2.2. Resultados (Experimento II) | 80 |
| 5.3. Experimento III: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando abordagem multisensor | 88 |
| 5.3.1. Metodologia..... | 88 |
| 5.3.2. Resultados: Experimento III | 92 |
| 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 105 |
| 6.1. Quanto à degradação florestal observada com base no inventário | 105 |
| 6.2. Quanto às técnicas de sensoriamento remoto empregadas..... | 106 |
| 6.3. Quanto à importância dos levantamentos de campo para a definição de classes de mapeamento e auxílio permanente ao desenvolvimento dos experimentos de sensoriamento remoto..... | 107 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 109 |
| APÊNDICE 1 – DADOS FLORÍSTICOS E FITOSSOCIOLÓGICOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL..... | 125 |
| ANEXO 1 – EQUAÇÕES APLICADAS NA ANÁLISE FLORÍSTICA E FITOSSOCIOLÓGICA..... | 127 |

1 INTRODUÇÃO

A intensificação de incêndios florestais tem sido uma realidade mundial desde a década de 70 (MÜELLER-DUMBOIS e GOLDAMMER, 1990). As estimativas de áreas queimadas anualmente em ecossistemas tropicais e subtropicais são da ordem de 5.4 milhões de km². A maior percentagem de áreas queimadas em relação à área continental desses ecossistemas ocorre na Austrália (14%), seguida pela África (9%) e América do Sul (5%), onde a superfície queimada atinge anualmente 0.74 milhão de km² (VAN DER WERF et al., 2003).

Dois eventos em especial ficaram mundialmente marcados ao atingirem grandes extensões de florestas tropicais antes tidas como imunes a incêndios: um deles ocorreu na região Leste de Kalimantan, Indonésia, em 1982-1983 (GOLDAMMER e SEIBERT, 1990) e o outro ocorreu no Estado de Roraima, Amazônia Brasileira, em 1997-1998 (BARBOSA, 1998; SHIMABUKURO et al., 1999).

Do ponto de vista de mudança de paradigma, o grande incêndio de Roraima foi ainda mais emblemático, por ter ocorrido no bioma Amazônia, reconhecido como a maior reserva de florestas tropicais do planeta. Desde então, ficou comprovado que ao menos parte das áreas de remanescentes florestais da Amazônia pode queimar sob condições extremas de seca prolongada e presença de fontes antrópicas de ignição (NEPSTAD et al., 1999; COCHRANE, 2000).

Em áreas florestais que são atingidas por incêndios recorrentes, provavelmente existe como consequência uma paisagem muito complexa derivada da interação do fogo com a vegetação original e sua posterior regeneração. Tais situações de degradação florestal complexa ainda têm sido pouco avaliadas quantitativamente devido à grande extensão das áreas atingidas, à frequência dos eventos, dinâmica de regeneração da vegetação e dificuldades metodológicas tais como ausência de imagens de satélite adequadas,

dificuldades de execução de trabalhos de campo extensivos, rápida regeneração natural de algumas áreas, entre outros.

Embora já existam produtos de sensoriamento remoto validados para diversas regiões do globo terrestre, a Amazônia e outras regiões com domínio de florestas tropicais ainda são carentes de mapeamentos sistemáticos das áreas atingidas por incêndios florestais, uma vez que os produtos quando existentes, ainda estão em fase de ajuste e validação (SETZER et al., 2007; GIGLIO et al., 2009). Os mapeamentos das cicatrizes de incêndios em florestas tropicais são muito prejudicados: (a) pela alta ocorrência de nuvens nessas áreas (ASNER, 2001); (b) pelo próprio dossel florestal que tende a esconder os sinais de incêndios superficiais e (c) pela resolução espacial mais grosseira (~1,0 km) de alguns sensores que pode omitir pequenas áreas queimadas (GIGLIO et al., 2009).

Por conta da maioria das nuvens serem praticamente invisíveis para o imageamento com sensores de microondas (WOODHOUSE, 2006), o sensoriamento remoto com radar tem sido investigado como alternativa para detecção de mudanças de uso do solo na Amazônia, incluindo mapeamento de desmatamentos e áreas queimadas (SANTOS et al., 1998; SANTOS et al., 2008; MARTINS, 2012). A missão de sensoriamento remoto orbital com microondas mais completa em termos de percentual de cobertura na Amazônia, periodicidade de revisita, resolução espacial e variação dos modos de imageamento, foi obtida com o sensor PALSAR, a bordo do satélite ALOS (ROSENQVIST et al., 2007). Porém ainda não existe uma estratégia de imageamento sistemático da Amazônia com sensores de microondas com periodicidade e continuidade adequadas ao monitoramento de cicatrizes de incêndios.

Frente a estes problemas, considerando a região afetada pelos incêndios recorrentes em Roraima, são endereçadas as seguintes questões científicas:

1. Passados mais de dez anos desde o primeiro grande incêndio (1998), como é possível realizar um diagnóstico da cobertura florestal da região, revelando diferenças entre as florestas queimadas e não queimadas, através de dados de campo e dados de sensoriamento remoto?
2. Como a abordagem multisensor multitemporal pode ser utilizada para quantificar as áreas queimadas, qualificar a severidade de incêndios florestais, bem como construir o histórico de sua repetição no tempo e no espaço?
3. Que tendências de alteração são esperadas no futuro para as florestas no "Arco de Fogo" em Roraima, caso o regime de fogo se mantenha como o dos últimos 15 anos?
4. Utilizando os dados de sensores remotos satelitários em operação, que metodologias podem ser eficientes para tornar sistemático o processo de levantamento de áreas florestais queimadas em Roraima, na Amazônia e em outras áreas similares de florestas tropicais?

Para responder as questões levantadas foram traçados os seguintes objetivos:

- I. Diagnosticar a degradação das florestas afetadas por incêndios no "Arco do Fogo" de Roraima, caracterizando sua diversidade florística e estrutura.
- II. Analisar as tendências de alteração da composição florística e estrutura da vegetação florestal afetada por incêndios na região.
- III. Mapear em uma área piloto representativa as áreas afetadas por incêndios florestais a partir de dados multitemporais e multisensores, buscando quantificar e espacializar os graus de severidade de cada evento.
- IV. Avaliar as limitações e as potencialidades da abordagem multisensor para o mapeamento sistemático de florestas afetadas por incêndios em Roraima, de acordo com as imagens e técnicas de processamento propostas.

O desenvolvimento do texto segue ao **Capítulo 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**, onde estão abordados assuntos ligados ao tema e objetivos do trabalho, indicando as bases conceituais, possibilidades de uso de metodologias e o estado da arte da ciência, apresentados a partir da análise crítica de trabalhos científicos de relevância na temática. A partir desta fundamentação foram definidas as bases metodológicas para o desenvolvimento do presente trabalho.

No **Capítulo 3 – METODOLOGIA GERAL** são apresentados: (3.1) uma descrição geral da área de estudos escolhida para realização dos levantamentos de campos e experimentos que integram esta pesquisa; (3.2) os dados temáticos e os produtos de sensoriamento remoto utilizados; e (3.3) um fluxograma geral dos Levantamentos de Campo e dos Experimentos I, II e III de sensoriamento remoto, buscando-se dar uma noção completa de todas as etapas do trabalho.

Em função da complexidade e do volume de dados utilizados, são apresentados separadamente os levantamentos de campo (**Capítulo 4 – COLETA E ANÁLISE DE DADOS DE CAMPO**) e os experimentos de sensoriamento remoto (**Capítulo 5 – EXPERIMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO** com os itens **5.1 – Detecção de áreas queimadas utilizando imagens MODIS**, **5.2 - Detecção de áreas queimadas utilizando imagens ALOS/PALSAR**, **5.3 - Detecção de áreas queimadas utilizando Abordagem Multisensor**). Constam em cada capítulo/item os respectivos objetivos, a metodologia, os resultados e discussão. No **Capítulo 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES** são apresentadas as principais conclusões gerais do trabalho, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Incêndios em florestas tropicais

Denomina-se incêndio florestal o fogo sem controle que incide sobre qualquer forma de vegetação, podendo tanto ser provocado pelo homem como por fonte natural. Os incêndios superficiais (rasteiros ou de sub-bosque) “se propagam na superfície do piso da floresta, queimando os vegetais não decompostos, serrapilheira, gramíneas, arbustos, enfim, todo material combustível até cerca de 1,80 m de altura”. Já os incêndios de copa são aqueles que ocorrem em combustíveis acima de 1,80 m de altura (SILVA, 1998).

Os incêndios de copa são muito intensos e difíceis de serem controlados, muitas vezes destruindo toda a vegetação e a matéria orgânica do solo; são limitantes para a maioria dos organismos e a recuperação da produtividade pode levar muitos anos. Já os incêndios de superfície são menos impactantes que os de copa, tendo um efeito mais seletivo, favorecendo organismos com alta tolerância ao fogo (ODUM, 1988). Os incêndios em florestas tropicais como os que têm acometido Roraima (e outras áreas na Amazônia), em sua maioria são do tipo superficial raramente atingindo a copa (IBAMA, 1998, NEPSTAD et al., 1999; COCHRANE, 2000; NASCIMENTO et al., 2000).

2.2. Incêndios florestais no Brasil e no mundo

Os dois maiores incêndios florestais relatados até o momento no Brasil aconteceram no Paraná em 1963 e em Roraima em 1998 (SOARES e BATISTA, 2007). Considerando as áreas queimadas em tipologias florestais conservadas, o evento em Roraima, atingiu cerca de 12.000 km² (BARBOSA, 1998; SHIMABUKURO et al., 1999), representando quase 3 vezes a área florestal atingida no evento no Paraná. Em termos de área total de vegetação queimada, o incêndio em Roraima chegou a cerca de 39.000 km² (BARBOSA e FEARNSIDE, 1999) enquanto o incêndio do Paraná atingiu 20.000 km²

(SOARES e BATISTA, 2007). Outro setor da Amazônia que foi acometido por incêndio de grandes proporções foi o Estado do Acre, na seca de 2005 que afetou toda a região, tendo sido atingidos entre 2.500 km² e 2.800 km² de áreas de remanescentes florestais (BROWN et al., 2006; SHIMABUKURO et al., 2011).

Podem ser citados como exemplos de incêndios florestais de grandes dimensões fora do Brasil: Yellowstone em 1988 com 320mil ha de áreas queimadas; Austrália em 1991 com 37 mil ha de plantios atingidos; East-Kalimatan em 1997-1998 com 2,7 milhões ha de florestas naturais e 2,5 milhões de ha outras plantações atingidas; Grécia em 2007 com 150 mil ha de vegetação queimada; e Califórnia em 2008 com quase 100 mil ha atingidos, em sua maioria de florestas de Pinus, Sequoia e Quercus (HOOFMANN et al., 1999; SOARES e BATISTA, 2007; DE SANTIS et al., 2010; VERAVERBEKE et al., 2010).

Em relação às características gerais de incêndios superficiais e à frequência de recorrência, os eventos que mais se assemelham ao caso de Roraima são os incêndios ocorridos nas florestas tropicais da Indonésia. Os efeitos do El Niño em conjunção à intensa presença antrópica, às conseqüentes alterações da cobertura vegetal e ao manejo agropecuário destecnificado com uso do fogo, levaram a dois importantes eventos de incêndio em ambas as regiões, em 1997-1998 e em 2002-2003 (BARBOSA et al., 2004; HUANG e SIGERT, 2004).

2.3. Levantamentos de campo para diagnosticar impactos de incêndios em florestas tropicais

Um dos exemplos importantes sobre inventário de danos pós-incêndios florestais realizados em florestas na Amazônia está contemplado nos trabalhos de IBAMA (1998) e Nascimento et al. (2000), realizados com base no grande incêndio florestal que atingiu o Estado de Roraima em 1998. Na época mais crítica, os incêndios em Roraima estavam distribuídos numa extensa área. De

acordo com os mapas obtidos por sobrevoo e sensoriamento remoto, os mesmos chegavam a uma distância de cerca de 400 km em linha. Diante de tal dimensão foram escolhidas cinco regiões representativas para inventário. Em cada uma das 5 regiões foram alocados 4 linhas de 1 km cada, distantes entre si (Figura 2.1). A partir do início de cada linha foram alocados 4 parcelas permanentes de 10 x 50m, a cada 250m na linha. Isto representou um total inventariado de 40.000m² (4 ha); subdivididos em 8.000m²/região; cada região sendo caracterizada por 4 conjuntos de 1km linear; cada quilômetro linear associado a 2.000m² (4 subparcelas de 500m²) efetivamente mensurados (IBAMA, 1998; NASCIMENTO et al., 2000).

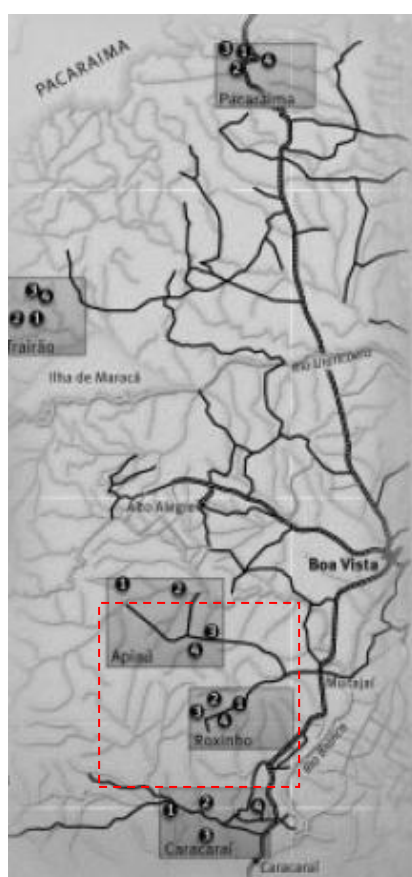


Figura 2.1 – Áreas avaliadas no grande incêndio de Roraima em 1998 por IBAMA (1998) e Nascimento et al. (2000). A linha tracejada em vermelho realça as duas áreas mais fortemente atingidas.

Fonte: Adaptado de Nascimento et al. (2000).

As avaliações realizadas foram subdivididas em: a) caracterização da parcela; b) caracterização da queimada na parcela; c) medições de indivíduos com diâmetro a 1,30m do solo a partir de 10 cm; d) e medições de indivíduos com diâmetro a 1,30m do solo igual ou maior que 5 cm e menor que 10cm. Os resultados foram extremamente úteis na caracterização dos danos imediatos às florestas, provocados pelos incêndios. Foi recomendado que as áreas tornassem a ser medidas periodicamente para acompanhamento da evolução da regeneração e mortalidade de indivíduos a médio e longo prazos, mas o monitoramento infelizmente não teve continuidade.

Barbosa e Fearnside (1999) também realizaram inventários em áreas afetadas pelos incêndios de 1998 em Roraima, em três regiões, utilizando 7 transectos de 750m² cada. Embora todos tenham sido medidos em regiões classificadas com a mesma tipologia (contato floresta ombrófila / floresta sazonal) os autores concluíram por uma grande variação na distribuição das classes diamétricas entre as regiões avaliadas. Dentro dos transectos foram medidos todos os indivíduos mortos e vivos em subparcelas de 5 x 25 m espaçadas 20m dentro dos transectos. Os resultados tabulados indicam que foram inventariadas 31 árvores acima de 10 cm de DAP nos 5.250m²; 67 indivíduos entre 5-10 cm de DAP e cerca de 477 indivíduos abaixo de 5 cm DAP (em 2.250m²). Dada a variabilidade natural de florestas tropicais na região e o impacto do incêndio em diferentes severidades formando mosaicos (IBAMA, 1998), seria recomendável em trabalhos futuros a utilização de maior número de repetições e de área amostral para a medição de indivíduos adultos.

Barlow e Peres (2008) também utilizaram transectos de 10 x 250 m (2.500m²) para inventário de florestas não atingidas (4 plots; 1ha) e atingidas por 1 incêndio (4 plots; 1 ha), 2 incêndios (2 plots; 0.5 ha) e 3 incêndios (2 plots, 0.5 ha) no extremo oeste paraense. Todas as árvores e lianas acima de 10 cm de DAP foram medidas e identificadas ao nível de família, gênero ou morfo-espécie. Indivíduos abaixo de 10 cm de DAP com altura superior a 1 m foram

identificados em subparcelas de 1 x 50 m (1 em cada transecto), desde que tivessem densidade maior que 10 na parcela; bambus e vegetação não lenhosa não foram inventariados. A dimensão das áreas inventariadas em Barlow e Peres (2008) ao todo somou 3 ha, variando de 0,5 a 1,0 ha para cada situação de incidência de incêndios. Comparativamente aos estudos realizados por IBAMA (1998), H. Xaud (1998), M.R. Xaud (1998), Santos et al. (1998) e Araujo (1999), houve uma razoável adequação de área amostrada. Porém, teria sido muito interessante se a estrutura horizontal e vertical tivessem sido avaliadas através de medidas de posição e de altura para caracterização fitossociológica.

Para estudos que envolvem a reconstrução histórica de eventos de incêndio, adicionalmente aos dados de campo e às imagens de sensoriamento remoto, devem ser buscados dados secundários (entrevistas, questionários) com os agricultores locais sobre o comportamento dos incêndios pretéritos (NELSON, 2001), tais como: ano de ocorrência, duração, intensidade e o tipo majoritário, se superficial ou de copa. Estes dados secundários podem ser úteis para a estratificação preliminar da amostragem e para a locação final das amostras em campo, melhorando a qualidade final das avaliações.

2.4. Sensoriamento remoto na detecção de áreas afetadas por incêndios florestais

De uma forma geral pode-se afirmar que o mapeamento pretérito de áreas queimadas só é possível à medida que existam imagens de sensoriamento remoto disponíveis e de boa qualidade onde estas áreas tenham um comportamento espectral diferenciado em relação à vizinhança. Segundo Bradley et al., (2007) séries temporais de imagens de sensoriamento remoto são importantes fontes de informação para compreender as mudanças de cobertura do solo. E os incêndios florestais e suas cicatrizes são uma das possíveis nuances de alteração da vegetação a serem mapeadas.

Quanto ao comportamento espectral, as cicatrizes apresentam-se com características específicas, o que permite sua diferenciação em relação a outros alvos. Pereira e Setzer (1993) utilizando imagens TM (Thematic Mapper-Landsat) verificaram aumento na reflectância nas bandas, 1, 2, 3, 5 e 7 de áreas recentemente queimadas em comparação à vegetação florestal não atingida. Verificaram ainda o inverso, ou seja, uma redução na reflectância de cicatrizes de queimadas na banda 4 (Infravermelho próximo) (Figura 2.2). Com o passar do tempo entre as queimadas e o imageamento, tais cicatrizes tendem a modificar sua resposta e a desaparecer (RIVERA-LOMBARDI, 2003) por conta da remoção das cinzas, carvão e da recuperação da vegetação.

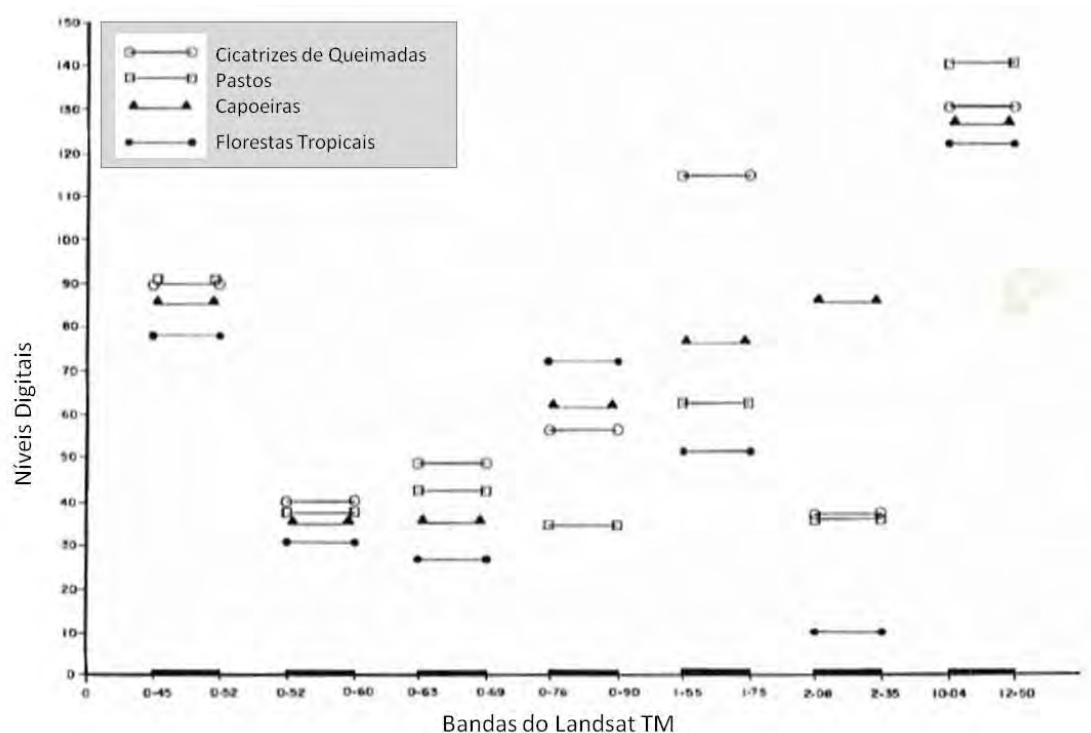


Figura 2.2 – Comportamento espectral de cicatrizes de queimadas em imagem TM.

Fonte: Adaptada de Pereira e Setzer (1993).

Visando aumentar a separabilidade de classes de cobertura vegetal e, em específico, das áreas queimadas e das áreas não queimadas, diversos índices espectrais (NDVI, SAVI, GEMI, BAI, BAIM, NBR, NBR2, CSI, MIRBI, EVI, EVI2;

Tabela 2.1; Figura 2.3), têm sido desenvolvidos ou adaptados buscando-se melhorar a eficiência dos mapeamentos (CHUVIECO et al., 2002; BASTARRIKA et al., 2011; STROPIANNA et al., 2012).

Tabela 2.1 – Índices espectrais desenvolvidos ou adaptados para detecção de variações na cobertura vegetal e cicatrizes de queimadas.

| Índice | Fórmula | Autoria |
|--------|--|---------------------------|
| NDVI | $\frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$ | Rouse et al. (1973) |
| NBR | $\frac{\rho_4 - \rho_7}{\rho_4 + \rho_7}$ | Key e Benson (1999) |
| NBR2 | $\frac{\rho_5 - \rho_7}{\rho_5 + \rho_7}$ | Key e Benson (1999) |
| CSI | $\frac{\rho_4}{\rho_5}$ | Smith et al. (2005) |
| MIRBI | $10 * \rho_7 - 9.5 * \rho_5 + 2$ | Trigge e Flasse (2001) |
| SAVI | $\frac{(\rho_4 - \rho_3)(1 + L)}{(\rho_4 + \rho_3 + L)}$ | Huete (1988) |
| EVI | $G * (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + C_1 * \rho_3 - C_2 * \rho_1 + 1)$ | Huete et al. (2002) |
| EVI2 | $G * (\rho_4 - \rho_3) / (\rho_4 + C_3 * \rho_3 + 1)$ | Jiang et al. (2008) |
| GEMI | $\frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_R}{(\rho_R + \rho_{NIR} + 0.5)}$ | Pinty e Verstraete (1992) |
| BAI | $\frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_R - \rho_{cR})^2}$ | Martín (1998) |
| BAIM | $\frac{1}{(\rho_{NIR} - \rho_{cNIR})^2 + (\rho_{SSWIR} - \rho_{cSSWIR})^2}$ | Martín et al. (2005) |

ρ é a reflectância nas bandas TM 1, 2, 3 (R), 4 (NIR), 5 (SSWIR) e 7 (LSWIR);

C e L são coeficientes: C1 = 6, C2 = 7.5, C3 = 2.4, G = 2.5, L = 0.5;

ρ_{cNIR} e ρ_{cR} (BAI) são valores de convergência (0.06 e 0.1, respectivamente);

ρ_{cNIR} e ρ_{cSSWIR} (BAIM) são valores de convergência (0.05 e 0.2, respectivamente)

Fonte: Bastarrika et al. (2011); Stroppiana et al. (2012).

Devido à disponibilidade de séries temporais de índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index) do MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) desde o ano 2000, a utilização destes índices vem se tornando muito difundida para estudos de alteração da cobertura vegetal, incluindo o mapeamento de áreas afetadas por incêndios florestais.

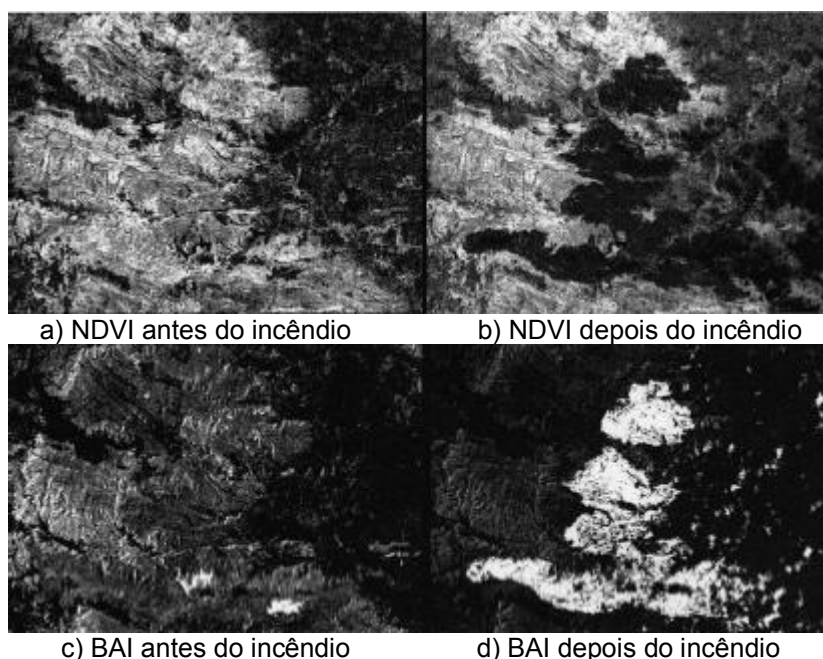


Figura 2.3 – Aplicação de índices espectrais para realce de áreas queimadas; em (a) e (b) as áreas de vegetação saudável aparecem em tons claros (NDVI claro), em (b) as áreas queimadas aparecem em tons escuros; já em (d) o BAI realça as áreas queimadas em tons claros.

Fonte: Chuvieco et al. (2002).

Uma outra técnica de processamento aplicada para o realce de áreas queimadas tem sido o modelo linear de mistura espectral (MLME), utilizando como base imagens TM e MODIS para produção de imagens-fração de vegetação, solo e sombra (ANDERSON et al., 2005; SHIMABUKURO et al., 2009; 2011; LIMA et al., 2009; XAUD et al., 2009). Na fração sombra as áreas recentemente queimadas apresentam-se claras e realçadas em relação aos outros alvos da cena. Os trabalhos acima mencionados indicam que a aplicação de uma segmentação por crescimento de regiões realizada sobre as imagens sombra e posterior classificação por regiões (ISOSEG-SPRING/INPE), permite a separação da maioria das cicatrizes de queimadas em imagens MODIS e TM havendo necessidade de uma edição final supervisionada por um analista para redução de erros.

Os sensores remotos mais utilizados na quantificação de áreas queimadas em regiões não muito extensas têm sido os sensores ópticos de alta-média resolução espacial TM/Landsat e HRV-HRVIR-HRS/SPOT. Como potencialidades estes sensores trazem bandas multiespectrais no infravermelho próximo (NIR) e na região do visível (VIS) e resolução espacial de até 30m, permitindo que mesmo áreas queimadas de pequeno porte possam ser mapeadas. As suas principais limitações advêm da baixa resolução temporal e da impossibilidade da geração de imagens úteis quando há cobertura de nuvens (ASNER, 2001). A combinação desses fatores, principalmente em regiões tropicais, faz com que não existam imagens suficientes de cada sensor (isoladamente) para a realização de monitoramento de áreas queimadas.

Sensores como o AVHRR/NOAA e o VEGETATION/SPOT têm limitações em relação à resolução espectral e espacial (~1 km) quando comparados aos citados acima, mas apresentam resolução temporal adequada ao monitoramento de eventos dinâmicos, como o caso de cicatrizes de queimadas. A alta resolução temporal (cerca de um dia) destes sensores aumenta consideravelmente a probabilidade de obtenção de imagens sem nuvens, ainda que os mesmos trabalhem no espectro óptico. Estes sensores são uma alternativa para escalas globais de monitoramento de áreas queimadas (GITAS et al., 2012).

Os sensores de moderada resolução espacial (e.g. MODIS/TERRA; MODIS/AQUA; WFI/CBERS; WiFS/IRS; MERIS) foram planejados para suprir a lacuna existente entre os sensores de alta-média e baixa resolução espacial. As resoluções espaciais dos sensores citados estão entre 189m a 300 m no Nadir e apresentam no mínimo uma banda no NIR e uma banda no VIS (geralmente no vermelho). A partir delas, de forma correlata ao sensor TM, podem também ser geradas diversos índices de vegetação e índices espectrais de queimadas.

Dentre os sensores de resolução espacial moderada se destaca o MODIS pelo conjunto de bandas (36) com ótima calibração radiométrica, geométrica e intenso investimento na geração e validação de produtos aplicados. Além disto, os satélites (TERRA e AQUA) que transportam o MODIS têm caráter multi-plataforma levando outros sensores, o que permite intercalibrações de seus instrumentos (RUDORFF et al., 2007). Sua missão permanece com sucesso na coleta e geração de dados há mais de 13 anos (NASA; <http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Dentre os produtos do MODIS que vêm sendo utilizados para mapeamento de cicatrizes de queimadas, estão: MOD-09 (Reflectância de Superfície), MOD-13 (Índices de Vegetação), MOD-14 (Anomalias Termiais, Fogo e Queima de Biomassa), MOD-44 (VCC-Conversão da Cobertura Vegetal e VCF-Campos Contínuos de Vegetação) e o MCD-45 (áreas queimadas) (SETZER et al., 2007; CHUVIECO et al., 2008; RIVERA-LOMBARDI, 2009).

O acerto entre a detecção de áreas queimadas em imagens MODIS (MOD-14) de anomalias termiais em áreas de cobertura vegetal de floresta tropical e áreas de transição (Floresta-cerrado no Mato Grosso) usando imagens TM como referência ficou em torno de 52% da área efetivamente queimada. Embora o acerto tenha aumentado de acordo com o aumento do tamanho da área dos polígonos (Figura 2.4) queimados (PIROMAL et al., 2008), mesmo assim houve uma superestimativa da ordem de 5 vezes o tamanho real das áreas queimadas. Os resultados denotam que se deve ter muito cuidado na exploração de metodologias e imagens MODIS para a realização de estimativas de áreas queimadas em regiões semelhantes, incluindo áreas de florestas tropicais.

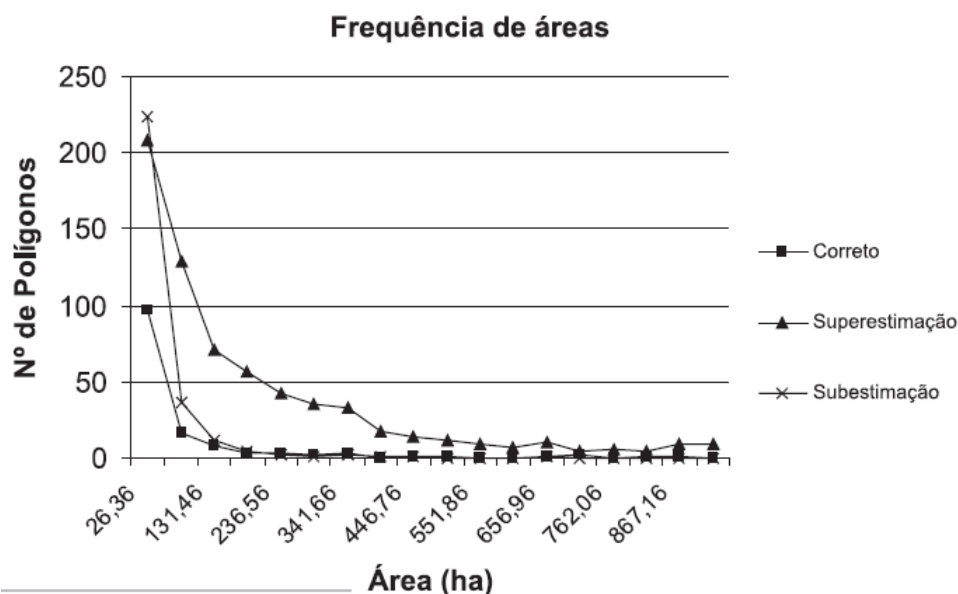


Figura 2.4 – Acertos e erros em função da área do polígono queimado usando imagens MODIS (MOD-14) e TM (referência).

Fonte: Piromal et al. (2008).

As imagens de radar de abertura sintética (SAR) evoluíram nas aplicações para estudos de vegetação florestal, principalmente com o uso de sensores que trabalham em comprimentos de ondas maiores (frequências menores), como as bandas L (~23cm) e P (~75cm) e que conseguem penetrar no dossel revelando aspectos estruturais e de biomassa da floresta (SANTOS et al., 2003). Além de gerarem dados diferenciados das imagens ópticas, devido às características do sensor SAR (respostas relacionadas à geometria dos objetos, às variáveis geomorfométricas e à constante dielétrica), têm a vantagem de não dependerem da luz do sol ou de uma terceira fonte, podendo ser utilizados, mesmo sob ocorrência de nuvens (WOODHOUSE, 2006).

Disperati e Santos (2008) apontaram a potencialidade do uso de diferentes polarizações, informação de fase e técnicas interferométricas como úteis para estudos de caracterização e detecção de alterações da cobertura vegetal. À medida que imagens SAR, em níveis orbital e mesmo aerotransportado, vêm sendo obtidas por diversas missões (ALOS/PALSAR, Envisat-ASAR,

TerraSAR-X, SAR R99-B, Cosmo-SkyMed), aumenta a probabilidade de utilização dos dados para o mapeamento de áreas afetadas por incêndios florestais.

Martins (2012) utilizou imagens ALOS-PALSAR (Banda L) polarimétricas, consistindo nas polarizações HH, HV, VH, VV mais a informação de fase, para avaliar áreas impactadas por diferentes intensidades e recorrências de incêndios na região do “Arco do Fogo” de Roraima. Os resultados indicaram que as imagens do ALOS-PALSAR polarimétricas e seus atributos coerentes, derivados da informação de fase, são uma potencial fonte de informação para o mapeamento de áreas queimadas através da variação de biomassa, onde o melhor modelo explicou 79% desta variação. Embora as informações incoerentes (amplitude, potência ou σ^0) da polarização HH, não tenham sido efetivas para a modelagem de biomassa (MARTINS, 2012) abre-se uma perspectiva de investigação de áreas queimadas a partir de imagens ALOS/PALSAR FBS-HH multitemporais, uma vez que as imagens de polarização simples (FBS) são mais frequentes que as imagens polarimétricas (ROSENQVIST et al., 2007).

2.5. Sensoriamento remoto em abordagem multisensor

A utilização de diferentes sensores remotos no estudo de focos ativos de queimadas e/ou suas cicatrizes vem sendo explorada desde a década de 70 e 80. A evolução em número e em características tecnológicas de sensores, bem como a disponibilidade e o baixo custo dos dados, têm levado à geração e validação de metodologias que integram dados de diferentes sensores. Tais metodologias recebem a denominação de “abordagem multisensor” (PEREIRA, 1987; EVA e LAMBIN, 1998; SHIMABUKURO et al., 1999).

O uso de abordagem multisensor pode objetivar diversas finalidades, tais como: complementação de áreas não imageadas por determinado sensor; calibração entre estimativas de sensores de resolução espacial grosseira por

sensores de resolução mais fina; utilização de sensores em diferentes faixas espectrais (sensores ópticos e de microondas); fusão de imagens para melhoria da resolução espacial e espectral; estudos multiescala de fenômenos, buscando diversos níveis de detalhamento, desde o local até o global; e aumento da precisão das medidas obtidas a partir de técnicas de “fusão de sensores”.

2.6. Principais finalidades da abordagem multisensor

A partir da necessidade de se estruturar os diferentes casos de abordagem multisensor com base nas principais finalidades de seus usos, Xaud e Santos (2010) organizaram categorias ou subdivisões da abordagem, as quais são apresentadas a seguir com ligeira atualização:

- ✓ **substituição**, quando se insere um dado auxiliar de um sensor remoto onde inexistia o dado do sensor principal, como em casos de séries temporais incompletas;
- ✓ **complementação**, quando se insere um novo dado de Sensoriamento Remoto (SR), onde o objeto (espaço) e o tempo são o mesmo, porém o dado SR obtido por diferentes sensores é diferente, adicionando informação;
- ✓ **calibração**, quando um dado SR principal é calibrado por outro dado auxiliar ou referencial;
- ✓ **intercalibração** ou fusão de dados, quando, para um mesmo fenômeno ou objeto, medidas independentes são obtidas por sensores diferentes, sendo gerado um dado SR final intercalibrado, caracterizando aumento de acurácia;
- ✓ **contextualização**, quando um dado SR ou produto temático advindo de um processamento prévio de um sensor modifica o processamento ou o produto final de outro sensor devido às informações topológicas no tempo e no espaço: proximidade, pertinência, intersecção, presença-ausência etc.;

- ✓ **casos multifinalitários**, quando há mais de uma finalidade envolvida.

2.6.1. Substituição

A substituição ocorre tipicamente em casos onde há necessidade de geração de históricos temáticos (fenologia da vegetação; usos do solo; áreas queimadas), quando na falta do dado de um sensor numa data de interesse, o dado de outro sensor é considerado. A falta de dados ou imagens de qualidade numa determinada data é bastante comum para casos de imageamento com sensores ópticos, com limitações referentes à ocorrência de nuvens. Outro problema que pode levar à substituição é a ocorrência de falhas no sensor, causando ruídos ou inviabilizando a obtenção de dados ou imagens numa determinada data.

A finalidade de substituição pode igualmente ser necessária no mapeamento de grandes espaços geográficos devido aos mesmos motivos descritos acima. Ainda que se considere apenas uma data ou período de referência, tais mapeamentos geralmente exigem a montagem de mosaicos de imagens, onde pode haver a necessidade de substituição do dado principal por dados de sensores alternativos compatíveis.

A longa série temporal de imagens TM/Landsat tem permitido não só a mensuração do desmatamento da Amazônia, como também a análise de impactos da exploração madeireira sem o devido manejo florestal, cujos danos tornam a floresta propícia à combustão sob certas condições. Na ausência de imagens de boa qualidade para algum período requerido, outros sensores podem ser utilizados, como CCD/CBERS e HRV/SPOT. Dados SAR também estão sendo testados para, em caso de excessiva e repetitiva condição de nebulosidade, se tornarem uma alternativa às imagens ópticas (SANTOS et al., 2008; HAARPAINNER et al., 2009).

2.6.2. Complementação

A complementação de imagens ópticas com imagens SAR (ou vice-versa) visa desde mapeamentos temáticos, até estimativas de parâmetros biofísicos, como biomassa, através da modelagem matemática adequada (SANTOS et al., 1999). Avanços expressivos da abordagem multisensor com a finalidade de complementação entre dados SAR e ópticos foram alcançados nos trabalhos de Nugroho e Hoekman (2000) e Haarpaintner et al.(2009), para estudos de áreas afetadas por incêndios recorrentes.

A complementação de dados SR pode também ser realizada com técnicas de fusão de imagens. Tais técnicas visam combinar informações espectrais provenientes de sensores com baixa resolução espacial, a imagens de resolução espacial de maior detalhe, porém pobres em resolução espectral (LEONARDI et al., 2005; SONG et al., 2011). De uma forma geral, a fusão de imagens é uma síntese do melhor que se pode ter em resolução espacial de uma imagem, com o melhor da informação espectral que se pode ter de uma outra imagem. Depois do processamento por quaisquer das técnicas para se obter as imagens fusionadas (SONG et al., 2011), reduz-se o volume total de dados mas pode-se perder a riqueza de informações originais.

2.6.3. Calibração

Geralmente a calibração é estabelecida pela utilização de um dado de menor incerteza com abrangência parcial, visando calibrar um dado de maior abrangência geográfica, mas de maior incerteza embutida. Tal abordagem foi utilizada por Pereira (1987) e Setzer et al. (1988). Ao comprovarem a utilidade de imagens AVHRR/NOAA e TM/Landsat para monitorar queimadas na Amazônia, os autores seguiram duas etapas: 1) em primeiro, realizaram a determinação de focos de calor em imagens AVHRR/NOAA, com resolução de 1,1 km no Nadir, derivando uma estimativa de área queimada; 2) em segundo, utilizaram imagens TM/Landsat com cobertura parcial da região, utilizando-as

como fonte de calibração para estimação dos erros e correção das estimativas de áreas queimadas obtidas com os dados AVHRR/NOAA.

2.6.4. Intercalibração ou fusão de dados

Segundo Salustiano e Reis Filho (2007), o termo se relaciona ao "... processo que autonomamente reúne e combina as observações de múltiplos sensores de mesma natureza ou de naturezas diferentes com o objetivo de fornecer aos sistemas de controle e monitoramento uma melhor percepção do ambiente, ou seja, dados e informações mais refinadas".

Como exemplo pode-se levar em consideração a detecção de focos de calor por diferentes satélites/sensores para uma região. Sabendo-se que sempre existem erros embutidos, podem ser estabelecidas rotinas de processamento que considerem, segundo a necessidade: a) a adição (união) do conjunto de focos derivados de cada sensor, descartando-se as redundâncias; b) a interseção (coincidência) de cada foco, onde um foco só é levado em consideração após a confirmação do mesmo pela detecção de outro sensor.

2.6.5. Contextualização

Giglio et al. (2009) desenvolveram um algoritmo híbrido de detecção de áreas queimadas que se baseia nas informações da resposta espectral de áreas queimadas e em informações contextuais sobre focos ativos. O algoritmo desenvolvido trabalha processando um "tile" (cena do MODIS) de cada vez. Na sequência de processamento é gerada uma imagem que resume as mudanças persistentes nas séries temporais de índices de vegetação e utiliza informação espacial e temporal sobre focos ativos para guiar a caracterização de mudanças em áreas queimadas e não queimadas da cena. A informação (contextual) de focos ativos é usada para gerar uma função de densidade de probabilidade para ocorrência de áreas queimadas próximas aos mesmos. O algoritmo identifica a data e a localização dos pixels de focos ativos e busca os

“pixels” relacionados nas imagens de reflectância de resolução de 500 m: banda 1 (0,65 μm), 5 (1,2 μm) e 7 (2,1 μm) dos dias próximos, classificando cada “pixel” em: i) área queimada, ii) área não queimada.

Embora no trabalho acima mencionado, os dados de focos ativos sejam provenientes do processamento de bandas do infravermelho termal do MODIS e as áreas queimadas dependam de valores espectrais em bandas do infravermelho próximo do mesmo sensor, nada impediria que a informação de focos viesse de algum outro sensor (e.g AVHRR/NOAA), preferencialmente com resolução espacial compatível. Neste caso, o mais importante é o realce à possibilidade de agregação de uma informação de contexto (ou temática) a uma imagem a ser processada (classificada); cujo produto final da classificação se modifica de acordo com o contexto ou distribuição espacial do tema de entrada (focos de calor). O conceito de contexto pode ser ampliado para englobar a ideia de tempo, considerando a repetição ou duração de um evento (foco, cicatriz etc.), como no atual produto “burned areas” do MODIS (NASA, 2010b).

2.6.6. Casos multifinalitários

No mapeamento realizado para áreas afetadas por incêndios em Roraima em 1998, limitações que incluíram a forte ocorrência de nuvens, levaram ao uso de dados multisensor (SHIMABUKURO et al., 1999). Para que os objetivos fossem alcançados foram utilizadas imagens: i) TM/Landsat; ii) videografia digital; iii) RADARSAT; e OLS/DMSP. Neste estudo foram buscadas as seguintes finalidades: substituição (de AVHRR/NOAA por OLS/DMSP), de TM/Landsat por RADARSAT); calibração (de TM/Landsat por Videografia Digital) e contextualização (focos de calor obtidos de OLS/DMSP que apoiaram o mapeamento de áreas queimadas em TM/Landsat).

O desenvolvimento de ferramentas computacionais de mineração de dados e classificação orientada a objetos aumentaram as opções de integração de

dados multisensor multitemporais (XAUD, 2009; KORTING, 2012). Desta nova geração de ferramentas computacionais de análise de dados de sensoriamento remoto, algumas permitem incluir como atributos ou parâmetros da classificação, informações espectrais, de contexto e até de forma.

Outro avanço que vem sendo introduzido é a da manutenção dos dados de sensores remotos em bancos de dados geográficos, mantidos e manipuláveis em sua resolução radiométrica original, sem que haja perda de conteúdo ou degradação da resolução (XAUD et al., 2009b). A observação de fenômenos em diferentes escalas, baseada em concepção de objetos em multiresolução ou segmentação em diversos níveis (PINHO, 2005), é outro avanço que pode impactar positivamente a geração de novas metodologias baseadas em abordagem multisensor.

2.7. Monitoramento regional e global da vegetação

Como exemplos de sucesso de tecnologias de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo da cobertura vegetal, principalmente em florestas tropicais, podem ser citados três importantes projetos de monitoramento que foram concebidos em momentos diferentes, com finalidades diferentes e utilizando imagens e metodologias diferentes: (a) o PRODES (INPE - www.obt.inpe.br/prodes/), baseado em imagens Landsat TM e ETM+; (b) o DETER (INPE - www.obt.inpe.br/deter/), baseado em imagens MODIS; e o Kyoto&Carbon Initiative (ROSENQVIST et al., 2007), baseado em imagens ALOS-PALSAR.

Uma vez que a área atingida anualmente por incêndios florestais não foi ainda tão demandada pelos órgãos nacionais e internacionais para que sejam calculadas as emissões nacionais e globais de carbono (IPCC, 2007) ou para que sejam realizadas fiscalização e controle, todos os três projetos têm seu foco apenas nas conversões abruptas das florestas através do corte-raso (desflorestamento).

Embora o fogo seja um elemento que sempre está ligado à presença humana no meio rural e, portanto está ligada também às alterações por desflorestamento (NEPSTAD et al., 1999), a degradação florestal causada por incêndios tem sido considerada ainda como um elemento secundário nos cálculos de balanço de carbono, devendo ganhar espaço em levantamentos futuros (ARAGÃO et al., 2009; ARAGÃO e SHIMABUKURO, 2010).

À medida que aumentam o conhecimento e o debate sobre mudanças climáticas globais, seus efeitos sobre os ecossistemas, agroecossistemas e populações humanas (IPCC, 2007) e à medida que a maior frequência de eventos extremos (e.g. seca na Amazônia em 2005) aumentam os riscos de ocorrência de grandes incêndios na região, o conhecimento sobre a área atingida por incêndios florestais e seus graus de severidade passam a ser cada vez mais exigidos, devido ao potencial que o fogo tem de liberar carbono para a atmosfera de forma rápida.

Esta dualidade das florestas tropicais em se transformarem de “sumidouros” em “fontes” de emissão de carbono deve ser levada em consideração nas negociações sobre as políticas de REDD (Reducing Emissions from Deforestation and Degradation), conforme discutido em Aragão e Shimabukuro (2010). Em consequência, isto poderá aumentar a demanda para a produção de dados sistemáticos sobre áreas queimadas e a severidade de incêndios florestais em caráter nacional e global. O mesmo sucesso alcançado pelo Brasil no monitoramento da cobertura vegetal com ênfase em desflorestamento deve ser buscado para aumentar o conhecimento sobre as áreas impactadas por incêndios em florestas tropicais (SHIMABUKURO et al., 2011).

2.8. Perspectivas futuras para o monitoramento sistemático de áreas queimadas em regiões tropicais

Uma vez que há uma extensa série de dados e muita experiência acumulada no uso de imagens Landsat, MODIS e ALOS-PALSAR, assim como outras

fontes de dados sensoriados, existe boa perspectiva de desenvolvimento de metodologias capazes de superar os problemas inerentes aos levantamentos de áreas atingidas por incêndios em regiões tropicais, muito sujeitas à ocorrência de nuvens e a rápida dinâmica de regeneração da paisagem, devido ao vigor do crescimento vegetal pós-incêndio (RIVERA-LOMBARDI, 2003).

Particularmente as missões, Landsat, MODIS e ALOS/PALSAR têm garantias de continuidade com o lançamento de novos satélites. O LDCM (Landsat Data Continuity Mission; Landsat 8) foi lançado com sucesso em 11 de fevereiro de 2013 (NASA, 2013a). O ALOS-2 está com lançamento previsto para os primeiros meses de 2013 (JAXA, 2013). Os sensores MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua continuam em extensão de operação, sendo continuamente recalibrados (TUCKER e YAGER, 2011), embora já possam contar com o seu “substituto”, o VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite; MURPHY et al., 2001) a bordo do satélite NPP (National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System Preparatory Project), lançado em 28 de outubro de 2011 (NASA, 2013b).

3 METODOLOGIA GERAL

3.1. Descrição e localização da área de estudo

Por ter sido acometida por três grandes incêndios, 1998, 2003 e 2007, nos últimos 15 anos, sendo um deles já designado por megaincêndio (KIRCHHOFF e ESCADA, 1999) e outros dois já indicados como de grandes proporções (BARBOSA et al., 2004; XAUD e SANTOS, 2010), a região do “Arco do Fogo” de Roraima apresenta características positivas como área de abrangência de estudos para o avanço do conhecimento científico em relação ao mapeamento de áreas impactadas por incêndios florestais na Amazônia.

A região do "Arco do Fogo" de Roraima é formada, principalmente, pelos municípios de Mucajaí, Iracema, Caracaraí, Cantá, Amajari e Alto Alegre. A área de estudo está localizada nos municípios de Mucajaí e Iracema, entre as coordenadas W61°03'-W61°46' e N02°09'-N02°47', sendo representativa da região florestal mais impactada pelos incêndios em Roraima (Figura 3.1).

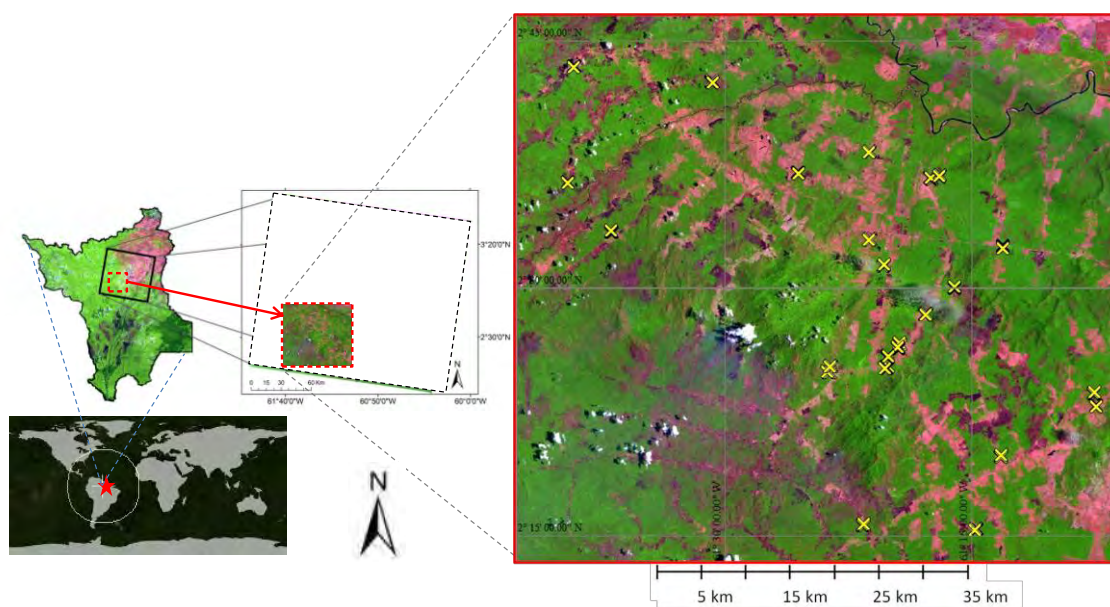


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

A densidade demográfica de Mucajaí é baixa, em torno de 1,2 hab./km² com população de 14.792 habitantes; em Iracema estes indicadores são ainda menores com 0,6 hab./km² e 8.696 habitantes (IBGE, 2011). A situação fundiária se divide entre lotes familiares com módulos rurais de cerca de 60 ha de área total e fazendas. Os sistemas de produção agropecuários geralmente não contam com alta tecnologia de máquinas agrícolas e insumos, utilizando ainda práticas tradicionais de derrubada e queima para abertura de novas áreas, implantação de roça e/ou de pasto em áreas de capoeira, ou mesmo, para manejo do pasto visando à limpeza anual de ectoparasitas e remoção da palhada (XAUD, 1998; FERREIRA et al., 2009).

A região em estudo é fitogeograficamente designada por áreas de Tensão Ecológica, correspondente a diversas associações entre Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Aberta e/ou Floresta Estacional Semidecidual (Radambrasil, 1975; IBGE, 1992). As variações das associações vinculadas às Florestas Ombrófila Densa e Estacional estão relacionadas à altitude (maioria submontana), ao tipo de relevo predominante (ondulado) e à ocorrência ou não de árvores emergentes. Para a Floresta Ombrófila Aberta, predomina a variação “com palmeiras” em relevo ondulado. Araujo (1999), na descrição da mesma área, mencionou a ocorrência predominante da palmeira inajá (*Maximiliana martiana*) e a forte influência estacional devido à proximidade com as áreas de savana. No presente trabalho foi observado um equilíbrio de ocorrência das palmeiras inajá (*M. Martiana*) e bacaba (*Oenocarpus bacaba*).

Os solos em sua maioria são de baixa fertilidade, distróficos ou álicos, de textura média, havendo poucas ocorrências de solos eutróficos e de textura argilosa. As classes predominantes são: Latossolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolo Litólico (Radambrasil, 1975; EMBRAPA, 1999). Quanto à geologia a área-piloto pertence à unidade Guiana Central, com litologias da Suíte Intrusiva Mucajaí. Os principais rios da região são o Mucajaí e o Apiaú (Radambrasil, 1975).

Quanto ao clima, Mourão Jr. et al. (2006) descreveram uma precipitação média anual de 1.844 mm, que no decorrer dos meses de setembro-abril ficou abaixo de 100 mm/mês e de dezembro a março, abaixo de 60 mm/mês. Segundo o critério de Köppen o clima é do tipo Aw, tropical úmido com uma estação seca acentuada, pelo menos um mês chove menos de 60 mm e a amplitude térmica média anual é menor que 5°C.

Segundo a classificação de Gaussen, de acordo com o mapa climático do Radambrasil (1975), a área de estudo estaria caracterizada pelos tipos climáticos subtermoxérico, com estação seca de 1 a 2 meses e o termoxeroquimênico atenuado, com uma estação seca curta de 3 a 4 meses (Radambrasil, 1975). Deve ser ressaltado que esta classificação de Gaussen e o mapa produzido foi baseada nas curvas ombrotérmicas de Gaussen e na distribuição da vegetação na área. Analisando-se apenas a precipitação a descrição recairia somente para o tipo climático termoxeroquimênico atenuado, chegando próxima da descrição de um clima termoxeroquimênico médio, geralmente associado à vegetação savanóide.

A descrição da precipitação em Mourão et al. (2006), juntamente com a descrição dos tipos climáticos de Köppen e Gaussen, e, dos tipos predominantes de vegetação na área, são características indicadoras de que existe uma alta adaptação e/ou um efeito autorregulador das florestas desta região que promovem um microclima úmido capaz de sustentar estas florestas, mesmo em situações de seca acentuadas.

Dada a importância do clima na distribuição espaço-temporal de incêndios florestais e na resiliência e dinâmica da vegetação atingida, a seguir estão relacionados alguns mapas síntese das principais Normas Climatológicas para o Brasil (NCB). Através dos mapas NCB anuais fica destacada a singularidade climática de Roraima, principalmente de sua região central e nordeste, em relação ao restante da Amazônia (Figura 3.2).

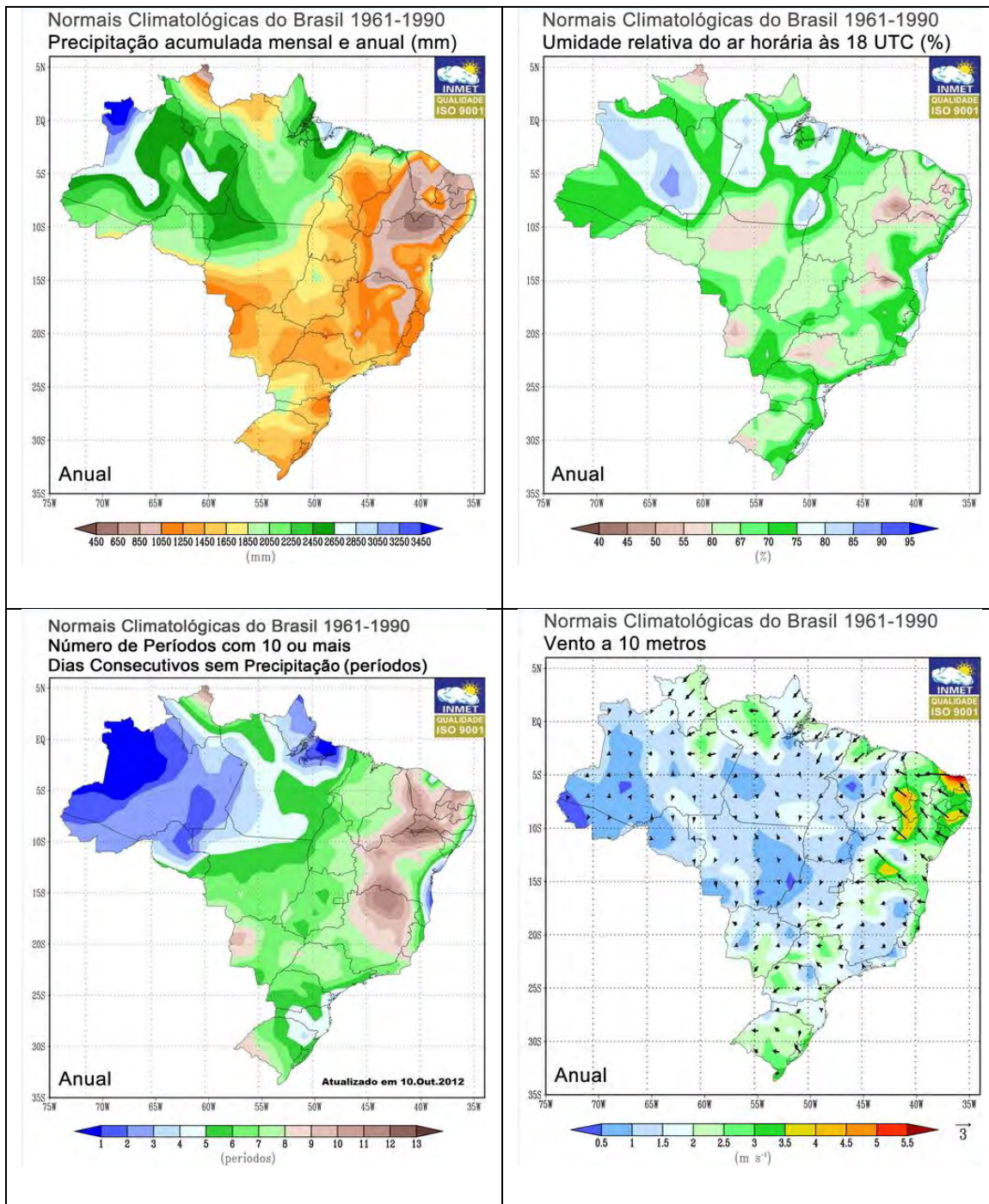


Figura 3.2 – Normais Climatológicas do Brasil (1961-1990).

Os mapas foram gerados através dos dados NCB do INMET (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>). Para o mapa de umidade relativa, foi utilizado o horário UTC de 18:00, que equivale às 14:00 em Roraima, descrito como horário crítico em avaliações de

condições meteorológicas e risco de fogo na região do Apiaú (Xaud et al., 2007).

Em síntese, a região de estudo está localizada numa faixa de transição climática (e vegetacional) entre uma área mais seca (domínio de savanas), no nordeste de Roraima e uma área mais úmida no sudoeste e noroeste do Estado (domínio de florestas densas). Suas normais climatológicas apresentam ventos mais intensos, menor precipitação, menor umidade relativa do ar e maiores períodos de seca acumulada, quando comparados ao restante da Amazônia.

3.2. Produtos de sensoriamento remoto utilizados

Para esta pesquisa foram utilizados, dados temáticos e imagens de satélite que fazem parte de grandes sistemas de monitoramento da vegetação nacional e internacional, que ainda estão operacionais ou que ficaram operacionais por bastante tempo. Devido à concentração de focos de calor em Roraima, durante os 4 primeiros meses do ano (Figura 3.3), o esforço de busca de imagens viáveis concentrou esforços neste período.

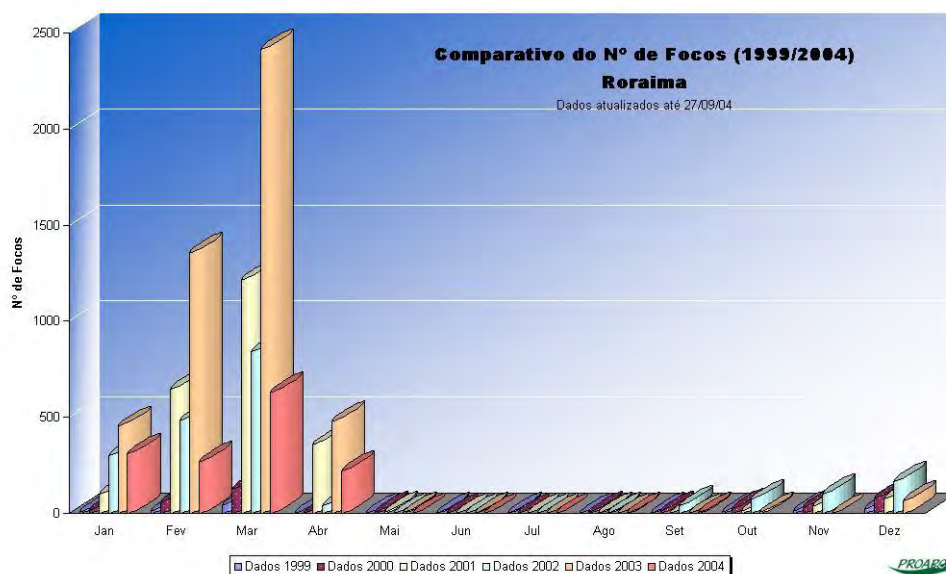


Figura 3.3 - Distribuição de focos de calor para Roraima (1999-2004).

Fonte: PROARCO, 2008.

3.2.1. Dados Temáticos

3.2.1.1. Dados de remanescentes florestais

Como dados temáticos foram utilizados os resultados dos projetos PRODES (2003 e 2007) e TerraClas (2007-2008). A partir destes dados foram definidas as áreas de remanescentes florestais, visto que o objetivo do trabalho consistiu em detectar áreas queimadas em fitofisionomias florestais. Os dados brutos foram obtidos das respectivas páginas do INPE: PRODES (www.obt.inpe.br/prodes/) e TerraClas (www.obt.inpe.br/cra/) e manipulados no Spring e no TerraView para geração de mapas temáticos de remanescentes florestais para as datas de maior interesse, 2003 e 2007.

3.2.1.2. Dados de focos de Calor

A série temporal completa de focos de calor produzida pelas diversas passagens dos satélites disponíveis na página do Monitoramento de Queimadas do INPE (<http://www.inpe.br/queimadas/>; INPE, 2012) foi baixada em formato “shapefile” e arquivo texto (txt) para os períodos de 01.01 a 30.04 para os anos de 1999 a 2012. O INPE mantém uma base de dados de monitoramento de diversos satélites, mas para efeito de referência e comparação multitemporal, prioriza o uso dos focos de calor gerados a partir do NOAA-12 (até 09 de agosto de 2007) e do MODIS-Aqua (período da tarde).

Houve uma fase de transição em que o NOAA-15 substituiu o NOAA-12 (de agosto de 2007 a agosto de 2011). A partir de agosto de 2011, depois de longo período de calibração de algoritmos e validação, o INPE passou a utilizar prioritariamente como referência, os dados de focos de calor do MODIS-Aqua (tarde), retroativamente até agosto de 2007. Segundo INPE (2012), “cada satélite de órbita polar produz pelo menos um conjunto de imagens por dia, e os geoestacionários geram algumas imagens por hora, sendo que no total o INPE processa mais de 100 imagens por dia”.

Para utilização como dados secundários foi elaborada análises do comportamento temporal e espacial dos focos de calor para Roraima, no sentido de contextualizar a incidência de queimadas e/ou incêndios florestais no Estado. Para esta contextualização foram usadas as frequências mensais dos focos de calor de 1999 a 2012. Alguns trabalhos já apresentaram análises específicas para Roraima, ajudando a compreender o comportamento dos focos de calor no Estado, tais como Xaud et al. (2008) (Figura 3.4), Xaud e Xaud (2010) e Barbosa (2010) (Figura 3.5).

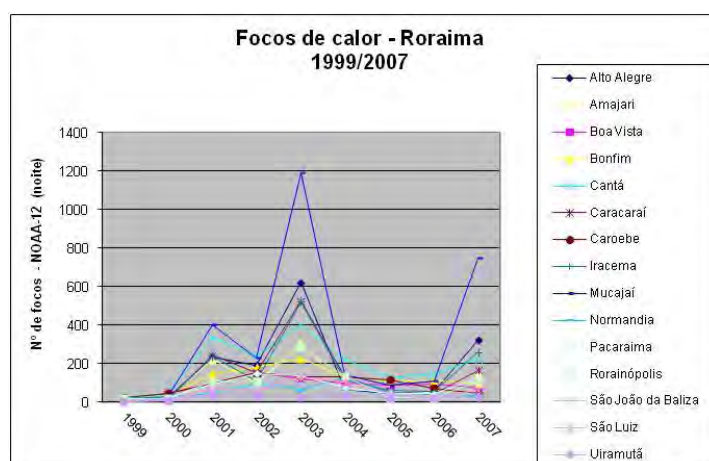


Figura 3.4 - Focos de calor por município em Roraima (1999-2007), NOAA-12.
 Fonte: Xaud et al. (2008).

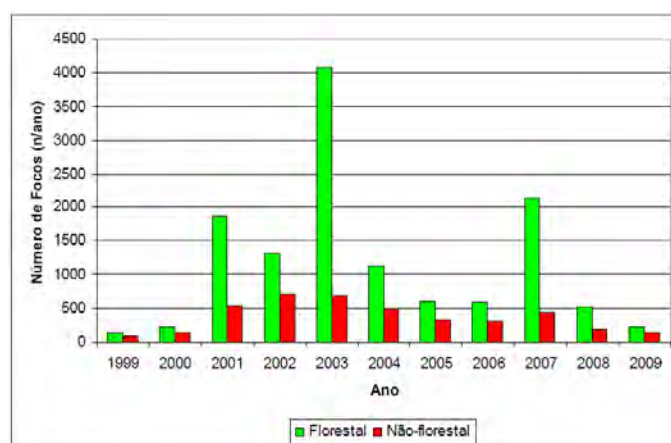


Figura 3.5 - Distribuição dos focos de calor 1999-2009, NOAA-12 e NOAA-15.
 Fonte: Barbosa (2010).

3.2.2. Imagens Landsat

A fonte majoritária de imagens TM e ETM+ foi o repositório GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov/>), que disponibiliza imagens ortorretificadas com 30m resolução. Para cada data foram utilizadas as 3 bandas ópticas no visível (bandas 1, 2, 3) e 3 no infravermelho próximo e médio (bandas 4, 5, 7), em projeção UTM, datum WGS84, da órbita-ponto 232-58. De forma complementar foi utilizada uma imagem TM de março de 1998 (bandas 3, 4, 5), cedida por COTOPAXI e processada pelo DGI-INPE de Cachoeira Paulista (Tabela 3.1).

Considerando os meses de maior incidência de incêndios em áreas florestais em Roraima (fevereiro e março), os períodos prioritários de observação pré-incêndio foram alocados de novembro a janeiro. Já os períodos prioritários de observação pós-incêndio foram alocados de março a abril. Quando não houve imagem de qualidade nestes períodos, buscou-se imagens com maior correspondência temporal para a observação da paisagem antes e depois de cada evento de incêndio. A seleção das imagens foi realizada com base nos “quicklooks” de cada imagem, buscando-se evitar aquelas com elevada ocorrência de nuvens na área de estudo ou com muitos ruídos.

3.2.3. Imagens MODIS

Foram consideradas como fonte de imagens MODIS três produtos derivados do MODIS: o MOD-09 (reflectância de superfície), o MOD-13 (índices de vegetação) e o NDVI-filtrado (LAF-INPE).

As imagens MOD-09GQ, da coleção 5 do MODIS, foram obtidas como imagens diárias compostas pelas bandas de reflectância 1 (R-vermelho), 2 (NIR-Infravermelho próximo), equivalentes às bandas 3 e 4 do TM. As bandas 1 e 2 do MOD-09 são geradas originalmente com resolução espacial de 250m (EOS, 2008).

Tabela 3.1 - Quadro geral com a série histórica de imagens TM e ETM+ utilizadas no estudo.

| Sensor\Procedência | Data | Dia do ano* |
|--------------------|------------|-------------|
| TM\GLOVIS | 17.08.1986 | 229 |
| TM\GLOVIS | 17.01.1996 | 17 |
| TM\GLOVIS | 03.11.1997 | 307 |
| TM\COTOPAXI-INPE | 11.03.1998 | 70 |
| TM\GLOVIS | 17.07.1998 | 198 |
| TM\GLOVIS | 18.08.1998 | 230 |
| TM\GLOVIS | 21.10.1998 | 294 |
| TM\GLOVIS | 10.10.2000 | 284 |
| TM\GLOVIS | 30.01.2001 | 30 |
| ETM+\GLOVIS | 11.03.2001 | 70 |
| ETM+\GLOVIS | 27.12.2002 | 361 |
| ETM+\GLOVIS | 17.03.2003 | 76 |
| TM\GLOVIS | 11.03.2004 | 71 |
| TM\GLOVIS | 25.09.2006 | 268 |
| TM\GLOVIS | 20.03.2007 | 79 |

* Conforme Calendário Juliano (365,25 dias/ano)

As imagens MOD-13Q1, da coleção 5 do MODIS, foram obtidas nas seguintes especificações: mosaico de 16 dias; imagens-reflectância nos comprimentos de onda R (vermelho) e NIR (Infravermelho próximo) na resolução de 250m; demais imagens-reflectância B (azul) e MIR (Infravermelho médio), na resolução de 500m interpoladas para 250m; imagens índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e EVI (Enhanced Vegetation Index) em 250m. As imagens disponíveis do produto MOD-13Q1 iniciaram no ano 2000 (fevereiro), em mosaicos gerados a cada 16 dias com a finalidade de diminuir a ocorrência de nuvens e outros fatores de não imageamento: ângulo de visada fora do Nadir, faixas não imageadas, ocorrência de ruídos etc.

Por conta de verificações iniciais realizadas a respeito das imagens MOD-13 e sua parcial contaminação com nuvens e degradação geométrica para alvos

fora do nadir (XAUD et al., 2008), decidiu-se pela investigação adicional de séries temporais filtradas, baseadas no MOD-13, que buscam minimizar estes tipos de problema (FREITAS et al., 2011).

A série temporal NDVI filtrada é proveniente da série primária MOD-13 (NDVI), coleção 5, obtida do Serviço Geológico dos Estados Unidos-USGS (lpdaac.usgs.gov) posteriormente filtrada para ângulos de visada acima de 32,5°, presença de nuvens, suavização de oscilações abruptas e ausência de informações, utilizando filtragem por ondeletas (wavelets) (FREITAS et al., 2011). A filtragem da série NDVI seguiu os mesmos procedimentos básicos utilizados para obtenção da série EVI2 filtrada, com informações detalhadas na página do LAF-DSR (e.g. Figura 3.6; <https://www.dsr.inpe.br/laf/series/>). A série filtrada NDVI-MODIS (16 dias), resolução de 250m, foi gentilmente cedida por R. Freitas (Comunicação pessoal). Segundo Bradley et al. (2007) a variação média da curva de uma série temporal de um alvo de vegetação pode ser uma boa aproximação da sua fenologia anual e interanual.



Figura 3.6 – Exemplo do comportamento de uma série temporal de índices de vegetação (EVI2) medida para um “pixel” do MODIS de área florestal, antes (linha em azul) e depois da filtragem (linha em vermelho).

3.2.4. Imagens ALOS-PALSAR

As imagens do sensor PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) foram provenientes do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), lançado em janeiro de 2006, pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA), tendo concluído sua missão em maio de 2011. O satélite tinha a bordo dois instrumentos ópticos (PRISM – Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping e AVNIR-2 – Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer type 2) e o PALSAR.

O PALSAR é um radar imageador de abertura sintética (SAR), que opera na banda L (~23 cm), frequência de 1270 MHz, sendo capaz de gerar imagens sobre regiões cobertas por nuvens e à noite. Apesar de poder gerar imagens nas quatro polarizações (HH, VV, HV e VH), a maior quantidade de dados disponíveis está em polarização simples (FBS) HH ou em polarização dual HH e HV (FBD). As imagens PALSAR multitemporais (2008, 2009 e 2010) utilizadas neste trabalho foram obtidas em modo FBS, com nível de correção L1.1, contendo somente a informação da polarização HH, com uma resolução espacial básica de 7,5 m em “ground range” e 3,2 m em azimute, para um ângulo central de visada de 38,8° (Figura 3.7).

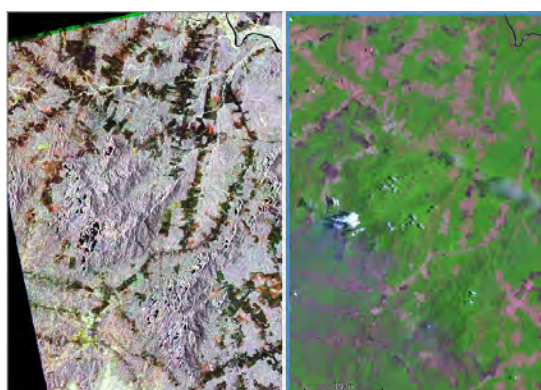


Figura 3.7 – À esquerda, imagem PALSAR (HH) em intensidade nas três datas utilizadas 2008-2009-2010 (composição RGB); à direita, imagem TM de março de 2007 bandas 5,4,3 (composição RGB).

3.3. Fluxograma geral da pesquisa

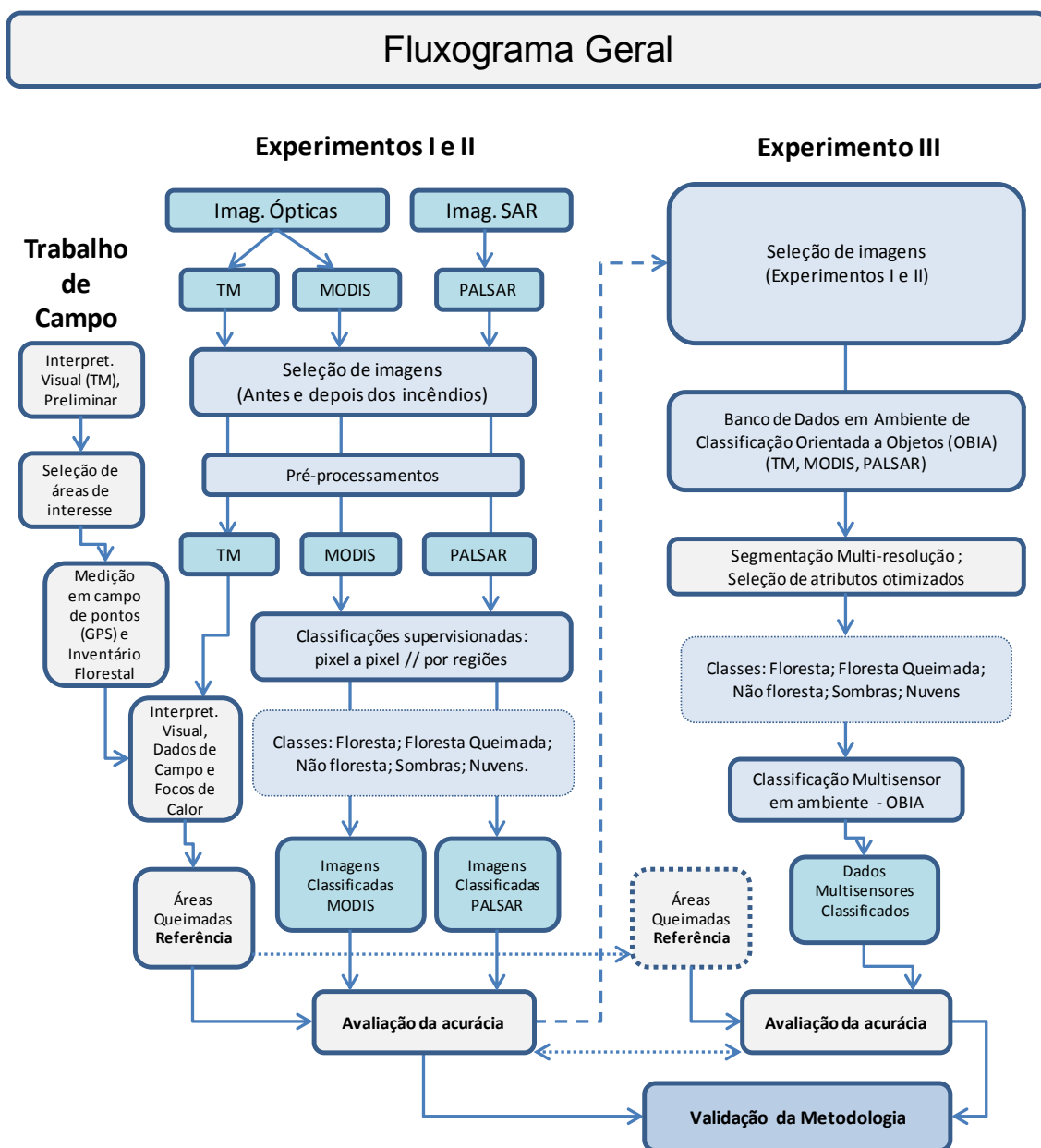


Figura 3.8 – Fluxograma da pesquisa mostrando as 4 principais etapas do trabalho: (1) Levantamento de campo; e os Experimentos I, II e III de sensoriamento remoto.

Conforme esquematizado no fluxograma geral (Figura 3.8), o trabalho foi subdividido em 4 etapas: Trabalho de Campo e Experimentos de sensoriamento remoto I, II e III. Todas as etapas foram planejadas para o alcance de resultados parciais independentes e relevantes ao tema de pesquisa, e, ao mesmo tempo, servirem de base para validação cruzada destes resultados ou ao menos para embasarem as discussões dos resultados dos demais experimentos.

Por fim, através da observação conjunta de todas as etapas emergem as conclusões e recomendações finais, buscando-se atender aos objetivos gerais da pesquisa cujo foco foi a investigação de metodologias avançadas, visando melhorar o conhecimento sobre as florestas tropicais afetadas por incêndios em Roraima, buscando-se apontar possibilidades operacionais para tornar este tipo de levantamento, um monitoramento sistemático.

4 COLETA E ANÁLISE DE DADOS DE CAMPO: INVENTÁRIO FLORESTAL DE ÁREAS AFETADAS POR INCÊNDIOS EM RORAIMA

O conhecimento sobre o estado atual das florestas impactadas pelo grande incêndio em Roraima em 1998, e, parcialmente acometidas por incêndios recorrentes, era uma incógnita não investigada até o início da realização do presente levantamento em 2010. Portanto, o objetivo principal desta etapa foi a execução um diagnóstico sobre a degradação destas florestas na área de estudo através da análise de um amplo inventário florestal. Tal conhecimento de campo é extremamente útil para embasar as discussões advindas dos levantamentos de sensoriamento remoto.

Os objetivos específicos foram:

- (i) obter pontos de controle (GPS) e informações secundárias, através de entrevistas com os proprietários rurais, para subsidiar a análise e validação de produtos de sensoriamento remoto.
- (ii) descrever, quantificar e comparar as composições florísticas, os índices de diversidade e os parâmetros estruturais das florestas afetadas;
- (iii) analisar os diversos estágios de degradação florestal derivados do impacto dos incêndios;
- (iv) apontar os melhores indicadores para a avaliação dos impactos dos incêndios nas florestas tropicais da região;
- (v) Indicar as possíveis tendências de recuperação ou degradação das florestas avaliadas, caso o regime de fogo se mantenha.

4.1. Metodologia

4.1.1. Imagem de satélite utilizada como suporte na fase de campo

Uma imagem em composição colorida falsa cor (R5G4B3) do Landsat 5 TM, órbita-ponto 232/58 de 20.03.2007, que continha as cicatrizes do incêndio florestal mais recente (2007) foi utilizada para apoiar a seleção de áreas a serem amostradas e para a navegação de campo com a intenção de execução de um inventário florestal. O uso de imagens TM na caracterização inicial da vegetação em termos do nível de degradação de fogo ou como uma referência de mapeamento tem sido amplamente utilizada (EVA e LAMBIN, 1998; PATRONO et al., 2000;. HUDAK e BROCKETT, 2004; BARLOW et al., 2012).

4.1.2. Estratégia de amostragem

Devido à extensão da área de estudo (~ 5.500 km²) e à complexidade da paisagem florestal decorrente da severidade de cada incêndio e de sua recorrência, a amostragem foi realizada de forma estratificada (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997). A definição das classes (Tabela 4.1) seguiu os seguintes passos: (i) levantamento histórico dos principais incêndios na região (1998, 2003 e 2007); (ii) coleta de informação junto aos agricultores que indicou inicialmente 4 tipos de classes (estratos temáticos) a serem inventariadas: (FN) florestas primárias não atingidas por incêndios; (FQ1) florestas atingidas por 01 incêndio; (FQ2) florestas atingidas por 02 incêndios; e (FQ3) florestas atingidas por 03 incêndios; (ii) separação ainda em campo das áreas incendiadas 01 vez (1998) em duas classes, alta (FQ1A) e baixa severidade (FQ1B). Tal separação foi necessária, uma vez que havia parcelas incendiadas em 1998 com aspecto de baixa alteração no dossel e no sub-bosque e outras onde o aspecto era indicativo de alterações mais intensas. Diferenças entre a severidade de incêndios para áreas afetadas em 1998, formando mosaicos com diferentes graus de mortalidade de árvores, foram relatadas em levantamento executado pelo IBAMA (1998) e confirmadas em Martins et al. (2012) e Xaud et al. (2013).

Foi programado um total de 50 parcelas (transectos de 25m x 100m) para realização de inventário florestal (Tabela 4.1). Visando maximizar a eficiência da coleta de dados, minimizando sobretudo o tempo de deslocamento entre parcelas, os transectos foram estabelecidos aos pares, mantendo-se a independência entre eles através de distância mínima ($\geq 50\text{m}$) e casualização na orientação em azimute.

Tabela 4.1 – Classes de degradação por fogo, ano(s) de ocorrência de incêndio(s), número (n), área total de parcelas e coordenadas geográficas iniciais das parcelas (Projeção Lat-Long; datum WGS84). Roraima, Brasil.

| Classes de degradação por fogo (símbolo) | Ocorrência de incêndio (ano) | n | Área (ha) | Coordenadas geográficas dos transectos: Long./Lat. (graus decimais) |
|---|------------------------------|----|-----------|--|
| Florestas primárias não atingidas por incêndios (FN) | - | 8 | 2 | -61.323/2.444; -61.323/2.444; -61.336/2.421; -61.336/2.421; -61.297/2.474; -61.296/2.474; -61.127/2.394; -61.126/2.394 |
| Florestas atingidas por 01 incêndio de BAIXA intensidade (FQ1B). | 1998 | 8 | 2 | -61.245/2.256; -61.246/2.257; -61.221/2.330; -61.220/2.330; -61.339/2.523; -61.339/2.523; -61.218/2.543; -61.219/2.541 |
| Florestas atingidas por 01 incêndio de ALTA intensidade (FQ1A) | 1998 | 10 | 2.5 | -61.337/2.420; -61.337/2.419; -61.353/2.638; -61.354/2.638; -61.426/2.617; -61.426/2.617; -61.291/2.610; -61.291/2.611; -61.283/2.613; -61.282/2.614 |
| Florestas atingidas por 02 incêndios (FQ2) | 1998, 2003 | 14 | 3.5 | -61.324/2.439; -61.325/2.440; -61.395/2.415; -61.396/2.415; -61.392/2.421; -61.393/2.421; -61.353/2.550; -61.353/2.549; -61.124/2.381; -61.124/2.381; -61.336/2.431; -61.335/2.431; -61.268/2.410; -61.267/2.501 |
| Florestas atingidas por 03 incêndios (FQ3) | 1998, 2003, 2007 | 10 | 2.5 | -61.361/2.260; -61.360/2.261; -61.652/2.724; -61.653/2.724; -61.660/2.607; -61.659/2.607; -61.514/2.709; -61.513/2.708; -61.615/2.556; -61.616/2.557 |
| Total | | 50 | 12.5 | |

4.1.3. Dados coletados no inventário florestal

O inventário foi executado em janeiro e fevereiro de 2010 e para cada parcela devidamente georreferenciada com GPS foram anotadas as informações relativas aos eventos de incêndio: a) número de vezes em que cada parcela sofreu ação de fogo; b) qual o tipo predominante de incêndio em cada evento, se de superfície ou de dossel; c) qual a intensidade local de seu efeito, se de baixo ou de alto impacto para a vegetação. Foram anotadas ainda características qualitativas como: espécies dominantes no sub-bosque, relevo local e presença de afloramentos rochosos.

Nessas parcelas foram mensurados todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 10 cm, incluindo-se indivíduos da família Palmae (Arecaceae) e Streliziaceae. O inventário constou do levantamento do: (i) nome vulgar/morfoespécie; (ii) DAP; (iii) altura total (Ht); (iv) posição do indivíduo no plano cartesiano formado pelos eixos perpendiculares X e Y da parcela. A identificação das morfoespécies foi realizada por especialista na flora Amazônica (parabotânico com mais de 30 anos de experiência), a partir de características dendrológicas. Os nomes científicos e famílias foram confirmadas a partir da literatura (LORENZI, 1998, 2000; RIBEIRO et al., 1999) e ajustados para a lista de espécies de "Flora do Brasil", versão 2011 (FORZZA et al., 2010.) e banco de dados Tropicos (TROPICOS.ORG, 2012). Em relação à família Leguminosae, seguiu-se o procedimento de unificação proposto por Polhil e Raven (1981) e corroborado por Klitgaard e Lewis (2011).

4.1.4. Parâmetros florísticos e fitossociológicos utilizados

Para análise da riqueza de espécies (S) foram contabilizadas as espécies ocorrentes nas parcelas, incluindo Palmae e Streliziaceae (DAP ≥ 10 cm). Para avaliação da diversidade e caracterização das parcelas foi utilizado o Índice de Diversidade de Shannon (H'), baseado no logaritmo natural (MAGURRAN, 1989). A uniformidade foi descrita através do índice de equibilidade (J') de

Pielou (MAGURRAN, 1989; 2004) e do Coeficiente de Mistura de Jentsch (QM) (LAMPRECHT, 1962; CIENTEC, 2006). As curvas de acumulação de espécies foram gerados por um procedimento de rarefação baseado no estimador Tau Mao (COLWELL et al., 2004; 2012; BARLOW et al., 2012), utilizando o programa EstimateS ver.8.2 (COLWELL, 2006). Para o cálculo do volume total (V) foi usado um fator de forma médio para árvores de florestas tropicais (0,7) em equação baseada em volume cilíndrico simples (área da seção transversal a 1,30m do solo x altura total). Foram determinados do conjunto de dados inventariados, os seguintes parâmetros: Número de indivíduos (N), Área Basal (AB), Frequência (F), Densidade (D) e Dominância (Do), Absolutas (A) e Relativas (R), e o Valor de Importância ($VI=DR+FR+DoR$) (LAMPRECHT, 1962; MUELLER-DOMBOIS e ELLEMBERG, 1974; MAGURRAN, 1989). As equações dos parâmetros utilizados estão no ANEXO 1.

4.1.5. Análises estatísticas aplicadas ao inventário

A suficiência de amostragem de inventário florestal quanto à composição florística foi avaliada através da construção de curvas individuais baseados em interpolação (rarefação) para estimar a riqueza (S) de cada classe com base em 1000 aleatorizações, pelo procedimento Tau Mao no programa EstimateS ver.8.2 (COLWELL, 2006). Além disso, a suficiência de amostragem do inventário florestal foi avaliada pela análise do erro amostral (COCHRAN, 1977; SANQUETTA et al., 2006), que foram calculados com base nos parâmetros estruturais N e BA no programa Mata Nativa ver.2 (CIENTEC, 2006), com um limite de erro tolerado de 20%.

Os dados foram tabulados em planilha eletrônica e manipulados no programa Mata Nativa 2 (CIENTEC, 2006), onde foram obtidos os principais resultados de caracterização florístico-estrutural por parcela. As análises estatísticas univariadas foram realizadas em ambiente R (R Development Core Team, 2011) e incluíram: (i) visualização dos dados através de gráficos (boxplots) mostrando a dispersão dos parâmetros N (e DA), S, H', J', QM, DAP, Ht, AB (e

DoA), V e suas tendências; (ii) aplicação do teste de normalidade Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$); (iii) aplicação dos testes Levene e Bartlett para igualdade de variâncias ($\alpha=0,05$); (iv) aplicação de ANOVA (one way) e teste Tukey ($\alpha = 0,05$) para avaliação da existência de diferenças entre estratos temáticos quanto às médias dos parâmetros pertinentes. Adicionalmente para a diversidade de Shannon (H'), foram feitas análises simuladas através de Jackknife (CIENITEC, 2006).

Análises multivariadas com base em métodos de ordenação foram realizados no programa CANOCO, ver.4.5 (ter Braak e Šmilauer, 2002) para investigar a distribuição de parcelas em função de um gradiente ecológico de níveis de degradação por fogo, levando-se em consideração a composição florística e as variáveis fitossociológicas (MANLY, 1994; LEPŠ e ŠMILAUER, 2003; LEGENDRE e BIRKS, 2012; XAUD et al., 2013).

4.2. Resultados: Levantamentos de campo

4.2.1. Quanto à suficiência amostral do inventário

Os resultados florísticos mostraram que as proporções de espécies novas foram inferiores a 5% das espécies registradas nas últimas amostras, considerando-se a curva média estimada para cada classe (Figura 4.1). De acordo com o critério de Cain (1938), citado por Schilling e Batista (2008), a amostra é suficiente quando um aumento de 10% em área corresponde a um aumento de menos de 10% em novas espécies. Por outro lado, a análise de erro amostral com base no parâmetro N indicou que a classe 3 (FQ1A) foi subamostrada, com um erro de 29%. Este erro foi provavelmente resultante da grande variação no número de indivíduos de *Phenakospermum guyannense* nas parcelas desta classe. No entanto, as outras classes foram consideradas suficientemente amostradas. Deve-se salientar que a maioria dos autores (LAMPRECHT, 1962; MUELLER-DOMBOIS e ELLENBERG, 1974;

MAGURRAN, 1989) indicam que a área basal (AB) é mais importante do que o N na avaliação da estrutura da floresta.

Assim, a análise de parâmetros AB mostrou que somente a classe 5 (FQ3) poderia ser aumentado ligeiramente em dois transectos de repetição visando alcançar o número ideal de amostras e reduzir o erro de amostragem abaixo de 20%. Para todas as outras classes a amostragem foi considerada adequada. Tendo em vista que tanto a composição florística como a estrutura são importantes para a caracterização e avaliação da floresta (MUELLER-DOMBOIS e ELLENBERG, 1974; MAGURRAN, 1989), o inventário foi considerado representativo das florestas na região do “Arco do Fogo” de Roraima, principalmente as da região do Apiaú e Roxinho, relatadas como as mais atingidas pelos incêndios desde 1998.

4.2.2. Descrição florística da área total inventariada

No levantamento florístico das 50 parcelas (12,5 ha), considerando-se árvores e palmeiras com DAP acima de 10 cm, foram contabilizados 5593 indivíduos pertencentes a 177 morfoespécies, 122 gêneros e 53 famílias. As dez principais espécies em termos de abundância foram: *Cecropia leucoma* Miquel (n=1050), *Phenakospermum guianense* (Rich.) Miq. (n=934); *Maximiliana martiana* Karst. (n=293); *Oenocarpus bacaba* Mart. (n=281); *Pouteria* sp.1 (n=204); *Eugenia* sp. (n=151) (2,7%); *Vitex* sp.1 (n=122) (2,18%); *Protium* sp.1 (n=112) (2%); *Apeiba* sp. (n=109) (1,95%); *Geissospermum sericeum* Benth. & Hook.f. ex Miers (n=101) (1,81%); que somaram 60% de todos os indivíduos amostrados (APÊNDICE 1).

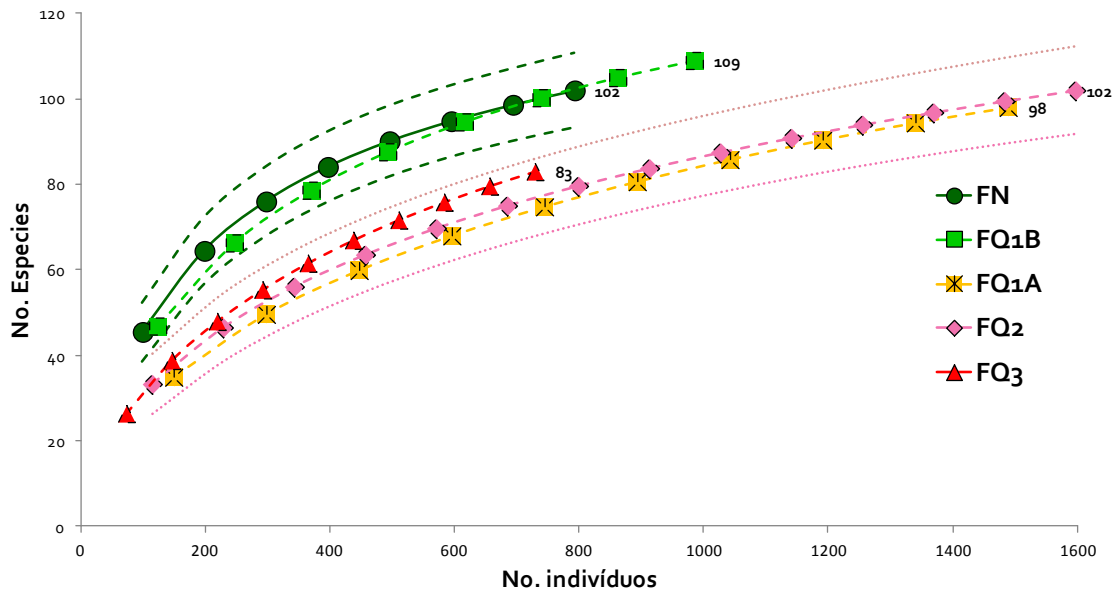


Figura 4.1 – Curvas espécie-área para cada um dos estratos temáticos: (FN) Florestas primárias não incendiadas; (FQ1B) Florestas atingidas por 01 incêndio de baixa intensidade; (FQ1A) Florestas atingidas por 01 incêndio de alta intensidade; (FQ2) Florestas atingidas por 02 incêndios; (FQ3) Florestas atingidas por 03 incêndios.

As cinco famílias com o maior número de indivíduos foram Urticaceae ($n = 1104$), Strelitziaceae ($n = 934$), Arecaceae ($n = 658$), Sapotaceae ($n = 341$) e Leguminosae ($n = 283$). Esta composição florística mostrou uma alta porcentagem (36%) de indivíduos de espécies pioneiras (LORENZI, 1998; 2000, RIBEIRO et al., 1999), o que é típico de áreas alteradas e estágios sucessionais após incêndios.

4.2.3. Análise da degradação causada por incêndios florestais usando parâmetros florísticos

Os valores médios das principais variáveis florísticas por classe de impacto de degradação por fogo estão registrados na Tabela 4.2. A variação da riqueza (S) e uniformidade (J') por classe está sintetizada na Figura 4.2. Devido às condições impostas pelos testes paramétricos (normalidade e homocedasticidade), apenas N e QM puderam ser submetidos à ANOVA e ao

teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). As análises univariadas indicaram que as variáveis N e QM não foram suficientes para separar as classes de degradação por fogo.

Tabela 4.2 - Parâmetros florístico e fitossociológico de florestas (DAP ≥ 10 cm) da área de estudo, segundo as classes de degradação por fogo. Região do Apiaú/Roxinho, Roraima, Brasil.

| Classes | Plots (m) | n. Plots | Área total (ha) | N | DA (N/ha) | DoA (m ² /ha) | S | J' | H' | QM |
|---|-----------|----------|-----------------|------|-----------|--------------------------|-----|------|------|--------|
| Florestas primárias não atingidas por incêndios (FN) | 10 x 250 | 8 | 2 | 793 | 396.5 | 20.7 | 102 | 0.85 | 3.95 | 1: 2.9 |
| Florestas atingidas por 01 incêndio de BAIXA intensidade (FQ1B). | 10 x 250 | 8 | 2 | 985 | 492.5 | 20.3 | 109 | 0.79 | 3.7 | 1: 3.8 |
| Florestas atingidas por 01 incêndio de ALTA intensidade (FQ1A) | 10 x 250 | 10 | 2.5 | 1489 | 595.6 | 19.4 | 98 | 0.57 | 2.63 | 1: 5.9 |
| Florestas atingidas por 02 incêndios (FQ2) | 10 x 250 | 14 | 3.5 | 1597 | 456.3 | 16.1 | 102 | 0.67 | 3.08 | 1: 6.2 |
| Florestas atingidas por 03 incêndios (FQ3) | 10 x 250 | 10 | 2 | 729 | 291.6 | 11.5 | 83 | 0.69 | 3.05 | 1: 3.3 |

N- indivíduos, **S** – riqueza, **J'** – uniformidade, **H'** - Índice de Shannon, obtidos globalmente por classe; **QM** – Coeficiente de mistura, obtido como a média dos transectos em cada classe.

Quanto à riqueza (S), analisada a partir das curvas de acumulação de espécies (rarefação), houve diferenças significativas (95% de probabilidade) entre os dois grupos (Figura 4.1): (a) floresta inalterada ou pouco alterada pelo fogo (FN e FQ1B), e, (II) florestas intensamente alteradas pelo fogo (FQ1A, FQ2 e FQ3). Ainda na análise da riqueza (S) calculada pela abordagem clássica baseada na amostragem por área (por parcela), os dados revelaram uma tendência decrescente da classe floresta não queimada (FN) para a classe de floresta mais intensamente queimada (FQ3), embora não tenha sido possível avaliar a significância das diferenças entre as classes (Figura 4.2). Já a análise do índice de Shannon (H') pela abordagem de Jackknife revelou diferenças significativas (Figura 4.3) entre os mesmo dois grupos separados pela análise das curvas de

rarefação, confirmando os resultados sobre diferenças dos mesmos em relação à diversidade.

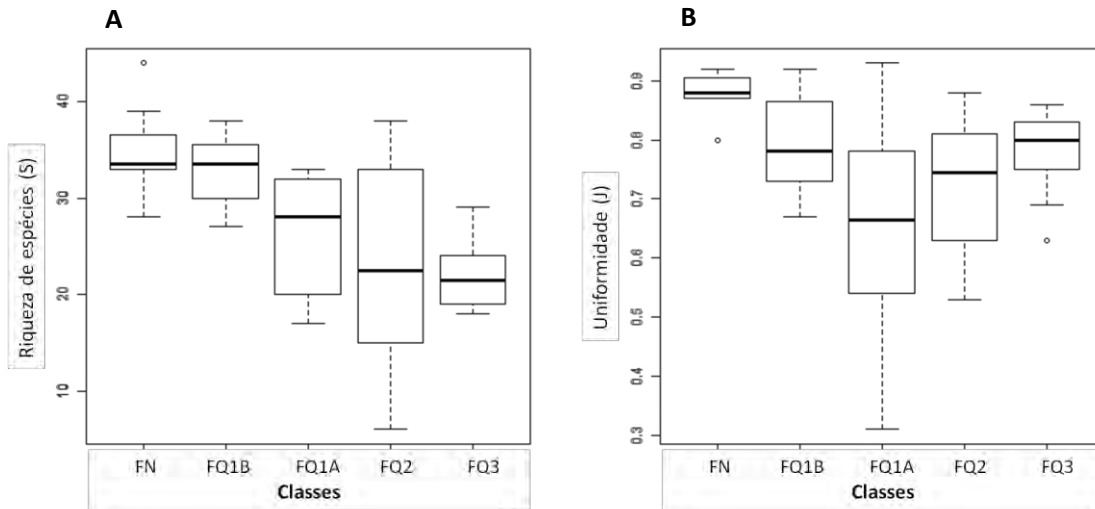


Figura 4.2 – Riqueza (S) e uniformidade (J) para as 5 classes de degradação por incêndios em florestas na região do “Arco do Fogo”, no Apiaú e Roxinho, em Roraima; variação dos dados (50%) entre o 1º e 3o quartis delimitado pelo box, mostrando mediana (linha horizontal interna), valores máximos e mínimos (linhas tracejadas) e outliers (pontos).

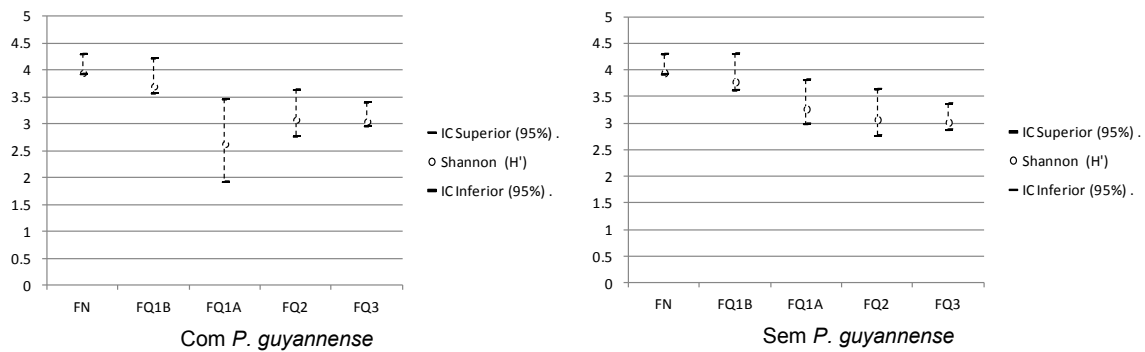


Figura 4.3 – Intervalo de confiança (IC) para Índices de Shannon (H') analisados segundo procedimento de Jackknife, considerando a presença e ausência de indivíduos de *P. guyannense*.

Assim, com base nas análises univariadas, duas variáveis florísticas foram úteis para identificar diferenças significativas entre as classes em dois grupos:

o índice de Shannon (pelo procedimento Jackknife) e riqueza (pelo procedimento de rarefação).

4.2.4. Análise da degradação das florestas através de parâmetros fitossociológicos

Como esperado, observou-se uma tendência decrescente nas médias de Ht (altura total), BA (área basal) e V (volume total) em todas as classes, de FN para FQ3. A partir das análises univariadas, verificou-se que o volume total (V) foi suficiente para identificar três grupos, expressando uma transição gradual de uma classe para outra de FN a FQ3 (Figura 4.4C). Ht e AB também foram úteis, especialmente quando foram removidos os indivíduos de *Phenakospermum guyannense* dos dados, porque esta influenciava sobremaneira a variável Ht.

A partir da comparação entre a floresta não queimada (FN) e a floresta mais degradada pelo fogo (FQ3), os resultados indicaram notável perda em área basal (dominância) de aproximadamente 50% (Tabela 4.2; Figura 4.4A), e, em volume a perda foi de cerca de 60% (Figura 4.4C). Estes parâmetros e altura total estão relacionados com a biomassa e, dada a relação natural entre a biomassa e volume, espera-se que a perda em biomassa sejam proporcionais às perdas em volume. Devido à alta complexidade das questões que envolvem biomassa, equações alométricas e outros detalhes específicos, este tema foi tratado em outros trabalhos em separado (e.g. MARTINS et al., 2012)

Foi analisada a abundância percentual (densidade relativa) de *Cecropia* spp. (Figura 4.4D), uma vez que a espécie estava distribuída em todas as classes de degradação por fogo e representada em mais de 80% das parcelas, formando um padrão crescente através do gradiente de fogo. Embora a diferença no percentual de *Cecropia* tenha sido não significativa entre FN e FQ1B, esta variável foi muito útil, pois indicou diferenças maiores do que os de

qualquer outra variável. As diferenças foram significativas entre FQ1B e FQ1A ($\alpha = 0,10$), e não houve diferenças significativas entre os FQ1A, FQ2 e FQ3.

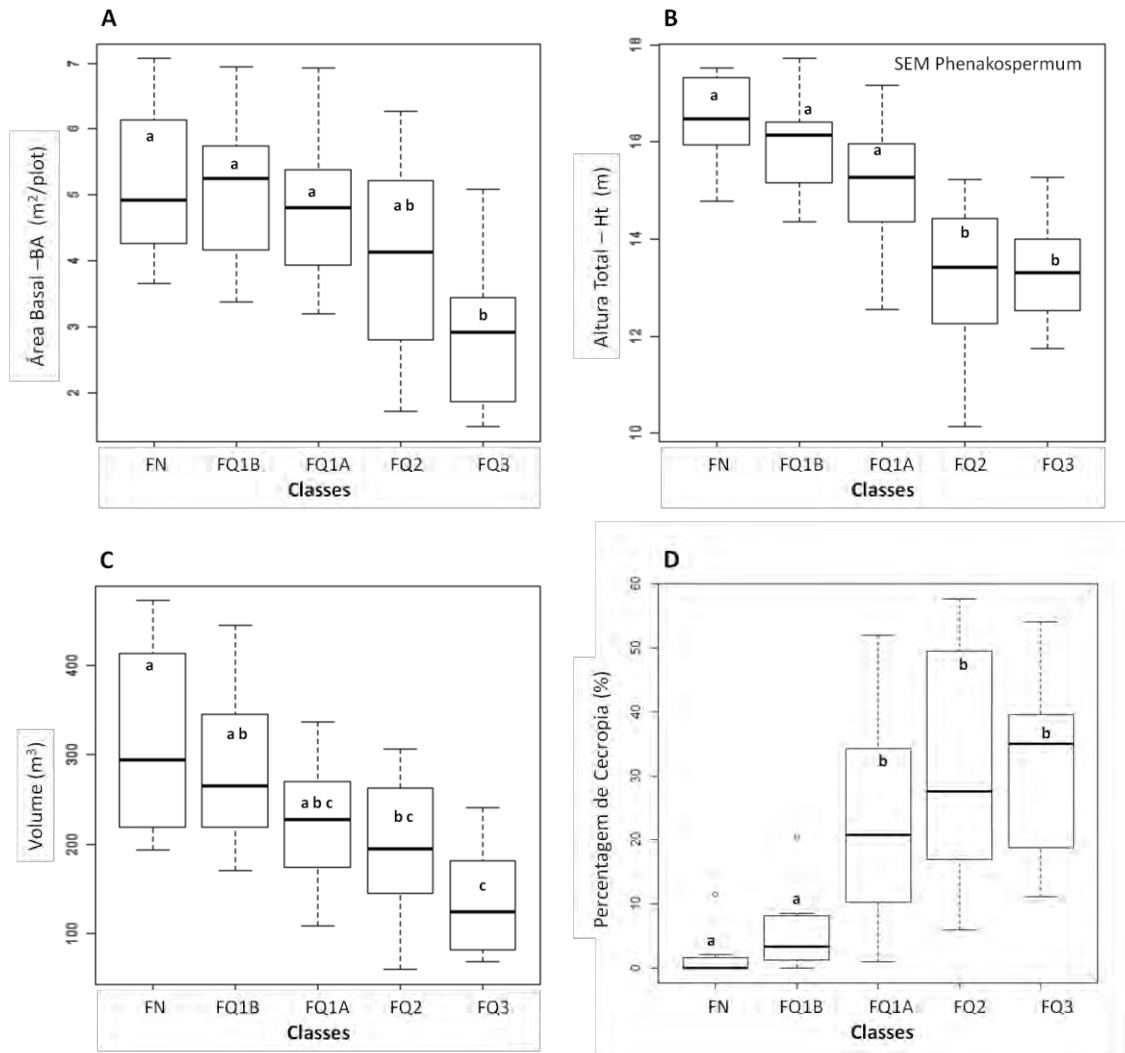


Figura 4.4 – Área basal, altura total, volume e percentual de Cecropia, das 50 parcelas em cinco classes de degradação pelo fogo na região do Apiaú-Roxinho em Roraima; letras diferentes representam diferença significativa, teste de Tukey ($\alpha=0,05$); variação dos dados (50%) entre o 1º e 3º quartis delimitado pelo box, mostrando mediana (linha horizontal interna), valores máximos e mínimos (linhas tracejadas) e outliers (pontos).

Embora a densidade global (DA) por parcela não tenha sido suficiente para caracterizar as classes, a análise das 10 espécies com maior DA no inventário (Tabela 4.3) revelou alguns novos aspectos para que se entenda a situação

atual das florestas afetadas pelo fogo na região de estudo. A Tabela 4.3 mostra que houve casos em que DA não foi influenciada pela recorrência de fogo, revelando a presença de espécies altamente tolerantes (por exemplo, *Pouteria* sp.1. e *Vitex* sp.1). Por outro lado, as espécies mais positivamente afetadas foram *Cecropia leucocoma* e *Apeiba* sp.

Tabela 4.3 – Densidade Absoluta (DA) das 10 espécies de maior abundância nos 50 transectos por classe de degradação por fogo. Região do Apiaú/Roxinho, Roraima, Brasil.

| morfoespécie | FN | FQ1B | FQ1A | FQ2 | FQ3 |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| <i>Cecropia leucocoma</i> | 5.5 ± 12.5 | 23.0 ± 29.8 | 110.0 ± 90.9 | 137.4 ± 97.2 | 94.8 ± 59.0 |
| <i>Phenakospermum guyannense</i> | 14.5 ± 21.2 | 56.5 ± 116.8 | 237.2 ± 322.9 | 45.4 ± 74.6 | 16.0 ± 38.6 |
| <i>Maximiliana martiana</i> | 25.5 ± 43.1 | 18.0 ± 20.1 | 10.8 ± 11.3 | 38.3 ± 69.3 | 18.0 ± 28.4 |
| <i>Oenocarpus bacaba</i> | 39.0 ± 38.4 | 73.0 ± 78.9 | 11.6 ± 9.5 | 6.0 ± 7.8 | 2.8 ± 5.0 |
| <i>Pouteria</i> sp.1 | 14.0 ± 9.1 | 16.0 ± 18.8 | 12.4 ± 20.0 | 18.3 ± 15.1 | 19.6 ± 15.0 |
| <i>Eugenia</i> sp. | 9.5 ± 11.1 | 6.0 ± 9.3 | 4.0 ± 6.3 | 22.0 ± 40.6 | 13.2 ± 14.4 |
| <i>Vitex</i> sp.1 | 7.0 ± 13.8 | 11.5 ± 22.0 | 9.6 ± 16.0 | 11.1 ± 22.4 | 8.8 ± 12.5 |
| <i>Protium</i> sp.1 | 12.5 ± 6.2 | 20.5 ± 8.1 | 4.0 ± 4.2 | 8.3 ± 6.0 | 2.8 ± 3.3 |
| <i>Apeiba</i> sp. | 0.5 ± 1.4 | 5.5 ± 8.8 | 7.2 ± 10.8 | 11.7 ± 14.1 | 15.2 ± 8.8 |
| <i>Geissospermum sericeum</i> | 6.5 ± 13.2 | 8.0 ± 14.0 | 26.8 ± 47.3 | 1.4 ± 4.3 | 0.0 |
| DA – Todas as Espécies | 396.5 ± 81.5 | 492.5 ± 111.3 | 595.6 ± 295.3 | 456.3 ± 138.1 | 291.6 ± 94.5 |

DA = n. indivíduos / ha ± DP; **FN**-Florestas primárias, não queimadas; **FQ1B**-Florestas afetadas por um incêndio - de BAIXA intensidade; **FQ1A**-Florestas afetadas por um incêndio - ALTA intensidade; **FQ2**-Florestas afetadas por 2 incêndios; **FQ3**-Florestas afetadas por 3 incêndios .

Espécies negativamente afetados foram *Oenocarpus bacaba* e *Protium* sp.1. Algumas espécies exibiram uma fase positiva de aumento da densidade (DA), seguida por uma fase negativa forte (por exemplo, *Phenakospermum guyannense* e *Geissospermum sericeum*). As espécies *Eugenia* sp. e *Maximiliana martiana* não mostraram uma resposta clara. Os seus valores de DA mantiveram-se estáveis em todas as classes. Tal padrão foi uma surpresa no caso de *M. martiana*, visto que alguns relatórios e artigos científicos citam

esta espécie como uma oportunista e pioneira, em particular no que diz respeito à recuperação após eventos de incêndios florestais (IBAMA, 1998; NASCIMENTO et al., 2000).

A análise do gráfico de distribuição diamétrica (Figura 4.5), permitiu caracterizar as diferentes classes de perturbação por fogo. A classe FN seguiu um padrão de "J" invertido, com uma concentração de indivíduos em diâmetros menores e uma diminuição exponencial do número de indivíduos em diâmetros maiores, tal padrão é típico de floresta tropical primária (ODUM, 1988). FQ1B mostrou um desvio acentuado, com cerca de 100 indivíduos de 10-20 cm de diâmetro (mais do que o observado em FN), mas FQ1B foi muito semelhante à FN em diâmetros maiores. Este resultado confirma que houve incêndios de baixa severidade de fogo no "Arco de Fogo" de Roraima que afetou a maioria das espécies de sub-bosque com diâmetros menores (IBAMA, 1998) sem causar maiores alterações no dossel superior.

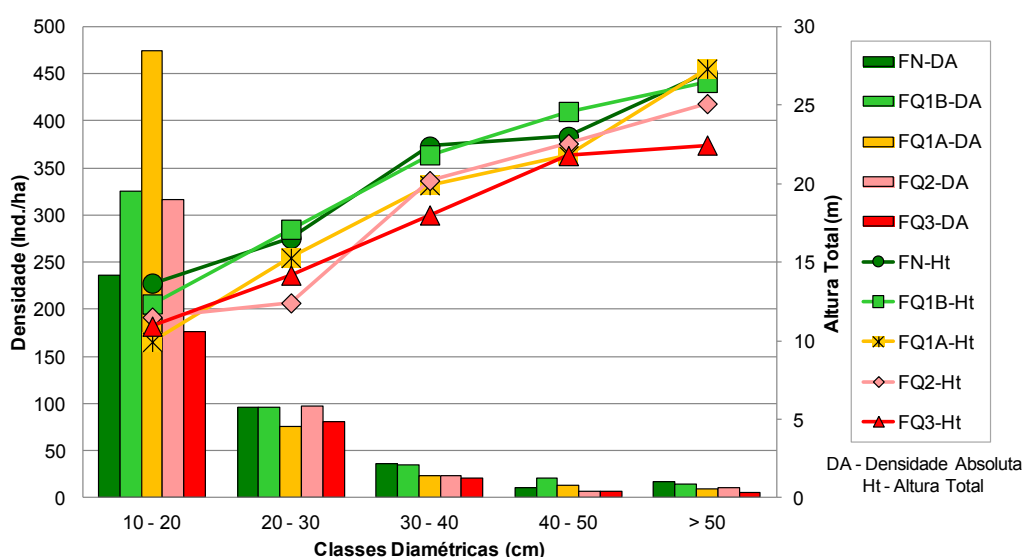


Figura 4.5 – Médias de densidade absoluta (DA) e altura total (Ht) por classe diamétrica em diferentes classes de degradação por fogo: **FN**-Florestas primárias, não queimadas; **FQ1B**-Florestas afetadas por um incêndio - de BAIXA intensidade; **FQ1A**-Florestas afetadas por um incêndio - ALTA intensidade; **FQ2**-Florestas afetadas por 2 incêndios; **FQ3**-Florestas afetadas por 3 incêndios.

O FQ1A revelou um forte aumento no número de indivíduos nas classes de DAP menores. Ele foi causado principalmente pela população anormal de *Phenakospermum guyannense* concentrada nesta classe de DAP. FQ1A, FQ2 e FQ3 apresentaram um padrão claro de diminuição do número de indivíduos nas classes maiores de DAP. Na fase inicial de regeneração (FQ3), três anos após o terceiro incêndio, houve uma redução do número de indivíduos de todas as classes de DAP. Estes resultados indicaram que houve mortalidade em árvores de grande porte sem substituição a curto e médio prazos e que a mortalidade dos indivíduos de DAP menores foi seguido por elevadas taxas de regeneração.

4.2.5. Avaliação da degradação da floresta através de parâmetros florísticos e fitossociológicos conjuntamente

Para realizar a avaliação, os dados foram testados usando análise de correspondência destendenciada (DCA) e análise de correspondência destendenciada canônica (DCCA), obtendo-se gradientes de 3,2 e 2,5, respectivamente. Os resultados indicaram que a análise de redundância (RDA) seria adequada para as análises multivariadas (Lepš e Šmilauer, 2003). O resultado com base em RDA e o teste de permutação de Monte Carlo (Figura 4.6), gerou quatro eixos canônicos principais, confirmando que havia um gradiente ecológico associado com a incidência e recorrência de incêndios nas florestas da região. As variáveis, altura total (Ht), porcentagem de *Cecropia* (Perc.Cec), índice de Shannon (H') e riqueza (S) foram significativamente correlacionados com os eixos RDA (p -valor $\leq 0,003$).

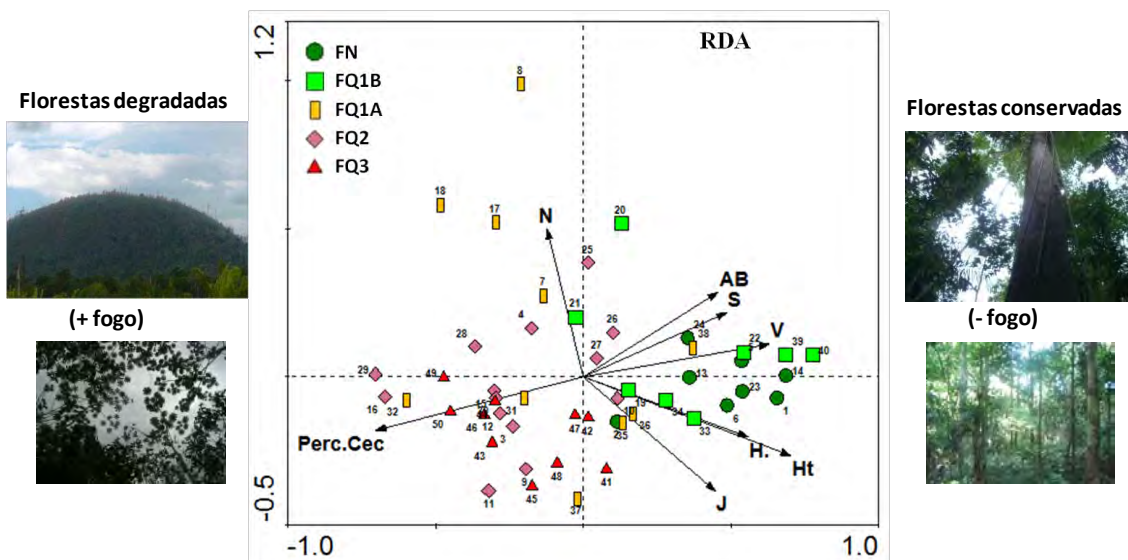


Figura 4.6 - Gráfico da ordenação (RDA) usando diferentes variáveis (setas pretas): Percentual de *Cecropia* (Perc.Cec); número de indivíduos (N); área basal (AB); volume (V); altura total (Ht); riqueza (S); índice de Shannon (H'); uniformidade (J); nas fotos, exemplos de áreas conservadas (à direita) e degradadas, à esquerda

Com base nos eixos 1 e 2 da RDA (Figura 4.6), que explica 63% da variância das variáveis florísticas e estruturais, foram extraídas várias características dos dados florísticos e fitossociológicos analisados:

(1) a maioria das amostras da FN e classes FQ1B foram bem separados das outras, associadas a maiores valores das variáveis área basal (AB), volume (V), altura total (Ht), Índice de Shannon (H') e riqueza (S);

(2) as amostras das classes mais afetadas pelo fogo (FQ1A, FQ2 e FQ3) foram positivamente posicionadas em relação à percentagem de *Cecropia* spp. (Perc.Cec) e foram negativamente posicionado em relação às variáveis AB, V, Ht, H' e S;

(3) houve uma evidente variabilidade na posição das amostras de FQ1A e FQ2 em relação a N (indivíduos / parcela), que pode ser explicado pela variação na abundância de *Phenakospermum guyannense* nestas amostras;

(4) por outro lado, a uniformidade (J') foi influenciada negativamente pela dominância de *C. leucocoma* e *P. guyannense*;

(5) considerando todas as variáveis, a menor variação foi observada entre amostras de floresta primária não queimada (FN) e entre amostras de florestas danificadas por três incêndios (FQ3);

(6) foram testadas ainda as classes de degradação por fogo como variável (categórica), como resultado seu vetor foi posicionado de forma semelhante à percentagem de *Cecropia*, confirmando a existência do gradiente de fogo nesta direção.

4.3. Discussão: Levantamentos de Campo

4.3.1. Florestas tropicais afetadas por incêndios recorrentes: uma paisagem complexa

Os resultados mostraram alta complexidade nas paisagens queimadas vários anos após incêndios (3-12 anos). Verificou-se grande variação nos parâmetros florísticos e estruturais, especialmente em classes intermediárias de perturbações (FQ1B, FQ1A e FQ2). Este padrão foi provavelmente influenciado por incêndios em 1998, que foram predominantemente descritos como fogos de sub-bosque em que a mortalidade inicial variou de 8% a 21% entre os indivíduos com dossel ($DAP \geq 10$ cm) e de 36% para 78% entre os indivíduos do sub-bosque (5 -10 cm de DAP; IBAMA, 1998; SANTOS et al., 1998; BARBOSA e FEARNSSIDE, 1999). Por outro lado, os efeitos da seca causada pelo El Niño de 1997-1998 (BARBOSA e FEARNSSIDE, 1999; SHIMABUKURO et al., 1999) foram equivalentes ao longo da região do "Arco de Fogo" em Roraima, sugerindo alguma homogeneidade na recuperação da vegetação pós-incêndio.

Os resultados indicaram que a heterogeneidade das florestas (CONDIT et al., 2000), a natureza estocástica de fogo (COCHRANE e SCHULZE, 1999) e as diferenças locais em condições ambientais (relevo, afloramento rochoso, solo, material combustível, etc.) produziu um complexo mosaico (IBAMA, 1998) na paisagem pós-fogo. Na sequência do segundo grande incêndio florestal da região em 2003, o mosaico de vegetação continuou a se formar, impulsionado pelos mesmos fatores que mantiveram a alta variabilidade na vegetação em regeneração (FQ2). Após o terceiro incêndio florestal (FQ3), no entanto, observou-se que a variabilidade dos parâmetros florísticos e estruturais diminuiu.

Estes resultados consistem em um elemento novo para descrever perturbações pós-fogo e indicam uma possível convergência (no sentido da degradação) de parâmetros florísticos e estruturais após um terceiro incêndio florestal (FQ3). Dada a dominância de *Cecropia* spp. nas classes FQ2 e FQ3 e a sua tolerância ao fogo (UHL et al., 1981; MARTINS et al., 2012; XAUD et al., 2013) na região, este padrão tende a continuar nos próximos anos. Este comportamento de *Cecropia* spp. é muito diferente do que o observado por Barlow e Peres (2008), que verificou densidades menores de *Cecropia* spp. após os incêndios recorrentes.

4.3.2. A situação atual e a resistência ao fogo

A partir dos resultados, observou-se que a diversidade original dessas florestas nativas não queimadas (FN), de acordo com a riqueza de espécies (S), uniformidade (J') e do índice de Shannon (H'), é uma das mais baixas da Amazônia (OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA e AMARAL, 2004; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005;. ALARCÓN e PEIXOTO, 2007;. RODRIGUEZ TELLO et al., 2008; GONÇALVES e SANTOS, 2008; OLIVEIRA et al., 2008;. SILVA , 2010).

A área basal, parâmetro diretamente relacionado ao volume e biomassa, segue a mesma tendência. Além disso, as taxas mais baixas de mortalidade de

árvores após incêndios em Roraima (BARBOSA e FEARNSIDE, 1999), comparada com taxas em áreas localizadas no oeste do Pará, levaram Barlow et al. (2003) sugerirem que as florestas de Roraima deveriam ter sido alteradas pela ocorrência de incêndios muito pretéritos, tornando-se tolerante a novos incêndios.

De fato, com base nos resultados florísticos e estruturais, não foi encontrada diferença significativa entre a floresta não queimada (FN) e floresta afetada por um incêndio de baixa intensidade (FQ1B), apoiando esta hipótese de alta resiliência ao fogo. No entanto, destacamos que essa resistência foi parcial e muito difícil de ser prevista. Deve ser ressaltado que por conta do mesmo evento de incêndio florestal (1998), verificou-se grande distúrbio na classe FQ1A, indicando que a capacidade de resistência nesta classe foi completamente rompida.

4.3.3. As principais tendências para as florestas no "Arco de Fogo" em Roraima após incêndios recorrentes

Em geral, os resultados apresentados corroboram a teoria da complexidade, diversidade e energia decrescente armazenada no ecossistema em forma de volume ou biomassa, como uma função da distância a partir do "clímax" na sequência de qualquer perturbação forte (incluindo os incêndios) capaz de romper o equilíbrio do ecossistema (BUDOWISKY, 1966; ODUM, 1988). Desta forma, os resultados concordam e reforçam as discussões e conclusões da maior parte das referências nesta questão (e.g., COCHRANE e SCHULZE, 1999, NEPSTAD et al., 1999, BARLOW et al., 2003, BARLOW e PERES, 2008, BALCH et al., 2011), indicando que o fogo provoca uma forte erosão ecológica, dando origem a um ecossistema muito mais pobre em todos os descritores ecológicos analisados.

Compararam-se os índices de diversidade de Shannon (H') obtidos neste estudo aos de Costa et al. (2005) na mesma região e os resultados foram

semelhantes, mesmo que as metodologias de inventário adotadas tenham sido um pouco diferentes. Os autores citados determinaram um H' de 1,49 a 2,37 para áreas de pousio de cinco anos após roçado de corte e queima (sucessão secundária; transecto de 100m x 10m; $DAP \geq 5$ cm). Nas classes FQ1A, FQ2 e FQ3 do presente estudo, o índice de Shannon da maioria dos transectos foi inferior a 2,37. Os resultados em termos de percentagem de *Cecropia* spp. (Figura 4.4D), principalmente em FQ2 (7 anos após o fogo), foi de cerca de 50%, muito próxima aos resultados obtidos por Costa et al. (2005), e funcionaram como um real indicador da grave alteração das florestas por incêndios recorrentes.

Os resultados quantitativos apresentados indicam que os incêndios intensos e recorrentes na região do "Arco de Fogo" em Roraima, estão fazendo com que as florestas severamente queimadas (FQ1A, FQ2 e FQ3) entrem em um processo acelerado e irreversível de degradação. Em muitos estudos publicados este processo de degradação foi descrito por diversos termos, tais como: uma "transição inexorável para uma vegetação arbustiva ou campestre" (COCHRANE et al., 1999), "dieback da Floresta Amazônica" (COX et al., 2004), "savanização" (IPCC, 2007), "dieback" e "secundarização" (BARLOW e PERES, 2008), "vegetação savanóide" ou "dieback florestal" (NEPSTAD et al., 2008) e "transição floresta-savana ou transição arbustiva" (BALCH et al., 2011).

Os resultados permitem indicar que o termo mais exato para se referir as mudanças atuais na vegetação causados por incêndios florestais no "Arco de Fogo" de Roraima deva ser "secundarização", descrito por Barlow e Peres (2008). O processo de secundarização leva as florestas nativas, sujeitas à degradação sucessiva, a assemelharem-se às áreas de sucessão secundárias em todos os aspectos ecológicos.

Dada a alta frequência de queimadas e incêndios na região amazônica nos últimos anos (BARBOSA et al., 2004;. ARAGÃO et al., 2009; XAUD e

SANTOS, 2010; SHIMABUKURO et al., 2011), a crescente fragmentação da paisagem por desflorestamento (TERRACLAS, 2009; PRODES-INPE, 2012), o aumento de intensidade nos períodos de estiagem em anos de El Niño ou de oscilação da temperatura do Atlântico Norte (MARENGO et al., 2005; ARAGÃO et al., 2007); assumindo que a população humana na Amazônia vai continuar a aumentar sem mudanças tecnológicas majoritárias no meio rural; considerando as previsões de mudanças climáticas para a Amazônia (IPCC, 2007), a tendência é de que os incêndios aumentem em quantidade e em severidade, principalmente em cada novo evento de seca pronunciada (NEPSTAD et al., 1999, 2008; MARENGO et al., 2005; SILVESTRINI et al., 2011).

Diferentemente de outros ecossistemas, onde o manejo do fogo pode proteger a vegetação de incêndios mais intensos através da redução periódica do material combustível de forma controlada, na Amazônia a entrada do fogo na floresta depaupera a estrutura florestal que é mantenedora do microclima úmido que se forma sobre o dossel, tornando-a mais susceptível a futuros incêndios (COCHRANE e SCHULZE, 1999, NEPSTAD et al., 1999).

Ainda que não se desmate mais nenhuma área nova de remanescente florestal na Amazônia, os grandes incêndios em anos de seca pronunciadas continuarão a acontecer, caso as unidades de produção agropecuária (familiares ou empresariais) não minimizem o uso ou retirem o elemento fogo de sua matriz de manejo (XAUD, 1998), ou até mesmo, não promovam a introdução de elementos de aceiro convencional, aceiros verdes ou aceiros negros para a diminuição da velocidade de propagação de incêndios florestais (XAUD, 2006).

Infelizmente, isto indica que o processo de secundarização de grandes áreas na Amazônia já tem instalados todos os fatores para continuar a degradação de, cada vez maiores, áreas de remanescentes florestais na região. Através de diferentes observações, enfoques e metodologias, diversos autores congruem para a conclusão de que, queimadas e incêndios florestais na região

amazônica tendem a aumentar (XAUD, 1998; BARBOSA e FEARNSIDE, 1999; COCHRANE e SHULZE, 1999; NEPSTAD et al., 1999; COCHRANE, 2000; ALENCAR et al., 2006; VASCONCELOS e BROWN, 2007; ARAGÃO et al., 2007; 2008; 2009; BARLOW e PERES, 2008; SILVESTRINI et al., 2011).

5 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À DETECÇÃO DE ÁREAS QUEIMADAS EM FLORESTAS TROPICAIS

5.1. Experimento I: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando imagens MOD-09 e MOD-13 (sensor MODIS) no período de 2000 a 2005.

O objetivo do **Experimento I** consistiu em avaliar a potencialidade das imagens MOD-09 e MOD-13 para a detecção de áreas queimadas em florestas na região de estudo em Roraima.

5.1.1. Metodologia

Seleção de Imagens: Todos os mosaicos MOD-13 (16 dias) disponíveis dentro do período seco de interesse (jan-abril) foram gravados da página de distribuição de dados MODIS (EOS, 2008), totalizando 45 mosaicos de 2000 a 2005. Utilizando-se o software ENVI (Environment for Visualizing Images), que permite a abertura das imagens no formato original (HDF - Hierarchical Datafile Format, 16 bits), foi realizada a seleção de datas com a menor cobertura de nuvens e melhor qualidade quanto à geometria e à ocorrência de ruídos. Este procedimento foi baseado na análise visual das 45 imagens. Para os anos em que fossem verificados incêndios, seriam priorizadas imagens para o mês de abril, visando a detecção de cicatrizes ao final do período de incêndios. Como dados auxiliares foram consultados dados de ocorrência mensal de focos de calor nos meses de seleção das imagens. Assim, foram selecionadas imagens MOD-13 em seis datas, uma para cada período seco de cada ano: 049 (2000), 017 (2001), 001 (2002), 097 (2003), 017 (2004) e 049 (2005).

Já para as imagens diárias MOD-09, com uma quantidade muito maior a ser vistoriada (120 imagens por ano, de janeiro a abril, à exceção do primeiro ano com apenas 65 imagens), utilizou-se outra forma de seleção das melhores datas do MOD-09. A vistoria foi realizada em página da Internet a partir de

“quicklooks” disponíveis na documentação de dados e metadados do MODIS (NASA, 2008), dos “golden tiles”, áreas especiais de cobertura do MODIS com maior ênfase para pesquisas. Buscou-se a seleção da melhor imagem quanto à baixa incidência de nuvens e à boa qualidade geométrica, para o período seco de cada ano, de 001 a 120 dias no calendário Juliano. As datas diárias selecionadas para o produto MOD-09 foram: 057 (2000), 029 (2001), 002 (2002), 099 (2003), 026 (2004) e 049 (2005).

Pré-processamento: Após a aquisição (“download”), visualização (ENVI) e confirmação das datas a serem utilizadas no trabalho, foi realizado o pré-processamento de todas as imagens utilizando-se os programas MRT (Modis Reprojection Tool) e o ConvGeotiff (ARAI, 2003). O MRT permitiu que as imagens originalmente em formato HDF fossem convertidas para o formato GEOTIFF e associadas a uma projeção cartográfica (Geográfica) e a um Datum (WGS84). O programa ConvGeotiff (ARAI, 2003) permitiu que a imagem fosse convertida de 16 para 8 bits. Segundo ARAI et al. (2005) a conversão não afeta o desempenho de processamentos digitais posteriores, havendo uma alta correlação entre o dado original de 16 bits (com quantização de 12 bits, 4096 níveis digitais) e a imagem de 8 bits obtida (256 nd.). Sequencialmente foi criado um banco de dados georreferenciados no SPRING (INPE-DPI, 2007) para onde as imagens em formato GEOTIFF foram importadas.

Processamento Digital das Imagens (PDI): O processamento foi realizado no SPRING, versão 4.3.3 (INPE-DPI, 2007) tendo sido aplicados: a) aumento linear de contraste com manipulação do histograma; b) geração de NDVI a partir de imagens diárias do MOD-09; c) geração de imagens de razão simples entre bandas (NIR/R); d) classificação supervisionada MAXVER (95%); e e) pós-classificação. Para o treinamento de amostras na classificação supervisionada, utilizou-se uma máscara de polígonos retangulares, repetida para cada grupo de imagens. Para a coleta de dados NDVI nas diferentes imagens e datas, também foi utilizada a mesma máscara de polígonos. As

classes de mapeamento foram: Floresta tipo 1 – Não Queimadas em 2003 (mas queimadas em 1998); Savanas; Florestas tipo 2- Não Queimadas em 2003 ou 1998 e Florestas queimadas em 2003. A diferenciação em relação às classes de florestas tipo 1 e 2, foi baseada nas distâncias diferenciadas destas aos setores mais antropizados e o histórico de incêndios de 1998 (SHIMABUKURO et al., 1999).

5.1.2. Resultados (Experimento I)

Na seleção visual de imagens do sensor MODIS através das ferramentas de consulta na Internet (EOS, 2008), verifica-se que em alguns momentos são apresentados os índices de vegetação, produtos dos mosaicos de 16 dias, mostrando uma incidência desprezível de nuvens. Isto pode gerar uma falsa impressão, de que a imagem está completamente limpa de nuvens e totalmente corrigida em relação aos índices de vegetação apresentados, o que não é absolutamente correto. Na Figura 5.1a é mostrada uma imagem utilizada na seleção. A Figura 5.1b realça a existência de nuvens na mesma data.

A seleção de imagens do produto MOD-09, utilizando “quicklooks” disponíveis para o “Tile” de interesse h11v08 (NASA, 2008) foi mais informativa em relação à incidência de nuvens para cada data. A seleção se baseou não apenas na imagem RGB disponível para o MOD-09 (Figura 5.2a), mas também no produto MODIS que diz respeito à emissividade e temperatura (MOD-11). Foi observada correlação entre áreas com incidência de nuvens no MOD-09 e áreas na categoria “ausência de dados” (Figura 5.2b) no MOD-11. A observação conjunta destes produtos facilitou a seleção de datas para obtenção das imagens MOD-09. Era esperado que nos mosaicos de 16 dias, a reamostragem de pixels requerida para a diminuição de pixels com presença de nuvens nos índices de vegetação NDVI e EVI não causasse discrepância entre a resposta de pixels vizinhos, uma vez que existe o efeito benéfico desta técnica de processamento digital de imagens (PDI) para a diminuição das diferenças de iluminação e visada (RUDORFF et al., 2007). Porém, devido

provavelmente ao algoritmo para a detecção de nuvens na geração dos produtos MOD-13, observou-se que mesmo para as imagens NDVI e EVI existiram fortes variações entre a resposta espectral de pixels vizinhos para alvos homogêneos (Figura 5.3).

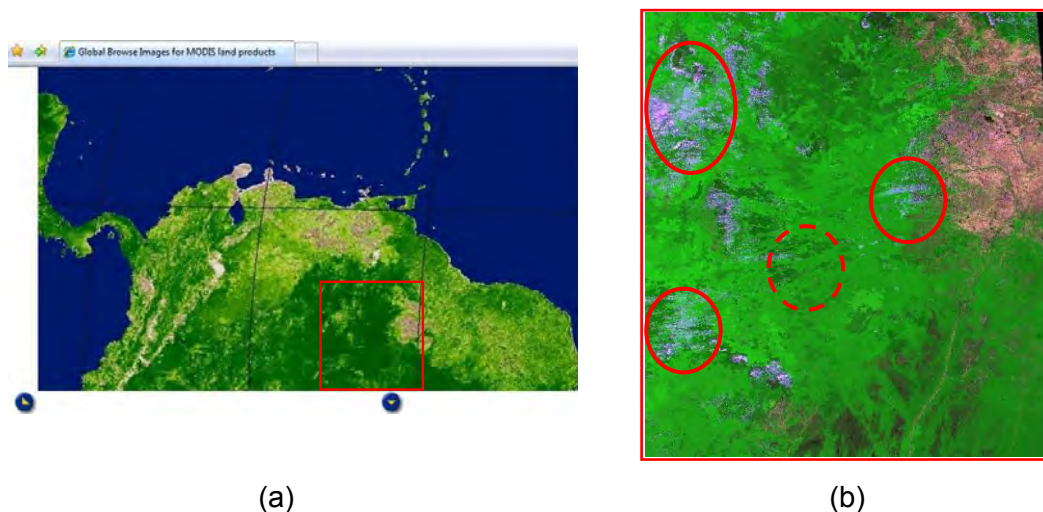


Figura 5.1 – (a) Imagem sem nuvens do NDVI-MOD-13; (b) ampliação em composição RGB das bandas Vermelha, Infravermelho Próximo-NIR, e Azul do MOD-13, com círculos mostrando nuvens e outros ruídos.

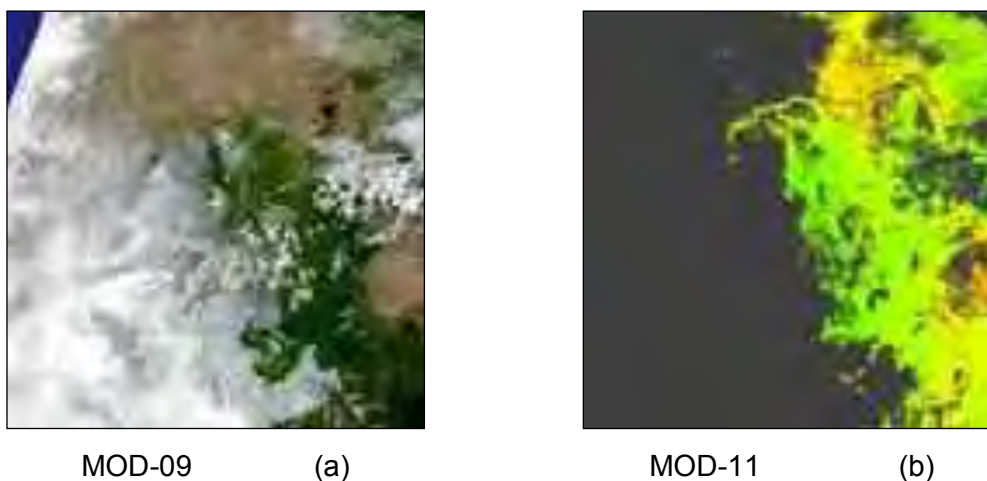


Figura 5.2 – (a) Composição colorida do produto MOD-09, mostrando baixa ocorrência de nuvens na região de interesse, canto inferior direito (Sudeste); (b) a parte cinza da imagem MOD-11 indica áreas não computadas na estimativa de temperatura, indicando áreas com nuvens ou sem imageamento.

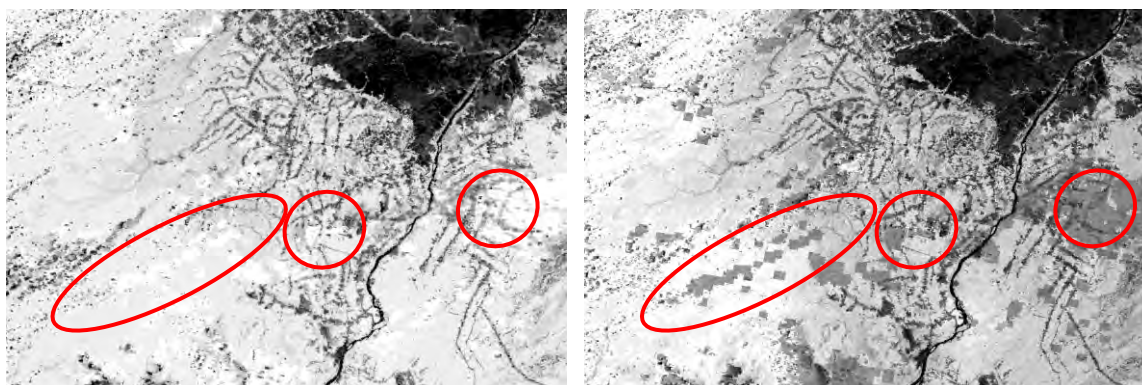


Figura 5.3 – Exemplo de mosaicos de 16 dias NDVI e EVI (MOD-13) que apresentaram ruídos, provavelmente devido à presença de nuvens nas imagens originais; 06.mar.2002.

Na área destacadas na Figura 5.4 a diferença entre as áreas ruidosas e as áreas normais da imagem chegaram a 20 níveis digitais, o que é demasiado para uma escala digital considerando 256 níveis digitais (8 bits) e prejudicaria, ao menos localmente, as classificações automáticas derivadas.



Figura 5.4 – Imagem EVI com realce de área com ruídos provocados pelo processo de formação dos mosaicos multitemporais (16 dias) do MOD-13; as áreas a Leste e a Norte, são formações savânicas, as áreas mais claras são florestas; a área de ruído poderia facilmente ser confundida com uma área afetada por incêndios florestais.

Ao se testar o desempenho da classificação supervisionada MAXVER, com limiar de 95% de probabilidade sobre as bandas ou grupos de bandas nas imagens do período de estiagem de 2003, foram obtidos resultados positivos constantes na Tabela 5.1 e Figura 5.5. Deve ser ressaltado que este foi o único período onde a análise das imagens MODIS de 2000 a 2005 permitiu a identificação de grandes cicatrizes de incêndio. Isto coincide com outros levantamentos realizados (BARBOSA et al., 2004).

De uma forma geral, as classificações obtidas a partir de produtos do MOD-09, exceto a razão simples de bandas (NIR e R), alcançaram o melhor desempenho geral (acima de 90%). Os desempenhos obtidos das classificações a partir de produtos do MOD-13 (EVI, NDVI e bandas R, NIR e MIR) obtiveram desempenhos um pouco mais baixos, mas mantiveram-se acima de 88%, indicando que podem ser utilizados no mapeamento de áreas queimadas (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Desempenho da classificação supervisionada (MAXVER) para diferentes combinações de bandas, na detecção de cicatrizes de fogo na região de Mucajaí-RR-Brasil, em ordem decrescente de desempenho.

| Bandas utilizadas na classificação supervisionada MAXVER | Desempenho geral | Confusão média | Abstenção média |
|---|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| R e NIR - MOD-09 | 92.40 % | 5.11 % | 2.49 % |
| NDVI-MOD-09 | 91.18 % | 6.96 % | 1.86 % |
| R, NIR e MIR - MOD-13 | 89.19 % | 7.42 % | 3.39 % |
| EVI-MOD-13 | 88.55 % | 10.63 % | 0.82 % |
| NDVI-MOD-13 | 88.13 % | 11.12 % | 0.75 % |
| Razão de bandas MOD-09 (NIR/R) | 65.51 % | 34.00 % | 0.49 % |

Deve ser ressaltada a dificuldade e a demora em se selecionar produtos diários livre de nuvens do MOD-09, mesmo para um determinado período do ano (4 meses), como neste trabalho. Uma vez que os “tiles” são muito grandes (10° x

10°), e, a informação de nuvens quando existente nos mecanismos de pesquisa para “download” de imagens geralmente é disponibilizada para “tile” todo e não para uma área específica de interesse.

Os resultados indicam que o melhor caminho de utilização de imagens MODIS de forma sistemática para o levantamento de áreas afetadas por incêndios em região de florestas em Roraima deve incluir os produtos mosaico de 16 dias MOD-13 (EVI ou NDVI), uma vez que durante o ano são produzidos em média apenas 23 mosaicos e para o período de estiagem na área estudada são no máximo 8 mosaicos. Comparativamente ao produto MOD-09, onde a seleção de imagens recai em cada ano em 90 imagens no período da estiagem (janeiro a março) e mais 30 imagens (abril) da saída do período seco e entrada no período chuvoso. A seleção inicial de imagens nos produtos MOD-13 são menos custosas de serem executadas.

Porém, para casos em que a resposta espectral da vegetação queimada se modifique rapidamente, diminuindo as diferenças entre as áreas queimadas e não queimadas, ressalta-se que os ruídos originados do processo de geração dos mosaicos podem ser prejudiciais à obtenção de bons resultados por classificação automática de imagens.

Quanto aos resultados derivados das análises das imagens de média resolução (250m) NDVI e EVI do MOD-13 e NDVI-MOD-09 gerada a partir das bandas do produto MOD-09, dentro do período de observação de 2000 a 2005, observa-se o que o comportamento para áreas de florestas atingidas pelos incêndios volta a se normalizar quase a partir do ano seguinte.

Do ponto de vista de detecção de anomalias na vegetação causadas por incêndios, isto indica que a resposta no espectro óptico observada nesta escala, se recupera rapidamente devido à dinâmica de regeneração, o conteúdo em termos de área foliar e quantidade de clorofila da vegetação,

importantes para normalizar a resposta espectral e retornar a um patamar de saturação.

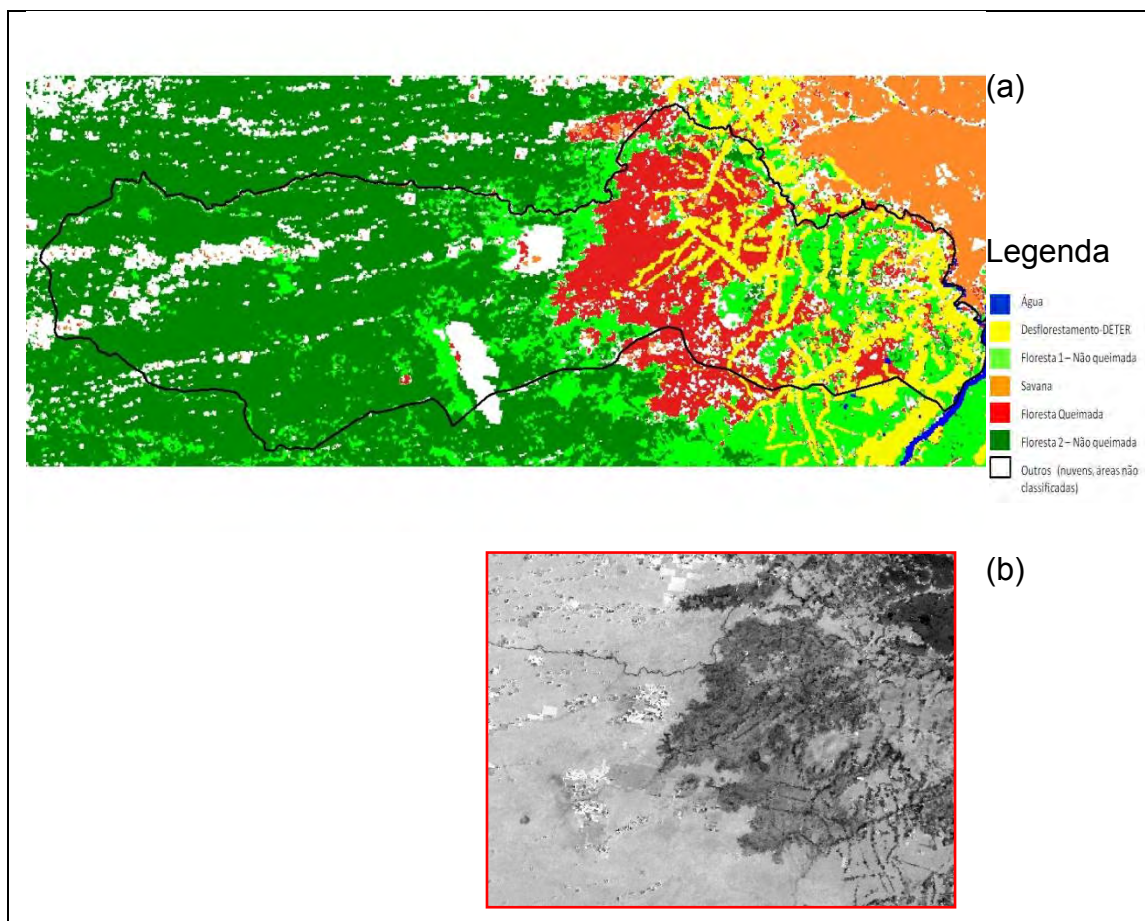


Figura 5.5 – (a) Imagem classificada a partir dos produtos MOD-09 (mar.2003) revelando áreas florestais queimadas em vermelho; no detalhe em (b) uma imagem EVI (MOD-13) para o mesmo período, evidenciando a mancha de floresta afetada.

O EVI apresentou o comportamento esperado com valores reduzidos em relação ao NDVI, uma vez que foi desenvolvido para não saturar tão rapidamente quanto o segundo, quando da análise de tipologias florestais estruturalmente mais complexas. O NDVI calculado diretamente do MOD-09 também apresentou valores conforme o esperado com uma sequência com valores mais baixos que o NDVI do MOD-13. Este último, devido ao algoritmo de obtenção dos mosaicos 16 dias, amostra sempre o pixel de maior valor de

NDVI para compor os mosaicos, favorecendo a um acréscimo de todos os valores de NDVI na imagem-mosaico final.

Dos seis produtos de imagens do sensor MODIS avaliados neste experimento, cinco indicaram que podem ser utilizadas para detecção de cicatrizes de fogo (Tabela 5.1). As respostas espectrais indicadas pela variação temporal dos NDVI e EVI (Figura 5.6) consistem num indicativo de como estas cicatrizes poderão ser visualizadas e detectadas.

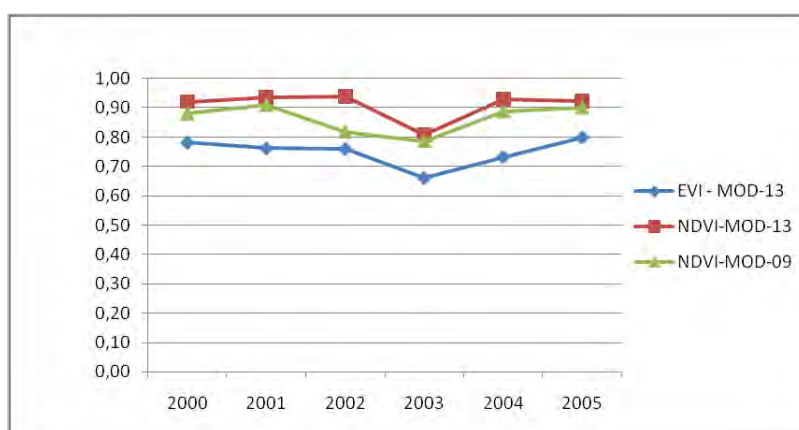


Figura 5.6 – Comportamento de valores de NDVI e EVI do MOD-13 e NDVI derivado do MOD-09 para região de floresta queimada em 2003, em Roraima-Brasil.

Tais resultados realçam a importância da utilização de sensores de alta resolução temporal e de média resolução espacial para o monitoramento da vegetação na Amazônia, onde as altas temperaturas e umidade fazem com que os processos fisiológicos de regeneração e crescimento sejam extremamente rápidos (LARCHER, 1986), podendo facilmente mascarar cicatrizes de queimadas para alguns sensores ópticos, decorrido um ano entre o incêndio e o imageamento.

Frente ao satisfatório desempenho dos mosaicos MOD-13 na detecção de áreas florestais afetadas por incêndios e à maior dificuldade na obtenção de imagens diárias do MOD-09 livre de nuvens, recomenda-se que continuem ser

desenvolvidas metodologias de processamento e classificação tendo como base imagens do MOD-13. Neste sentido, imagens do MOD-13 e produtos derivados do mesmo como as séries temporais filtradas (FREITAS et al., 2011), configuram-se em dados de sensoriamento remoto com potencial positivo para serem testados em metodologias integradas multisensor para o levantamento de áreas florestais afetadas por incêndios na área de estudo.

A título de comparação foi verificado que o produto MCD45A1 (ROY et al., 2005) do MODIS (versão disponível online, fev. 2013) não detectou as áreas atingidas pelo incêndio ocorrido em 2003 na região do Apiaú, em Roraima. Cardozo et al. (2011) executaram análise detalhada do MCD45A1, comparando-o a produtos como o MOD-09 e imagens TM, concluindo por erro de omissão da ordem de 96% na detecção de áreas queimadas em uma região em Rondônia.

Devido às evidências de total inadequação deste produto (até o momento) para o levantamento de áreas queimadas na região de estudo, não houve necessidade de detalhamento da comparação aqui realizada, uma vez que o MCD45A1 revelou praticamente apenas nuvens sobre as áreas florestais queimadas em fevereiro e março de 2003 em Roraima (Figura 5.7).

Os resultados das classificações aqui obtidas (Tabela 5.1; Figura 5.6) e o comportamento dos focos de calor incidentes sobre Roraima ao longo dos meses mais secos de 2003 (Figura 5.8), indicam que o MCD45A1 não está adequadamente calibrado para detectar automaticamente áreas queimadas na região de estudo.

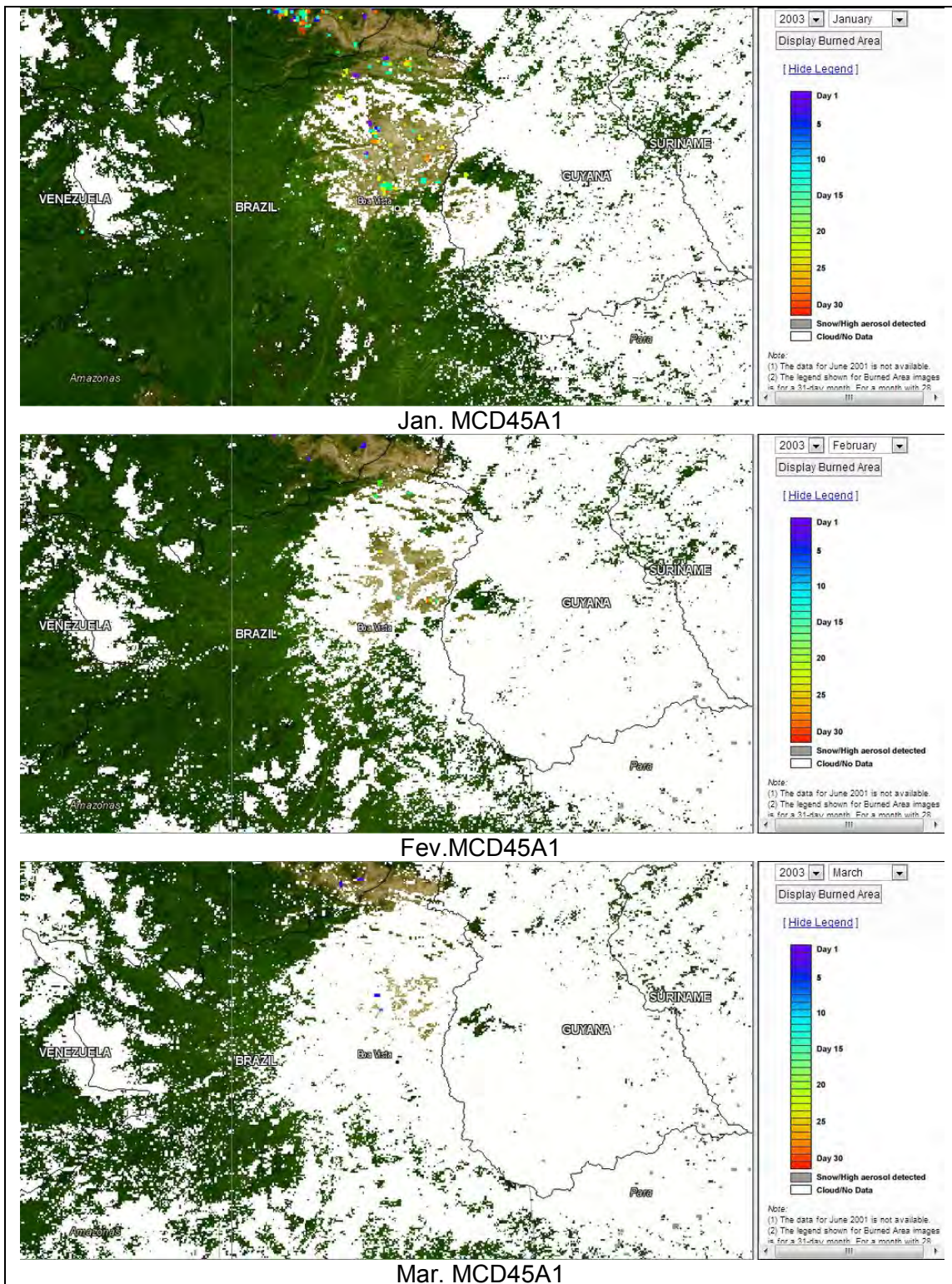


Figura 5.7 – Estimativas de áreas queimadas pelo MCD45A1 para os meses de incidência de queimadas e incêndios em Roraima, ano 2003. FAO-GFIMS: <http://www.fao.org/nr/gfims/burned-area/en/>, WebFireMapper.

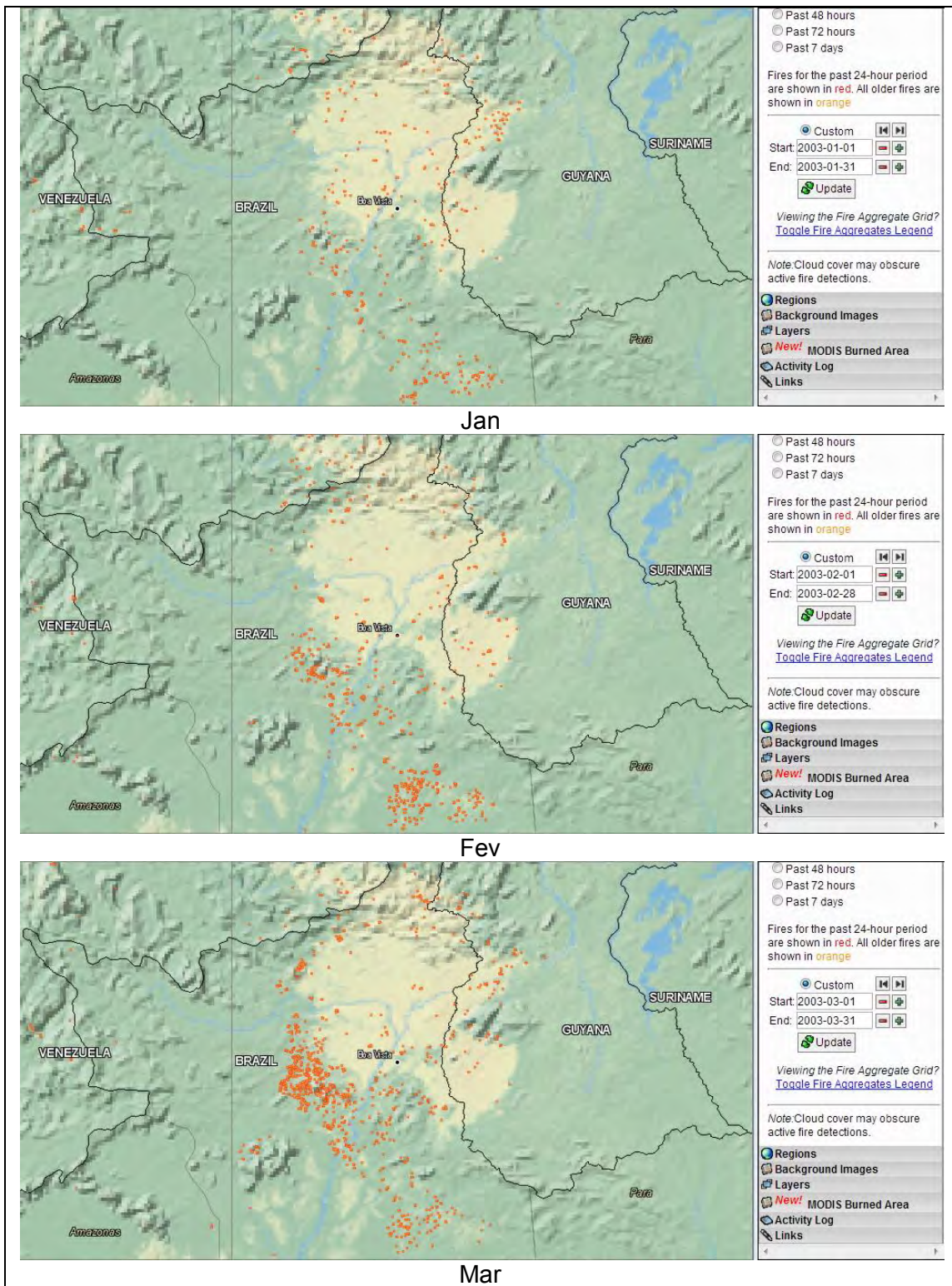


Figura 5.8 – Focos de calor (pontos laranja) detectados pelo MODIS-AQUA, período de Janeiro a Março de 2003, Roraima. FAO-GFIMS: <http://www.fao.org/nr/gfims/burned-area/en/>, WebFireMapper.

5.2. Experimento II: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando imagens ALOS/PALSAR FBS (HH)

O objetivo do **Experimento II** consistiu em avaliar a potencialidade das imagens ALOS/PALSAR FBS (HH) para a detecção de áreas queimadas em florestas na região de estudo em Roraima.

5.2.1. Metodologia

Seleção de Imagens: As imagens ALOS/PALSAR foram escolhidas de acordo com o último período de incêndio em Roraima (fev-mar.2007). Devido às restrições relativas à periodicidade de cobertura, foram definidas as datas de jan.2008, jan.2009 e jan.2010 em modo de aquisição FBS (polarização HH) (Figura 5.9). A data da imagem PALSAR mais próxima e posterior ao evento de incêndio ocorrido em março de 2007, foi a imagem de janeiro de 2008.

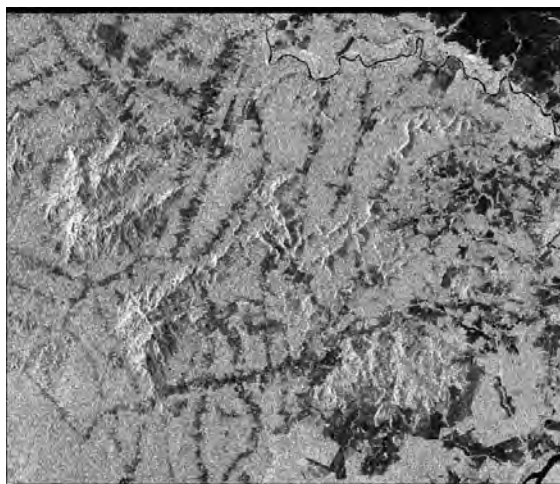


Figura 5.9 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008.

Pré-processamentos: As imagens ALOS-PALSAR (HH) foram ortorretificadas no programa ASF-MapReady (ALASKA SATELLITE FACILITY, 2008), utilizando modelo de reamostragem bicúbico e como Modelo Digital de Elevação (DEM) um mosaico de imagens altimétricas do Topodata (Valeriano, 2008), em escala de 1 radiano (aproximadamente 30 m no Equador). O DEM foi reprojeta para projeção UTM, datum WGS-84, utilizando reamostragem

por convolução cúbica, com célula de resolução de 30 x 30m, para a compatibilização ideal com as imagens Landsat (GloVis). Das imagens complexas FBS (HH) com nível de processamento L1.1, se obteve a polarização HH em amplitude e sigma zero devidamente ortoretificadas no ASF-MapReady. Na Tabela 5.2 encontram-se descritas todas as características das imagens ALOS/PALSAR utilizadas.

Tabela 5.2 – Descrição das imagens ALOS/PALSAR utilizadas

| <i>Parâmetro</i> | <i>Datas</i> |
|---|---|
| Frequência GHz (Banda) | 1,27 (Banda L) |
| Comprimento de onda | 23,6 cm |
| Modo de aquisição | FBS |
| Polarização | HH |
| Nível de processamento | L1.1 |
| Tipo de dado | Complexo, em amplitude |
| Resolução espacial (<i>Ground range x</i> <i>azimute.</i>) | 7,5 x 3,2 m |
| Faixa imageada | ~70 km |
| Órbita de aquisição | Ascendente |
| Datas de aquisição | 15.jan.2008 17.jan.2009 20.jan.2010 |
| Ângulo de incidência | 38,8° |

Durante o pré-processamento foram realizadas calibrações quanto à variação do retroespalhamento em relação ao ângulo de incidência ao longo da imagem e em relação à variação do ângulo de incidência em relação ao modelo de elevação. Não foram realizadas interpolações para compensar a ocorrência de *layover* e sombras, causadas pela interação ângulo de incidência, sinal SAR e o relevo, uma vez que foram realizados testes primários e verificou-se que tal procedimento alterava os valores de retroespalhamento da imagem como um todo piorando a qualidade da mesma, uma vez que não podia ser realizado em conjunto com a correção para o ângulo de incidência. Todas as imagens em amplitude (2008, 2009 e 2010) foram salvas em geotiff e a partir das mesmas

foram geradas imagens intensidade (ou potência) no ENVI 4.7, elevando-se ao quadrado cada uma das imagens amplitudes.

Após esta etapa foi feita uma verificação visual no software ENVI 4.7 ao longo de toda a imagem, através de visualização acoplada à imagem TM ortorretificada (GloVis) de março de 2007, constatando adequada geometria. As imagens HH intensidade geradas foram submetidas à análise visual para verificação de necessidade de correção do padrão de antena e determinação do Número Equivalentes de Looks (NEL) para verificar a necessidade de correção do ruído “speckle” por técnicas de filtragem. Verificou-se que, uma vez que na ortorretificação no ASFMapReady, as imagens foram ajustadas e amostradas para 30 m de resolução, o efeito de reamostragem “multilook” fez com que não mais houvesse necessidade de correção do ruído “speckle”.

As imagens-amplitude de cada data foram submetidas à geração de imagens textura (HARALICK, 1979) no ENVI. Foram obtidas cinco imagens texturas de ocorrência (média, variância, entropia, assimetria e “amplitude de dados”) e oito imagens texturas de coocorrência (média, variância, homogeneidade, dissimilaridade, entropia, contraste, correlação e segundo momento) (HARALICK et al., 1973; ANYS et al., 1994). Vale ressaltar que os filtros aplicados foram de 5x5 pixels e os níveis digitais de quantização foram de 64, posteriormente reamostrados para 0-255 níveis digitais.

As imagens texturas foram muito utilizadas na classificação de imagens de radar (e.g RENNÓ et al., 1998; KUPLICH e CURRAN, 2003), principalmente antes da utilização de imagens polarimétricas que permitem outras alternativas de processamento para extração de informações úteis das imagens SAR, que incluem as 4 polarizações e a informação de fase. Porém, especialmente quando só se tem disponível uma polarização de imagens SAR (HH) é recomendável que sejam geradas imagens texturas visando aumentar a qualidade das classificações obtidas através da escolha de texturas que

possibilitem o aumento da separabilidade das classes de interesse (DURIEX et al., 2007; ZUO et al., 2010; RAKWATIN et al., 2012).

Processamento: As imagens ALOS/PALSAR (2008, 2009 e 2010) em amplitude e intensidade, bem como as imagens-textura (derivadas da amplitude) foram incorporadas a um banco de dados em ambiente de classificação orientada a objetos (OBIA) do Definiens (8.0). Para auxiliar na visualização de áreas impactadas pelo incêndio de 2007 e na escolha de amostras para a classificação, as imagens TM (bandas 3, 4, 5) de 1986, 1998, 2003 e 2007 foram também inserida.

Para a produção de amostras independentes que pudessem servir de orientação para as classificações, as imagens TM e a imagem amplitude e intensidade de 2008 foram também inseridas no ENVI 4.7. Foram coletadas regiões de interesse (ROIs) com base na interpretação multitemporal das imagens TM e nas informações do trabalho de campo, que indicaram 5 classes de cobertura florestal encontradas nestas áreas atingidas por incêndios em Roraima (Figura 5.10).

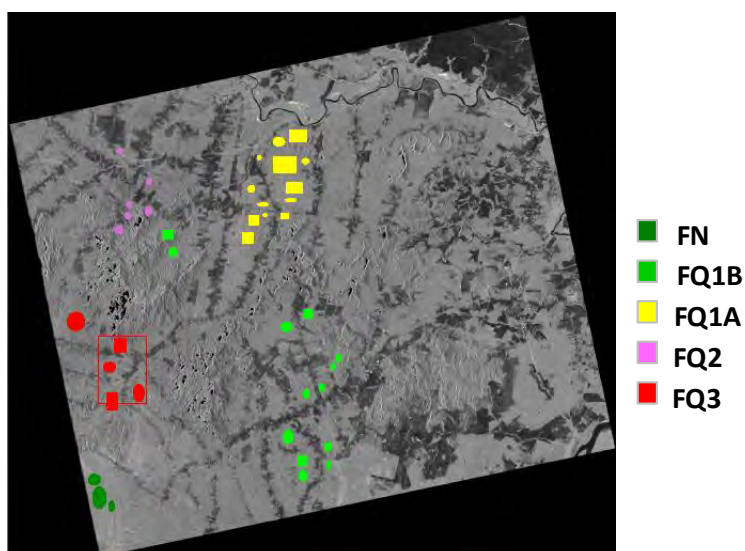


Figura 5.10 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008 e a amostragem de áreas de referência de acordo com a recorrência de incêndios florestais

No entendimento de que o Experimento II é individualizado, mas não isolado, nesta etapa, já se observaram também as amostras a serem usadas nas análises do Experimento III, principalmente da série temporal do MODIS, cuja dimensão de amostras é maior, uma vez que a resolução do TM e do PALSAR é de 30 x 30 m e a do MODIS, de 250m.

Os principais procedimentos realizados no Definiens 8.0 foram:

Criação de classes de interesse: A categorização temática foi derivada da interpretação visual preliminar e no conhecimento advindo dos trabalhos de campo. As classes de interesse foram assim definidas: (i) Florestas não queimadas (FN); (ii) Florestas queimadas (FQ1B, FQ1A, FQ2, FQ3) e (iii) Outras (água; sombra de relevo; áreas antropizadas; vegetação não florestal).

Segmentação (criação de objetos): Existem diversos algoritmos para a realização da segmentação no Definiens, tendo sido utilizado o algoritmo baseado em multiresolução, o qual é considerado o processamento mais demorado, mas que produz uma segmentação mais adequada (Definiens, 2011). A segmentação multiresolução forma polígonos de tamanhos irregulares, mas de conteúdo homogêneo, onde cada um deles passa a ser reconhecido e identificado como um objeto único que é utilizado no armazenamento e na extração de atributos das imagens. No processo de segmentação multiresolução é avaliada a similaridade entre objetos vizinhos a serem criados por crescimento de regiões. A segmentação foi ponderada com um peso médio de (50% ou 0,5) para a informação de forma, que equivale a 50% ou 0,5 para o peso complementar de cor, e, um peso médio (50% e 0,5) para o parâmetro de compacidade. Foram testados diferentes fatores de escala (5, 10, 20, 50 e 100, 200, 500, 1000 e 4000), que também alteram a forma e a média de tamanho dos objetos segmentados. A escolha dos níveis de segmentação a serem utilizados são de caráter empírico e de acordo com as finalidades de cada projeto, como a maioria dos processos de segmentação (PINHO, 2005).

Seleção de amostras: Na sequência foi realizada a escolha de amostras de treinamento (Figura 5.11), selecionando-se as amostras a partir dos objetos derivados da operação de segmentação. A partir destas amostras são criadas as regras para a realização da classificação das imagens. Esta seleção pode ser refinada através da substituição parcial ou total das amostras escolhidas. Para tanto pode-se utilizar da visualização das amostras e de seus histogramas, podendo-se verificar antes da classificação, como está a separabilidade entre as amostras de diferentes classes de interesse.

Otimização do espaço de atributos (Feature Space Optimization) e classificação: Nesta etapa foram avaliadas a composição de atributos a serem utilizados para descrever o universo de dados a serem selecionados para obter a desejada separabilidade das classes de interesse. O cuidado na escolha dos atributos visa à produção de um mapa de uso do solo e cobertura vegetal com a menor confusão possível entre suas classes. A otimização do espaço de atributos do Definiens funciona de forma similar à Análise de Divergência (TD) utilizada por Rakwatin et al. (2012) para escolha de atributos texturais para a classificação de imagens ALOS/PALSAR (HH e HV) no mapeamento de florestas tropicais em Sumatra, na Indonésia. O procedimento de otimização dos atributos a serem utilizados em classificação de imagens orientadas a objeto foi testado com sucesso para o mapeamento de classes de cobertura vegetal em uma área periurbana por Xaud et al. (2011). O método mostrou ser rápido, eficiente, robusto e flexível, ao executar automaticamente a normalização dos dados qualquer que seja a quantização das imagens de entrada e por permitir: a classificação conjunta de imagens ópticas e de radar; apresentação de indicadores (separabilidade total e por classes) que ajudam na decisão prévia sobre os atributos a serem utilizados; a escolha do número desejado de atributos a serem utilizados; que as imagens sejam mantidas inalteradas no banco de dados, havendo economia do espaço de armazenamento; e por não haver limitação para o número de atributos a serem testados conjuntamente.

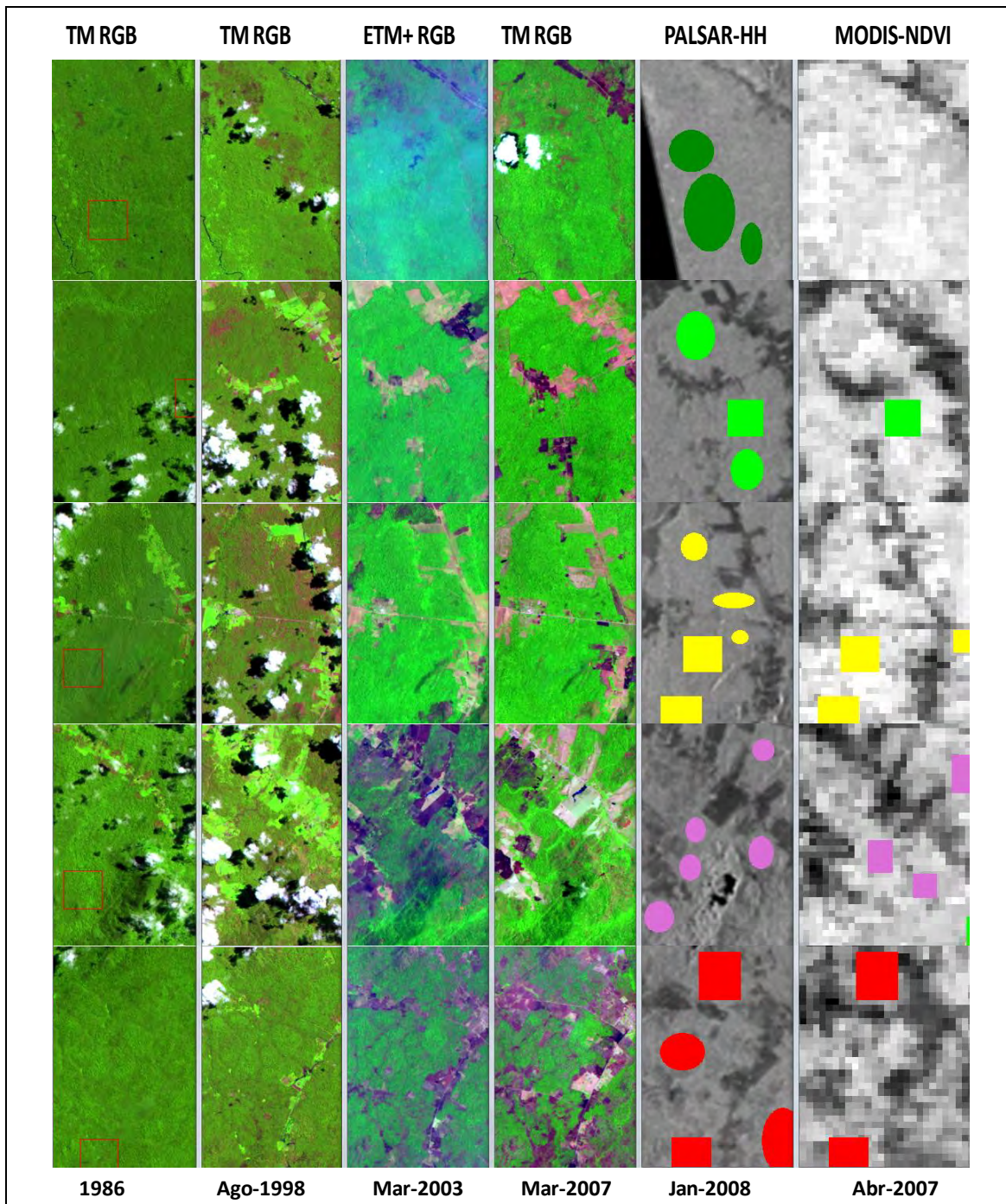


Figura 5.11 – Imagem ALOS/PALSAR FBS (HH) de jan. 2008 e a amostragem de áreas de referência para validação das classificações. Nem todas as amostras utilizadas para o PALSAR foram usadas no MODIS, devido à escala.

Paralelo à ferramenta de otimização do espaço de atributos (Feature Space Optimization - FSO) funciona um classificador baseado no algoritmo do vizinho mais próximo, utilizado como critério para que o espaço de atributos de n -dimensões seja subdividido, baseado nas amostras de treinamento selecionadas anteriormente (Definiens, 8.0; 2011).

Para efeito de comparação foram realizados diversos testes de arranjo do espaço de atributos. Desde os testes mais simples (univariados), onde as imagens SAR foram tratadas de forma isolada (e.g. uma data PALSAR - HH em amplitude) levando-se em consideração apenas o valor médio de nível de cinza de cada objeto, até arranjos mais complexos (bivariados e multivariados), onde foram avaliadas conjuntamente diversos atributos das imagens PALSAR básicas (amplitude, intensidade) e de todas as imagens texturas, totalizando 15 imagens por data, sendo 2 imagens básicas (amplitude e Intensidade) e 13 imagens texturas. Além das 15 imagens-atributos (2 básicas + 13 texturas) criadas fora do Definiens 8.0, usando o MapReady e o ENVI, foram criados no Definiens os atributos de desvio padrão de cada uma das 15 imagens, totalizando 30 atributos derivados do PALSAR para a data de 2008.

Validação: Escolhidos os atributos e realizada a classificação, as imagens temáticas passaram por uma validação qualitativa realizada visualmente com base na comparação com amostras referências (Figura 5.10). Como critério quantitativo foi utilizada a separabilidade obtida na seleção otimizada de atributos.

5.2.2. Resultados (Experimento II)

Segmentação: Foram testados valores para segmentação multiresolução (Definiens, 2011) utilizando-se somente as imagens PALSAR 2008 (Amplitude e Intensidade). Os limiares foram bem diferentes daqueles exigidos para segmentação de imagens TM. Houve necessidade de aumentar a importância da forma em relação à cor (nível digital) de 0,1 (10%) para 0,5 (50%). O fator

de escala inicial (mais detalhado) foi de 200, aumentando para 500, 1000 e 4000, no sentido de maior agrupamento de objetos. A opção que visualmente permitiu uma adequada separação de objetos, buscando-se detalhar alguma nuance de cicatriz de incêndios em floresta foi derivada da aplicação do fator de escala de 1000. Abaixo deste limiar de escala a segmentação ficou excessiva e acima, tornou-se insuficientemente detalhada. Nas Figuras 5.12 e 5.13 pode-se notar a diferença entre as segmentações em uma imagem TM e PALSAR de épocas próximas.

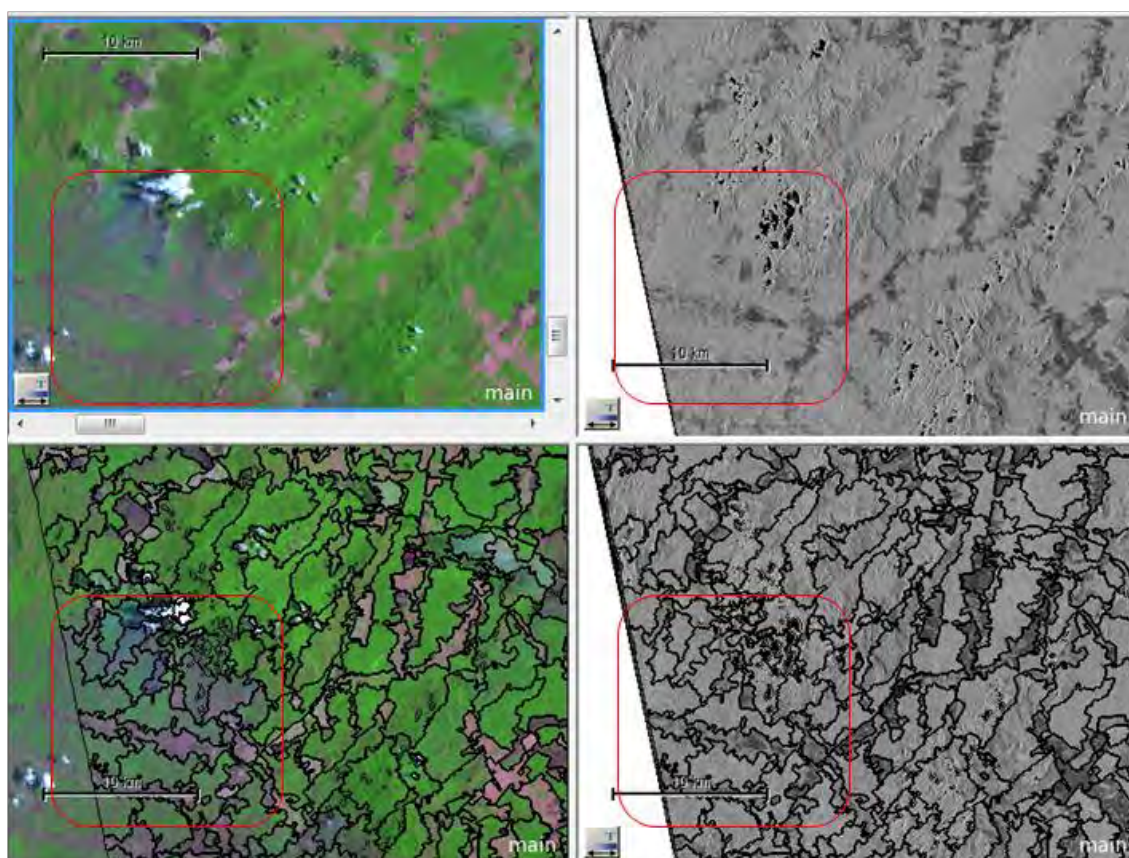


Figura 5.12 – Resultado de uma segmentação multiresolução realizada utilizando-se como base as 6 bandas (VIS e NIR) das imagens TM; o polígono em vermelho realça a área mais afetada nos incêndios de 2007, mais difícil de visualizar na imagem-amplitude ALOS/PALSAR HH (jan.2008).

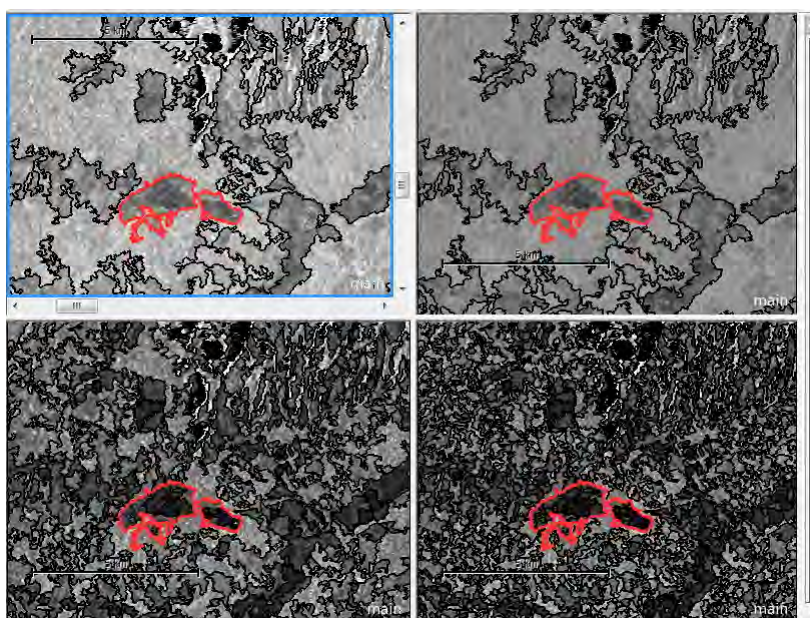


Figura 5.13 – Resultado de uma segmentação multiresolução utilizando-se somente a imagem-intensidade ALOS/PALSAR de jan.2008; o tamanho dos polígonos (objetos) foi determinado principalmente pelos diferentes fatores de escala empregados nas segmentações; imagem intensidade na esquerda, imagem amplitude na direita; o polígono realçado em vermelho denota as possibilidades de detalhamento dos objetos.

A segmentação escolhida para dar continuidade às classificações foi a baseada em TM, uma vez que a referência da acurácia seriam as imagens TM (Figura 5.14). Isto facilitou a identificação de áreas comuns nos dois grupos de imagens, TM e PALSAR. O conjunto de imagens PALSAR detalhadamente testado foi o do ano de 2008.

A partir dos dados derivados do PALSAR para 2008 foram utilizados critérios quantitativos para efetuar a seleção dos melhores atributos a serem usados na classificação multisensor e segundo um pressuposto básico de que as únicas classes de interesse seriam as classes advindas dos resultados do trabalho de campo: FN, FQ1B, FQ1A, FQ2, FQ3. Todas as outras classes de feições naturais (rios, lagos, etc) e de feições antrópicas (pasto, agricultura, sucessão

secundária, etc.) foram suprimidas nas avaliações finais, não sendo interesse deste trabalho.

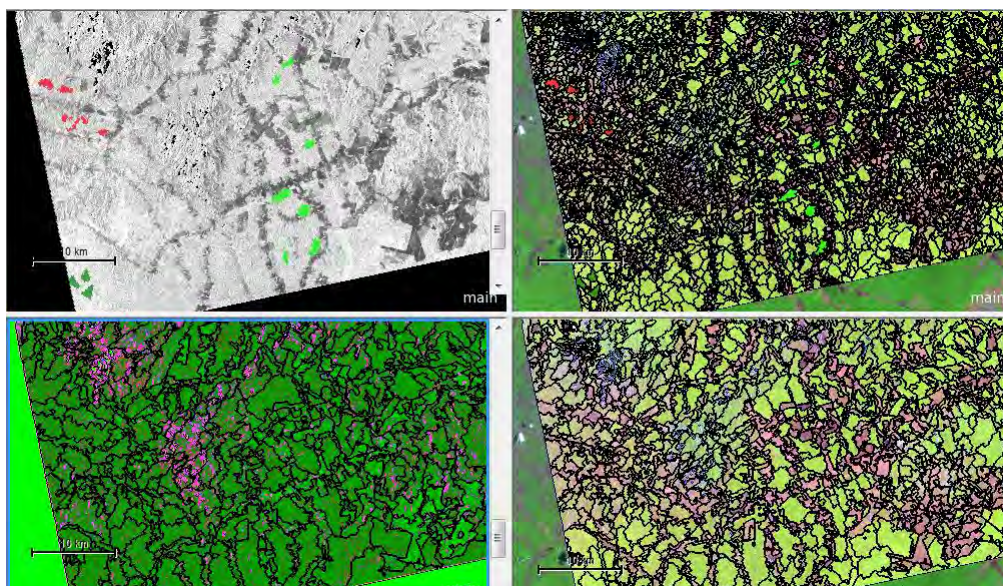


Figura 5.14 – A segmentação multiresolução aplicada, evidenciando (a) uma imagem PALSAR com as amostras (FN, FQ1B, FQ1A, FQ2 e FQ3); (b) uma imagem TM (RGB) + PALSAR com o nível de resolução mais detalhado; (c) nível de resolução médio; (d) e o nível menos detalhado.

Em relação à seleção de atributos para otimizar a classificação foram observados os seguintes critérios: valor da Separabilidade Global; ordem dos atributos no alcance desta separabilidade; n^o. ótimo de atributos para alcance da maior separabilidade possível (XAUD et al., 2009; 2011). Foi ainda acrescentada a informação relativa à sobreposição entre as classes avaliadas, duas a duas, como já utilizado em trabalhos que empregaram classificação orientada a objetos (PINHO, 2005). Quanto menor for a sobreposição entre histogramas de duas classes (Figura 5.15) no espaço de atributo espectral de cada imagem, melhor será a separabilidade (Figura 5.16) e, conseqüentemente, a classificação final.

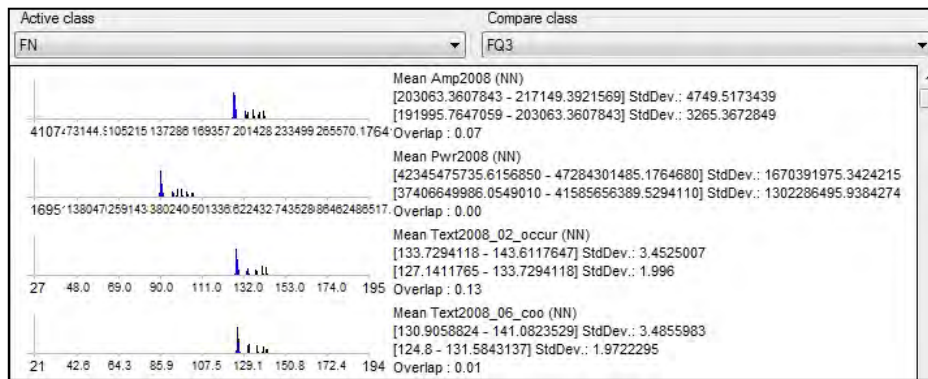


Figura 5.15 – Exemplo de observação da sobreposição (ou não) entre classes (e.g. FN x FQ3), duas a duas e para cada imagem-atributo; os histogramas da esquerda representam o comportamento da classe FN e o da direita o da classe FQ3.

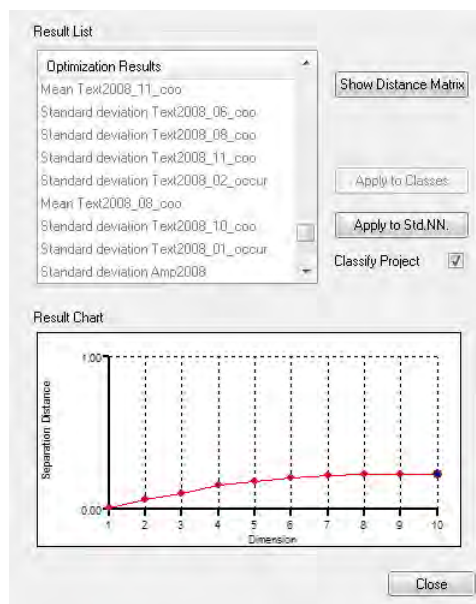


Figura 5.16 - Gráfico de saída no ambiente de otimização do espaço de atributos, demonstrando estabilização da separabilidade já a partir do 7º. Atributo.

De acordo com os critérios mencionados, no quadro síntese (Tabela 5.3) estão expostos os principais resultados para a escolha de imagens-atributos PALSAR para a detecção das classes de interesse na área de estudo. Os resultados calculados para as datas de 2009 e 2010, seguiram o mesmo padrão do observado em 2008.

Tabela 5.3 – Síntese das avaliações das imagens-atributos PALSAR visando a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes.

| Imagens-Atributos avaliadas | Número otimizado de atributos | Maior Separabilidade alcançada | Separabilidade : 5 melhores atributos | Lista dos melhores atributos para a classificação em ordem de importância; e observações gerais. |
|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| Amp2008 + Pwr2008 (2 Imagens) | 2 | 0,0029 | - | 1) Pwr2008; 2) Amp2008 A imagem Intensidade (Pwr2008) gerou maior separabilidade que a imagem Amplitude (Amp2008). |
| Amp2008 + Pwr2008 + SDs (4 imagens- atributos) | | 0,032 | - | 1) SD_Pwr2008; 2) Pwr2008; 3) SD_Amp2008; 4) Amp2008 Intensidade (Pwr2008) e seu Desvio Padrão (SD_Pwr2008) foram superiores. |
| 15 imagens- atributos (2 básicas + 13 texturas) | 10 | 0,060 | 0,058 | 1) Text2008_11; 2) Pwr2008; 3) Text2008_08; 4) Text2008_13; 5) Text2008_01; 6) Text2008_10; 7) Amp2008; 8) Text2008_02; 9) Text2008_12; 10) Text2008_06 Apesar da importância majoritária das imagens texturas, a imagem Intensidade (Pwr2008) mostrou-se útil, em segundo lugar neste conjunto. |
| 30 imagens- atributos (2 básicas + 13 texturas e os SDs de cada uma delas) | 10 | 0,231 | 0,189 | 1) SD_Text2008_13; 2) Text2008_11; 3) SD_Text2008_06; 4) SD_Text2008_08; 5) SD_Text2008_11; 6) SD_Text2008_02; 7) Text2008_08; 8) SD_Text2008_10; 9) SD_Text2008_01; 10) SD_Amp2008. Dos 10 melhores atributos, 9 foram advindos de imagens textura; as imagens de desvio padrão criadas adicionalmente no Definiens foram importantes para o aumento da separabilidade entre as classes de interesse. |

Onde: Amp.=Amplitude HH; Pwr= Intensidade HH. Text+ANO= imagens texturas geradas sobre as imagens amplitudes HH; SD= imagem desvio padrão do atributo mencionado; Texturas baseadas em ocorrência: 01="Data Range"; 02= Média; 03= Variância; 04= Entropia; 05= Assimetria. Texturas baseadas em coocorrência: 06= Média ; 07= Variância; 08= Homogeneidade; 09= Contraste;10= Dissimilaridade; 11= Entropia; 12= Segundo Momento; 13= Correlação.

Pela análise dos produtos derivados das imagens PALSAR, ficou evidente que as imagens texturas adicionam informação capaz de melhorar a separabilidade

entre as classes de interesse e, conseqüentemente, diminuir os erros de classificação. Alguns autores concluíram por melhoras da ordem de 10% de na acurácia global, a partir da inclusão de imagens texturas na análise com objetivo de mapeamento de florestas tropicais (RAKWATIN et al., 2012).

Baseado nos resultados da Tabela 5.3, pode-se dizer que as texturas que mais se destacaram foram: Entropia por coocorrência (Text2008_11), Homogeneidade por coocorrência (Text2008_8) e Correlação por coocorrência (Text2008_13), além dos desvios padrões (SD) derivados das imagens texturas. Deve-se destacar ainda que a própria imagem Intensidade (Pwr2008) foi destacada na separabilidade global obtida quando se testou 2, 4 e 15 imagens, demonstrando ser uma imagem importante a ser utilizada nas classificações (Figura 5.17).

O mapa produzido de acordo com a seleção dos melhores atributos, considerando somente dados derivados do PALSAR polarização HH, apresentou-se como um mosaico de florestas, em sua maioria, atingidas por incêndios, como de fato se observou na área de estudo (Figura 5.18). A partir da classificação de imagens do PALSAR ficou evidenciada a existência de forte variação espacial na degradação florestal, o que está de acordo com IBAMA (1998), confirmada em Martins et al. (2012) e Xaud et al. (2013).

Porém, sua limitação foi a baixa sensibilidade para o mapeamento das florestas queimadas no incêndio de 2007. Uma possível explicação para esta dificuldade das imagens do PALSAR na detecção das áreas florestais afetadas pelo incêndio de 2007, pode estar relacionada ao fato de ter sido este incêndio, o de menor escala em termos de área atingida e no tempo que permaneceu ativo, gerando impactos que não chegaram a afetar a estrutura florestal em curto e médio prazos. Uma hipótese plausível seria a de que a menos de um ano após o incêndio (mar.2007), quando houve o imageamento com o PALSAR (jan.2008), a maioria das árvores atingidas estava em pé, mesmo que algumas pudessem estar mortas ou em senescência devido à queima total ou parcial.

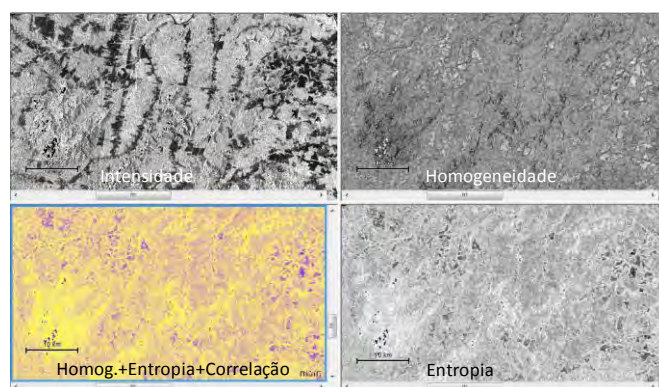


Figura 5.17 – Imagens do PALSAR que obtiveram o melhor desempenho em separabilidade visando a realização da classificação para a detecção de florestas degradadas por incêndios na região do Apiaú / Roxinho.

Uma vez que a interação das microondas do PALSAR (banda L) na floresta, não é sensível a variação da quantidade de folhas, ou galhos finos, devido seu maior poder de penetração (ROSENQVIST et al. 2007), aparentemente a alteração na floresta ao menos em parte da região dos incêndios de 2007 não foi o suficiente para alterar a resposta espectral nas microondas, quando do imageamento pelo PALSAR.

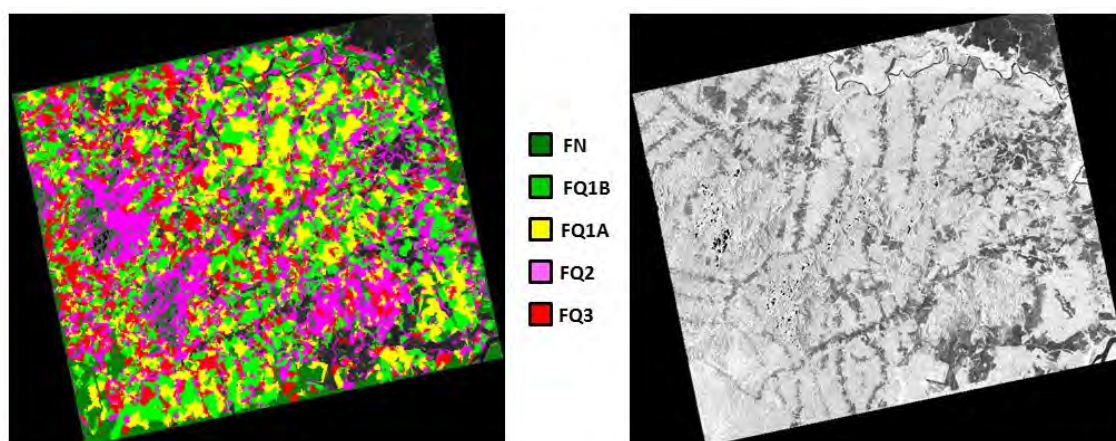


Figura 5.18 – Resultado do mapeamento de degradação florestal por incêndios na área de estudo (Apiaú-Roxinho), a partir da detecção com dados PALSAR, FBS, polarização HH; à esquerda o resultado da classificação e à direita uma imagem intensidade do PALSAR.

5.3. Experimento III: Detecção de áreas queimadas em florestas de Roraima utilizando abordagem multisensor

O objetivo do **Experimento III** consistiu em avaliar conjuntamente a potencialidade das imagens multisensor (Landsat TM e ETM+, ALOS/PALSAR e MODIS) para a detecção de áreas florestais atingidas por incêndios recorrentes na região de estudo em Roraima.

5.3.1. Metodologia

Seleção de Imagens: A resposta ao objetivo foi inicialmente investigada com base no evento de incêndio do período de estiagem no ano de 2007 na região do Apiaú / Roxinho, quando houve disponibilidade conjunta de imagens de boa qualidade de três satélites operacionais, Landsat, MODIS e ALOS/PALSAR. Os Experimentos I (MODIS) e II (PALSAR) serviram de base para a orientação da escolha de imagens a serem testadas e definição da metodologia de integração de dados dentro de uma abordagem multisensor. Do Experimento II a indicação das imagens PALSAR foi traduzida pela seleção das imagens- atributos: Intensidade, as imagens-textura de coocorrência de Homogeneidade, de Entropia, de Correlação (Figura 5.18), e seus respectivos atributos de desvios-padrão.

Após a indicação do Experimento I de que as imagens NDVI do MOD-13 poderiam ser úteis na detecção de áreas florestais afetadas por incêndios, principalmente se incorporassem alguma melhoria de filtragem de nuvens, foi realizada uma análise preliminar na série de imagens NDVI filtradas (R. Freitas, Comunicação Pessoal) para escolha de algumas datas para composição do BDG-OBIA para análise multisensor. Foram selecionadas amostras em áreas de florestas não atingidas por incêndios (FN), cerca de 450 pixels e em áreas de florestas atingidas por 3 incêndios (FQ3), cerca de 250 pixels. Os valores médios foram plotados em um gráfico (Figura 5.19).

Verificou-se que em todos os anos a maior diferença entre os valores de NDVI destas duas classes de florestas ocorreu no final do mês de março, coincidente com o final da estação seca. Enquanto a curva de NDVI se manteve dentro do padrão normal para a classe FN em todo o período observado, os valores para a classe FQ3 indicaram uma queda acentuada principalmente em março de 2003 e março de 2007.

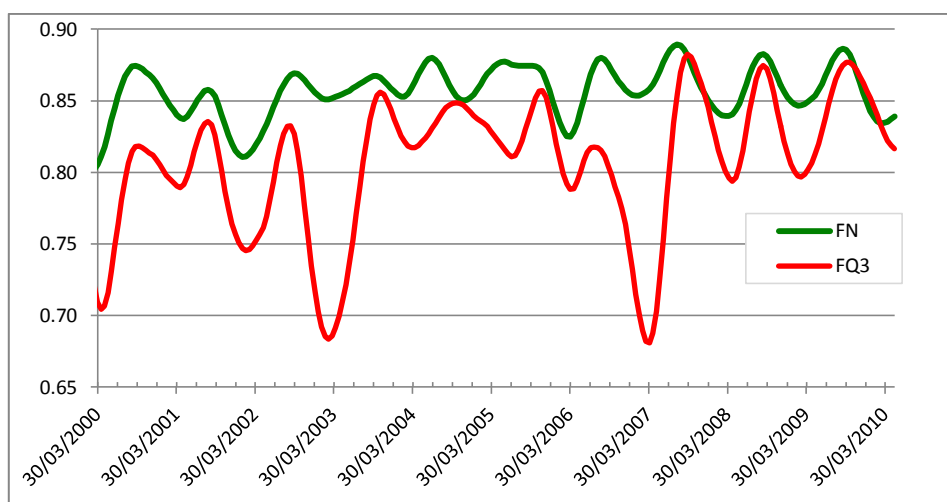


Figura 5.19 – Comportamento temporal de valores de NDVI (série MOD-13 filtrada) para áreas de florestas não atingidas por incêndios (FN) e florestas atingidas 3 vezes (FQ3), região do Apiaú / Roxinho, Roraima.

Em paralelo, observou-se que os dados quantitativos de focos de calor nestes dois períodos foram os mais altos (Figuras 3.4 e 3.5; XAUD et al., 2008; BARBOSA, 2010). Frente às evidências de incêndio em 2003 e 2007, corroboradas pela verificação visual nas imagens NDVI e TM-ETM+ foram selecionadas imagens NDVI (filtradas) de abril de 2007 (1ª e 2ª quinzena) e de agosto/setembro de 2006 (duas), coincidentes com mínimos e máximos valores de NDVI observados na série.

Em 2002 e 2006, também houve uma menor alteração no padrão das curvas, que talvez possa ser explicado pelo comportamento do clima que foi mais úmido que nos anos típicos. Talvez isto tenha provocado uma nebulosidade

capaz de influenciar negativamente os valores de NDVI. Mas neste caso o abaixamento na curva aconteceu para ambas as classes FN e FQ3 e as evidências paralelas sobre possibilidade de incêndios relativas a aumento de focos de calor e observação de imagens TM não confirmou incêndios para os períodos de estiagem de 2002 e 2006. No trabalho de campo também não houve relato de incêndios neste período.

Pré-Processamentos: Para inserção de diferentes imagens no banco de dados geográficos orientado a objetos (BDG-OBIA) do Definiens, as imagens precisaram estar devidamente registradas, no mesmo sistema de projeções e coordenadas geográficas e com a mesma resolução espacial. As imagens ortorretificadas TM e ETM+ GloVis foram utilizadas como base para a montagem do BDG-OBIA com os seguintes parâmetros: Coordenadas UTM, Datum WGS-84 e resolução espacial de 30 x 30m.

As imagens do MODIS NDVI-filtradas (FREITAS et al., 2011) foram reamostradas para 30 x 30m, usando o algoritmo do vizinho mais próximo no ENVI 4.7. As imagens PALSAR foram processadas no ASF-MapReady para as características compatíveis. As imagens TM (8bits) e MODIS (16 bits) foram mantidas em sua quantização original, assim como as imagens básicas do PALSAR (32 Bits); as imagens-texturas derivadas do PALSAR foram geradas em 16 Bits. Para economia de espaço de armazenamento e velocidade de processamento, as imagens MODIS foram recortadas para coincidir com a área de estudos onde se desenvolveram os trabalhos de campo. Na montagem do BD-OBIA, na importação de cada imagem foram informadas as áreas de cada imagem consideradas “sem dados”. A dimensão de recorte de cada imagem pode manter-se diferente, sem ônus ao processamento.

Segmentação e seleção de amostras de treinamento: O procedimento para a segmentação foi semelhante ao realizado no experimento II. Utilizaram-se como base de informação espectral as bandas 3, 4 e 5 do TM de 20.03.2007. As amostras de treinamento para a classificação e análises foram selecionadas

usando-se as informações de campo e análise visual multitemporal/multisensor nas datas principais de eventos de incêndio (Figura 5.20).

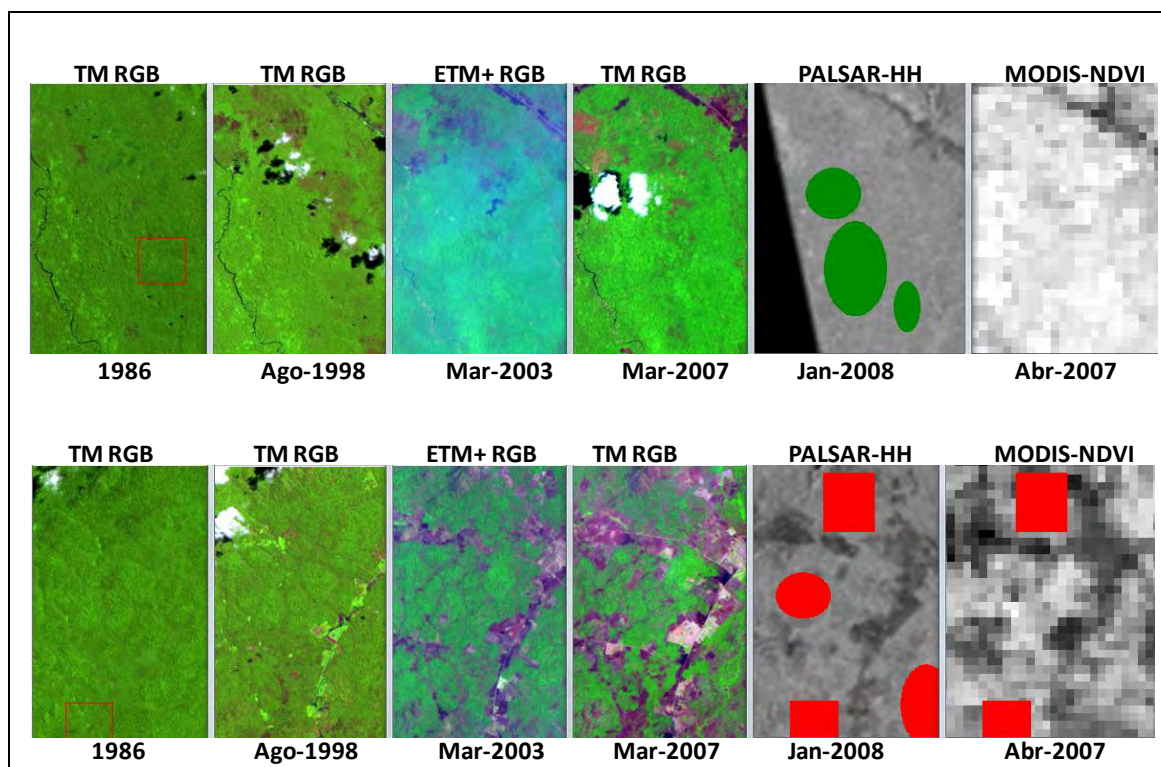


Figura 5.20 – Amostras de referência, exemplificando as classes FN acima e FQ3 abaixo, para validação das classificações.

Seleção dos atributos para a classificação: Com base na análise da separabilidade entre as classes foi realizada a escolha dos melhores atributos-imagens a serem utilizados na classificação, como realizada no Experimento II, através do algoritmo de classificação do vizinho mais próximo e técnicas de otimização do espaço de atributos (DEFINIENS, 2011; XAUD et al., 2011). Todos os atributos selecionados foram considerados a partir de suas propriedades relacionadas apenas às informações do comportamento espectral (níveis digitais relacionados à reflectância, ao NDVI, ao brilho, ou simplesmente aos níveis de cinza) como realizado em Xaud et al. (2011).

Classificação: Com base nas melhores imagens e atributos gerados a partir das mesmas (texturas, desvio padrão etc.) e nas amostras de treinamento,

foram executadas diversas classificações alternando-se algumas composições de imagens, por exemplo: só imagens e atributos derivados de TM; só imagens e atributos derivados de PALSAR (selecionados no Exp. II); só imagens e atributos derivados de MODIS (NDVI-filtrado) e algumas composições bivariadas ou multivariadas, dentro das possibilidades de uso da abordagem multisensor.

Validação: As avaliações das classificações foram realizadas em relação à separabilidade global entre as classes (Definiens, 2011).

5.3.2. Resultados: Experimento III

Quanto à escolha dos nível de segmentação e detalhamento de objetos:

Das segmentações multiresolução testadas (Tabela 5.4; Figura 5.21) foi escolhida a segmentação realizada sobre as imagens TM bandas 3, 4 e 5, com fator de escala 20, fator de forma 0,1, e compacidade 0,5 (Tabela 5.4), através de inspeção visual dos objetos a serem separados, conforme recomendado em Pinho (2005).

Tabela 5.4. Fatores de escala testados para segmentação multiresolução das imagens TM de 2007.

| Fator de escala | Forma | Compacidade | Observação |
|-----------------|------------|-------------|---|
| 5 | 0,1 | 0,5 | Objetos tornaram-se muito pequenos e ultra-detalhados |
| 10 | 0,1 | 0,5 | Objetos tornaram-se detalhados ao nível de subobjeto, ainda acima do necessário |
| 20 | 0,1 | 0,5 | Objetos de interesse adequadamente separados |
| 50 | 0,1 | 0,5 | Objetos de interesse agrupados em superobjetos |
| 100 | 0,1 | 0,5 | Objetos de interesse agrupados em superobjetos, maiores ainda que o anterior. |

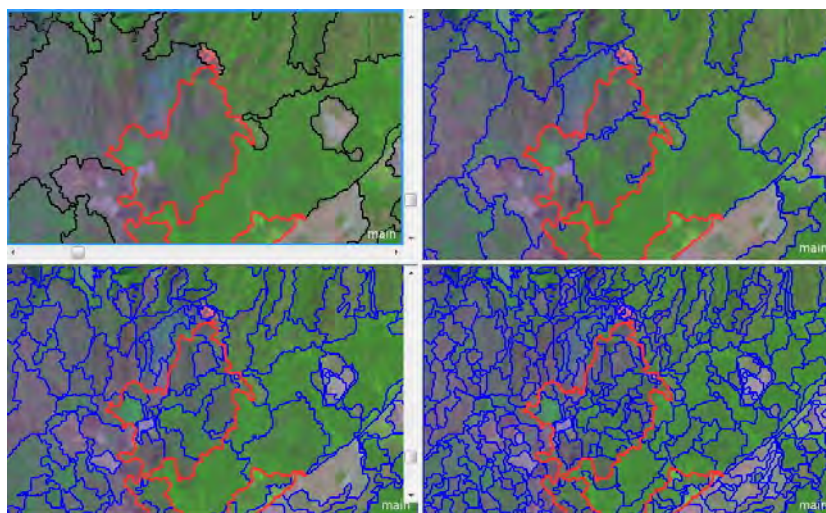


Figura 5.21 – Segmentação multiresolução em diferentes níveis de detalhamento; em linha vermelha um objeto formado de objetos menores (linhas azuis); abaixo, à esquerda a segmentação selecionada como base.

Quanto à escolha das imagens-atributos para otimização da classificação:

Os resultados comparativos em relação à escolha dos atributos a serem usados nas classificações partiram da investigação univariada em relação ao potencial de cada sensor numa perspectiva de uso multisensor. Foram consideradas as médias e os desvios padrões calculados a partir dos níveis digitais para cada um dos 8.990 objetos obtidos na segmentação. Fixadas as classes e as amostras de treinamento, a separabilidade global passou a ser um indicador de ranqueamento entre os atributos a serem utilizados. Os resultados sensor a sensor estão na Tabela 5.5 e refletem em alguns casos uma avaliação mais detalhada ou complementar à realizada nos Experimentos I e II.

A primeira pergunta a ser respondida é: Dado que só se tenha imagens próximas à data de 2007 e que em 2007 a área tenha queimado apenas parcialmente, qual o potencial destas diferentes imagens-atributos em separar as florestas atingidas por qualquer dos incêndios (1998 e/ou 2003 e/ou 2007) das florestas não atingidas?

Tabela 5.5 – Avaliação das imagens-atributos para a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes, considerando 2 classes: Floresta Queimada (em qualquer período) e Floresta não queimada; região do Apiaú / Roxinho, Roraima.

| Sensor | Imagens-Atributos avaliadas (n) | Número otimizado de atributos | Maior Separabilidade | Separabilidade com os 5 melhores atributos | Lista dos melhores atributos em ordem de importância; e observações gerais. |
|----------------------|---|-------------------------------|----------------------|--|--|
| TM / ETM+ | TM3 2007 TM4 2007 TM5 2007 (3) | 2 | 0,362 | - | 1) TM4 2007; 2) TM3 2007; A banda TM5 não acrescentou informações que melhorasse a separabilidade. |
| TM / ETM+ | TM3 2007 TM4 2007 TM5 2007 + SD de cada banda (6) | 6 | 0,460 | 0,459 | 1) TM4 2007; 2) SD_TM5 2007; 3) TM3 2007; 4) SD_TM3 2007; As bandas TM4 e TM3 se confirmaram como importantes e o SD das mesmas adicionou informação que aumentou a separabilidade das classes. |
| MODIS NDVI Filtr. | 1ª Quinz.abr.07. 2ª Quinz. abr.07 + 1ª.Q.set.2006 2ª.Q.ago.2006 (4) | 2 | 0,962 | - | 1) 1ª Quinz.abr.07; 2) 2ª Quinz. abr.07; As imagens de 2006 não adicionaram informação útil à separabilidade das classes. Melhoria na separabilidade em comparação ao TM. |
| MODIS NDVI Filtr. | 1ª Quinz.abr.07; 2ª Quinz. abr.07; + 1ª.Q.set.2006; 2ª.Q.ago.2006; + SD de cada banda (8) | 6 | 3,525 | 3,5 | 1) SD_2ª Quinz. abr.07; 2) SD_1ª.Q.set.2006; 3) SD_1ª Quinz.abr.07 4) 1ª. Quinz. Abr.07 Nota-se a importância das imagens de abril e a da informação de SD. Ressalta-se o valor alcançado na separabilidade, maior que para TM /ETM+ e PALSAR. |
| PALSAR | Intensidade (Pwr) e texturas: Homogeneidade Entropia Correlação + SDs de cada uma, em 3 datas (2008, 2009, 2010) (24) | 12 | 1,059 | 0,863 | 1) SD_Correlação 2010 2) Intensidade 2010 4) SD_Correlação 2009 5) Entropia 2008 6) Intensidade 2009 7) Intensidade 2008 8) SD_Homogeneidade 2008 9) Correlação 2010 10) SD_Correlação 2008 Dos 5 primeiros atributos que melhor separam as classes, 2 são da data de 2010, e 2 da data de 2009, dentre eles duas imagens intensidades e duas imagens texturas de correlação. |

SD = Desvio padrão.

Com base nos resultados sintetizados na Tabela 5.5, observou-se que as imagens PALSAR e MODIS (NDVI filtrado) alcançaram separabilidade mais altas que as imagens TM e ETM+. Este não era um resultado esperado das análises, uma vez que as imagens do Landsat são sempre abordadas como uma das melhores referências para a detecção de áreas queimadas. Pode ainda ser discutido, que a menor dimensão do número de imagens TM testadas (2 a 6) em comparação com o PALSAR, pode ter interferido nos resultados. Mas neste caso, as imagens MODIS teriam sido penalizadas também, e os resultados destas foram melhores que os da imagem TM.

Por outro lado, aparentemente, não há tendências ao método de avaliação empregado, uma vez que inclusive a segmentação foi realizada com base nas imagens TM. O que parece uma explicação plausível é o fato de que as imagens TM e ETM+ têm sido mais utilizadas e testadas para revelar aspectos de incêndios florestais e suas cicatrizes mais recentes, mas não têm sido testadas para detecção de eventos pretéritos.

Assim, na pergunta considerando o pós-incêndio de 2007 está embutida uma questão de observação atual e ao mesmo tempo histórica: o que pode ser mapeado como floresta atingida por incêndios (em qualquer grau) e o que deve ser considerado como floresta natural conservada (não atingida por incêndios)?

Neste sentido os resultados revelaram uma qualidade positiva presente nos dados MODIS e também do PALSAR. Tanto o NDVI filtrado, quanto algumas imagens texturas (e intensidade) foram capazes de melhorar a separabilidade entre estas duas classes de interesse, podendo ser úteis na detecção de cicatrizes e impactos na cobertura florestal atual.

A outra questão a ser resolvida envolve o caráter multitemporal/multisensor com maior ênfase, uma vez que se pretende qualificar e detalhar o estado atual de degradação das florestas causado pela recorrência de incêndios na área a partir de metodologias de sensoriamento remoto. Para responder a esta

questão, o período de observação e disponibilidade de imagens englobou as datas de incêndio de 2003 e 2007.

Embora não existam imagens PALSAR para 2003, suas imagens foram mantidas na análise, uma vez que podem ser sensíveis às mudanças estruturais da floresta em médio prazo, como observado na resposta à questão anterior onde o PALSAR revelou melhores resultados quase a partir do segundo ano de imageamento pós incêndio, nas imagens de 2009 e 2010, conforme a Tabela 5.5.

Dada a necessidade de se mapear o mosaico atual da cobertura florestal atingida por incêndios recorrentes na área de estudo, utilizando também imagens históricas, buscou-se mapear as 5 classes de ocorrência de cobertura florestal: FN, FQ1B, FQ1A, FQ2 e FQ3, avaliando-se o conjunto de imagens multisensor/multitemporais capaz de gerar o melhor produto de classificação final (Tabela 5.6).

Dos 52 atributos multisensor testados, entre os 10 primeiros atributos mais importantes foram posicionados elementos de todas as datas e sensores, indicando haver adicionalidade nas informações contidas nas diversas imagens-atributos indicando potencial ganho para as classificações decorrentes. A separabilidade máxima entre as classes foi alcançada utilizando-se os 14 melhores atributos, expostos na tabela de resultados (Tabela 5.6) e na Figura 5.22.

Estes resultados indicam que existe um acréscimo real de informação ao utilizar os diferentes sensores imagens e datas, melhorando a separabilidade entre as classes de mapeamento e, conseqüentemente, o produto do mapeamento final. Isto justifica a busca em se utilizar estas três fontes de dados (ou afins), sempre que existam imagens disponíveis.

Tabela 5.6 – Análise conjunta multisensor para avaliação das imagens-atributos visando a classificação de áreas florestais degradadas por incêndios recorrentes, considerando 5 classes de interesse: FN, FQ1B, FQ1A, FQ2, FQ3; região do Apiaú / Roxinho, Roraima.

| Sensor | Imagens-Atributos avaliadas (n) | Número otimizado de atributos | Maior Separabilidade alcançada | Separabilidade com os 5 melhores atributos | Lista dos melhores atributos para a classificação em ordem de importância; e observações gerais. |
|--|---|-------------------------------|--------------------------------|--|--|
| TM / ETM+ + MODIS + PALSAR | TM3 2007 TM4 2007 TM5 2007 ETM+b3 2003 ETM+ b4 2003 ETM+ b5 2003 + NDVI filtrado: 1ª Quinz.abr.07. 2ª Quinz. abr.07 + 1ª.Q.set.2006 2ª.Q.ago.2006 + 1ª Quinz.abr.03. 2ª Quinz. abr.03 + 1ª.Q.set.2002 2ª.Q.ago.2002 + Imagens Intensidade Text. Homogeneidade Entropia Correlação (2008, 2009, 2010) + Respectivos desvios padrão para todos os atributos. (n total=52 imagens- atributos) | 14 | 2,373 | 1,257 | 1) ETM+ b4 2003 2) SD_NDVI 1a Quinz. Abril2003 3) SD_NDVI set. 2002 4) SD_NDVI set. 2006 5) SD_Text_Correlação 2010 6) SD_NDVI 1a Quinz. Abril2007 7) ETM+ b3 2003 8) SD_NDVI 2a Quinz. Abril2003 9) SD_Text_Correlação 2009 10) SD_NDVI 1ª. quinz. Abril 2007 Dos 52 atributos multisensor testados, entre os 10 primeiros atributos mais importantes foram posicionados elementos de todas as datas e sensores, indicando haver adicionalidade nas informações contidas nas diversas imagens- atributos. |

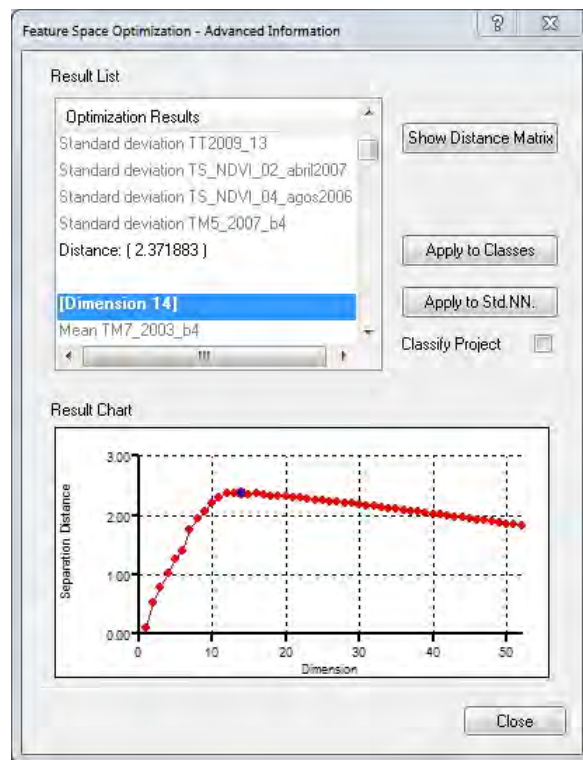


Figura 5.22 – Seleção dos melhores atributos para mapeamento de áreas florestais atingidas por incêndios, considerando Landsat, ALOS/PALSAR e MODIS em ambiente de classificação orientada a objetos (OBIA).

Desde que existam imagens de diferentes sensores complementares em datas compatíveis, serão boas as perspectivas de utilização da abordagem multisensor para melhoria da qualidade das informações geradas a partir do sensoriamento remoto, tendo como objeto o mapeamento de áreas florestais afetadas por incêndios.

Especificamente para a área de estudo deste trabalho e considerando os eventos de grandes incêndios já ocorridos (BARBOSA et al., 2004; XAUD et al., 2008; XAUD e SANTOS, 2010) deve-se refletir que a disponibilidade conjunta destas três importantes fontes de dados (Landsat, MODIS e PALSAR) só ocorreu no período de 2007-2008. Em 2003 o ALOS/PALSAR não havia sido lançado; em 1998 o JERS já não estava mais operando e não havia o PALSAR (ou correlato), nem MODIS (ou correlato) e o INPE realizou o

mapeamento do megaincêndio de Roraima utilizando imagens Landsat (com problemas de nuvens e datas), NOAA, DMSP-OLS e videografia digital (SHIMABUKURO et al., 1999).

Os resultados da classificação multisensor levando-se em consideração todos os 14 melhores atributos selecionados (Tabela 5.6) e apenas os 5 melhores foram plotados nas Figuras 5.23 e 5.24. Pode-se observar que ambos são bastante coincidentes entre si, estão condizentes com o verificado em campo.

Ao comprovar a melhoria da qualidade do levantamento com os sensores testados, deve-se portanto adiantar que outros sensores poderão vir a ser utilizados como uma alternativa multisensor aditiva, ou como uma alternativa multisensor substitutiva ou multifinalitária (XAUD e SANTOS, 2010) a exemplo de alguns testes positivos que vem sendo realizados com o MERIS (DURIEUX et al., 2007; SHIMABUKURO et al., 2011).

De uma forma geral, pode-se afirmar que quando há disponibilidade de imagens sem nuvens e sem ruídos da série Landsat, ou de satélites similares (SPOT, CBERS, IRS) suas imagens geralmente podem ser consideradas referências, como já demonstrado em diversos trabalhos, desde os trabalhos pioneiros com uso de MSS na Amazônia (SANTOS, 1984), passando por Ponzoni et al. (1986) utilizando TM em área de cerrado; Pereira (1987) e Setzer et al. (1988), utilizando TM e AVHRR na Amazônia e Shimabukuro et al. (1991), utilizando TM e AVHRR no cerrado. Sempre que houve imagem Landsat de qualidade (sem nuvens), houve possibilidade de mapeamento de áreas queimadas, incluindo áreas florestais. Embora o acerto possa não chegar a 100%, principalmente para incêndios superficiais de baixa intensidade, devido a erros de omissão.

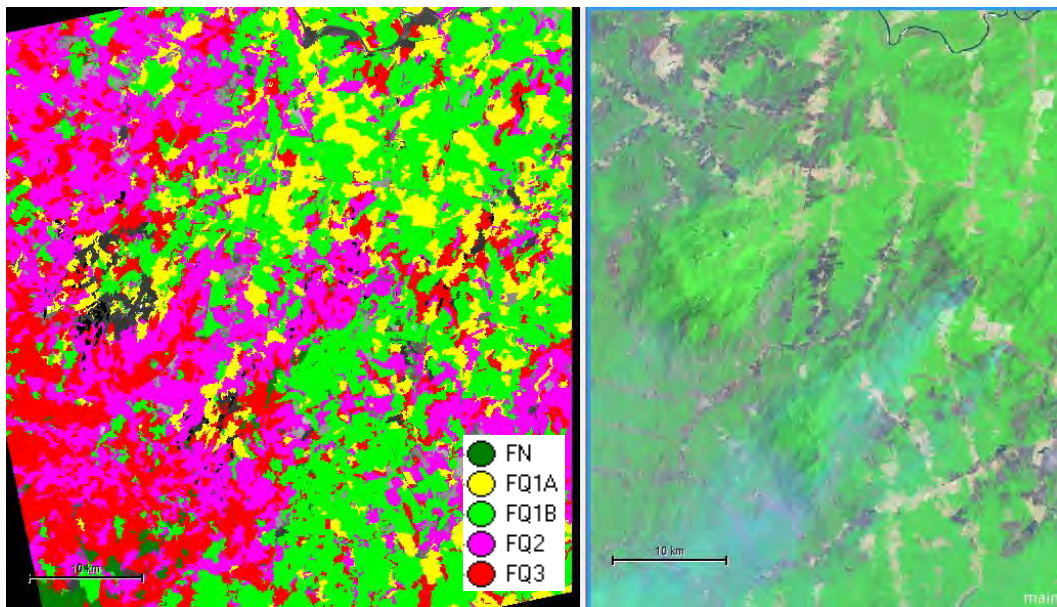


Figura 5.23 – Resultado da classificação utilizando dados multisensor TM, MODIS e PALSAR, segundo a utilização dos 14 melhores atributos; ao lado direito uma imagem ETM+ R5G4B3 do ano de 2003.

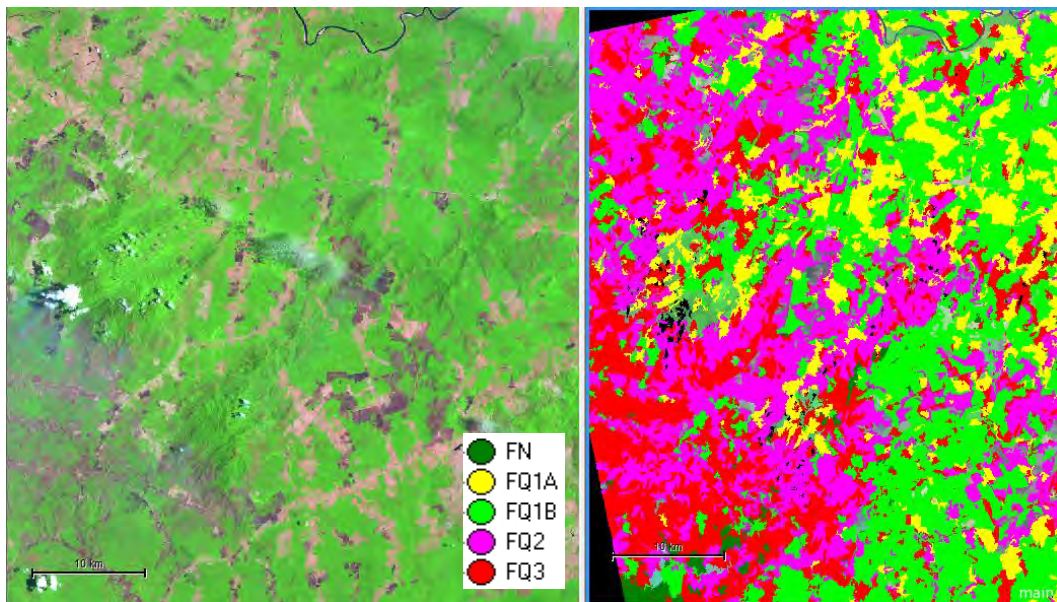


Figura 5.24 - Resultado da classificação utilizando dados multisensor TM, MODIS e PALSAR, segundo a utilização de 5 dos melhores atributos; ao lado esquerdo uma imagem TMR5G4B3 do ano de 2007.

Observando a série Landsat, verificou-se que existiram anos em que não houve imageamento adequado com boa qualidade (sem nuvens) no período posterior aos períodos de estiagem, quando coincidem os incêndios. No caso de 1998, a imagem TM do período de interesse foi obtida durante o período de incêndio quando faltavam ainda 20 dias para seu final (SHIMABUKURO et al., 1999).

Nas imagens TM pós-incêndios, de julho e agosto de 1998, parcialmente viáveis mas com muitas nuvens, observaram-se avanços expressivos até a borda entre floresta queimada e não queimada (Figura 5.25). Nos incêndios de 2003 e 2007, as imagens TM também foram relativas a períodos em que os incêndios ainda estavam ativos, em aumento portanto da área atingida.

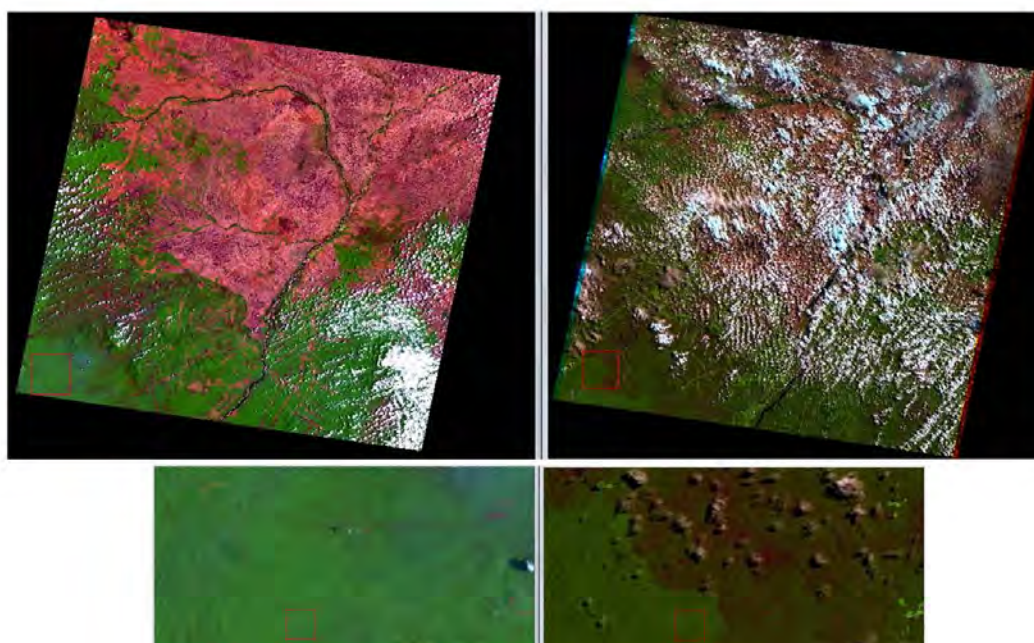


Figura 5.25 – Detalhe do incêndio de 1998 em imagens TM: ainda durante o incêndio à esquerda (11.03.1998); e em julho de 1998, à direita, com alta ocorrência de nuvens, mostrando o avanço da área atingida a qual não seria mapeada só com a imagem de março de 1998.

Por outro lado, os dados do PALSAR para a região estudada foram úteis para se estudar a evolução das cicatrizes de queimadas na vegetação dentro de um tempo de observação maior, mas não foram adequados para a detecção de áreas recentemente queimadas. Ou seja, um levantamento sistemático não poderia contar apenas com o PALSAR. Além do mais, levantamentos em banda L, ostensivos para a região Amazônica ocorreram apenas com maior ênfase com o JERS de 1992 a 1998 (M.R. XAUD, 1998 e ARAUJO, 1999) e agora, mais recentemente com o ALOS/PALSAR de 2006 a 2011. Mesmo assim, a cobertura mais abrangente está disponível apenas para a polarização HH, com as limitações discutidas nos resultados do Experimento II.

Refletindo sobre o potencial de aplicação da metodologia multisensor para o mapeamento sistemático de florestas afetadas por incêndios na mesma área ou em áreas afins, é necessário ponderar que:

- (a) nos levantamentos a partir de bases de dados nacionais e internacionais, principalmente do INPE (DGI) e da NASA (GloVIS) foi verificado, que houve disponibilidade incompleta de imagens TM para diversos anos e que por outro lado houve disponibilidade total de mosaicos de imagens MODIS desde fevereiro de 2000, embora no Experimento I tenham sido discutidos alguns ruídos devido à presença de nuvens;
- (b) que o sensor PALSAR isoladamente (HH, FBS na banda L) não conseguiu bons acertos para detecção de cicatrizes recentes (10 meses);
- (c) que erros de estimativa tenderão a ocorrer sempre que houver uma mudança de resolução espacial e na escala de observação, como pode ser observado em diversos trabalhos comparativos do MODIS com o TM (ANDERSON et al., 2005; PIROMAL et al., 2008; LIMA et al., 2009; XAUD et al., 2009);

- (d) que através da inserção pontual de imagens Landsat TM e ALOS/PALSAR (ou satélites afins) em datas possíveis, pode-se realizar complementação e calibração das estimativas MODIS ao longo da série, buscando-se diminuir os erros referentes a escala (RIVERA-LOMBARDI, 2009);
- (e) que o problema de erros do MCD45A1 relativo ao não mapeamento de áreas florestais atingidas por incêndios em Roraima no ano de 2003, não é um problema da inexistência de imagens capazes de mostrar as áreas atingidas, mas é um problema dos processamentos automáticos e dos limiares de decisão utilizadas na classificação do que venha a ser considerada uma área queimada, uma área não queimada, ou nuvens;
- (f) que o conhecimento quantificado de áreas florestais afetadas por incêndios em Roraima e na Amazônia é importante para o enfrentamento de problemas técnicos, sociais e de políticas públicas para o setor produtivo rural (Senado Federal, 1998); e para a conservação da floresta e seus serviços ambientais (ARAGÃO e SHIMABUKURO, 2010; BARLOW et al., 2012);
- (g) que os resultados da aplicação de abordagem multisensor podem ser potencializados a exemplo das facilidades de disponibilidade de imagens históricas e o desenvolvimento de novas ferramentas e ambiente de tratamento de dados de sensoriamento remoto, como por exemplo a classificação orientada a objetos (OBIA).

Conforme visto nos resultados, seria ideal nos anos onde houve problemas de incêndios florestais, que houvesse o maior número de sensores possível para que se pudesse fazer uma seleção das imagens com maior adequação nas datas de passagem e poder de detecção das cicatrizes de queimadas. Sempre que possível, deve-se buscar trabalhar com os dados de sistemas sensores satelitários operacionais de alta qualidade e que ofereçam dados históricos,

disponibilidade, perspectiva de continuidade de missão (e.g. Landsat e MODIS) e complementaridade, a exemplo de sensores ópticos e de microondas, assim como imagens em diferentes escalas espaciais, temporais etc.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Quanto à degradação florestal observada com base no inventário

O inventário florestal foi representativo da região de estudo. Áreas de floresta afetadas uma vez por um fogo de baixa intensidade (FQ1B) foram resistentes aos impactos, mostrando elevada tolerância e adaptação ao tipo predominante de incêndio da área, superficial, rasteiro. A maioria dos indicadores avaliados para fatores florísticos e fitossociológicos em FQ1B foram semelhantes aos encontrados em florestas primárias, não afetadas por incêndios (FN). Porém, verificou-se uma forte erosão da diversidade e da estrutura da vegetação, causada por alta intensidade e / ou recorrência de incêndios na área de estudo. Os impactos dos incêndios florestais nas classes FQ1A, FQ2 e FQ3 levaram à transformação total dessas áreas, proporcionando uma modificação na diversidade e estrutura destas comunidades levando-as à semelhança aos padrões encontrados em áreas de sucessão secundária jovem. Isto revelou um intenso e preocupante processo de "secundarização" destas áreas florestais.

As espécies indicadoras que melhor caracterizaram o processo de degradação em todas as classes foram da Família Urticaceae, *Cecropia* spp., cuja densidade relativa foi positivamente relacionado com a intensidade e recorrência de fogo. Na questão fitossociológica, os parâmetros de altura total (Ht), índice de diversidade de Shannon (H'), riqueza (S), e área basal (AB), foram aqueles que melhor expressam o impacto da degradação florestal via queimadas.

Devido à grande variação nos parâmetros florísticos e estruturais dentro de cada classe, houve evidência de que fatores adicionais tais como relevo local, afloramento rochoso, tipo de solo, etc., também devem ajudar a explicar o resultado dos impactos do fogo sobre a vegetação. Assim, sugerimos que estas variáveis venham a ser investigadas em estudos futuros em Roraima.

6.2. Quanto às técnicas de sensoriamento remoto empregadas

As imagens TM e ETM+ quando existentes antes e após a ocorrência de incêndios em florestas têm sido eficientes para o mapeamento das áreas atingidas. Porém a insuficiência de imagens de boa qualidade em períodos de maior cobertura de nuvens, às vezes com imageamentos de boa qualidade apenas durante a estação dos incêndios, pode causar omissões no mapeamento de cicatrizes de incêndios, como discutido para o caso de Roraima 1998.

Buscando-se o desenvolvimento de metodologias capazes de suprir ou complementar a possível ausência de imagens TM ou “Landsat like” viáveis e sem nuvens, foram realizados três experimentos. No Experimento I ficou demonstrado que as imagens MODIS do MOD-13 e MOD-9, foram capazes de evidenciar áreas atingidas por incêndios florestais em Roraima no ano de 2003, enquanto o MCD45A1 se mostrou ineficiente para este objetivo. Porém foi discutido que o MOD-09 é uma imagem que precisa ser buscada uma a uma, verificando-se detalhadamente a ocorrência localizada de nuvens nas áreas de interesse. Por outro lado, ao se utilizar séries temporais do MOD-13 foram detectados problemas com ruídos provavelmente provocado por nuvens, recomendando-se sua possível remoção através de uso de filtragens.

No Experimento II foram investigadas imagens ALOS/PALSAR que se constituem numa das principais metodologias de sensoriamento remoto para realização de mapeamentos de cobertura e uso da terra em locais com alta ocorrência de nuvens. De uma imagem FBS na polarização HH, foram derivadas e utilizadas 30 novas imagens-atributos para a data de janeiro de 2008 que foram investigadas em suas potencialidades para a detecção de áreas afetadas por incêndios florestais do ano de 2007. Concluiu-se que as imagens PALSAR HH conseguiram detectar parcialmente o evento de incêndio recente na área de estudo. O Experimento II foi eficiente para a seleção de 8 imagens-atributos derivadas do PALSAR com maior perspectivas de

adicionalidade de informações úteis para a detecção de áreas florestais afetadas por incêndios na região.

Os avanços e recomendações provenientes dos Experimentos I e II foram implementados no Experimento III, a partir da aplicação de abordagem multisensor utilizando ambiente de banco de dados geográficos para execução de classificação orientado a objetos. Os resultados permitiram a verificação histórica do mosaico de degradação florestal ocorrente na região, após três eventos diferenciados de incêndios florestais de grande impacto. Os resultados comprovaram que existe uma evidente complementaridade entre os dados dos três sensores testados, uma vez que na classificação final, de 52 atributos investigados, dentre os mais importantes estavam posicionados atributos destes três diferentes sensores. Foi verificado ainda que, independente do sensor, o atributo de desvio padrão (SD) de cada imagem melhorou todos os indicadores de separabilidade das classes de interesse, bem como as classificações finais, sendo um ponto positivo que só pode ser alcançado em classificações orientadas a objetos ou regiões.

6.3. Quanto à importância dos levantamentos de campo para a definição de classes de mapeamento e auxílio permanente ao desenvolvimento dos experimentos de sensoriamento remoto

Como relatado nas discussões, até o presente levantamento não havia uma caracterização histórica do estado da vegetação após os três eventos de grandes incêndios florestais que ocorreram na região. Por outro lado as iniciativas foram mais direcionadas à localização e extensão das áreas afetadas, que na estratificação do nível de intensidade e seus efeitos na tipologia florestal, havendo uma grande lacuna que começa a ser preenchida com o presente estudo.

O detalhado levantamento de campo realizado no âmbito deste trabalho, não só foi importante como balizador para a definição de classes de degradação por incêndios em florestas da região e como auxiliador na escolha de amostras de treinamento para realização das análises e classificações, como será importante para o desenvolvimento de futuros trabalhos que poderão ser conduzidos para o monitoramento de impactos de incêndios na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCÓN, J. G. S.; PEIXOTO, A. L. Florística e fitossociologia de um trecho de um hectare de floresta de terra firme, em Caracará, Roraima, Brasil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais, v. 2, p. 33-60, 2007.
- ALENCAR, A., NEPSTAD, D.; DIAZ, M. C. V. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: area burned and committed carbon emissions. Earth Interactions, v. 10, p. 1–17, 2006.
- ANDERSON, L.; OLIVEIRA, L. E.; ARAGÃO, C.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais do sensor MODIS/TERRA no Estado do Mato Grosso, Amazonia Brasileira. Acta Amazonica, v. 35, n. 4, p. 445-456, 2005.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. Philosophical Transactions of Royal Society B, v. 363, p. 1779–1785, 2008.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. Geophysical Research Letters, v. 34, p. L07701, 2007.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E. The incidence of fire in Amazonian forests with implications for REDD. Science, v. 328, p. 1275-1278, 2010.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; LIMA, A.; ANDERSON, L. O.; BARBIER, N.; SAATCHI, S. Utilização de produtos derivados de sensores orbitais para o estudo de queimadas na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 919-925. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15813-PRE/10423). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.03.59>>. Acesso em: 22 ago.2009.
- ARAI, E. ConvGeotiff. Software para conversão de HDF 16 bits para 8 bits. 2003.
- ARAI, E.; FREITAS, R. M.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Análise radiométrica de imagens MOD09 em 16bits e 8bits. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3983-3990. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12758-PRE/8048). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.12.49>>. Acesso em: 15.jul.2008.
- ARAUJO, L. S. Análise da cobertura vegetal e de biomassa em área de contato floresta/savana a partir de dados TM/Landsat JERS-1. 1999. 129 p. (INPE-7253-TDI/696). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, 1999. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/2000/07.19.09.09>>. Acesso em: 17.nov.2009.

ASNER, G. P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. International Journal of Remote Sensing, v. 22, p. 3855-3862, 2001.

BALCH, J. K.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L. M.; BRANDO, P. M.; PORTELA, O.; GUILHERME, P.; REUNING-SCHERER, J. D.; CARVALHO-JR., O. Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. Forest Ecology and Management, v. 261, p. 68-77, 2011.

BARBOSA, R. I. Avaliação preliminar da área dos sistemas naturais e agroecossistemas atingida por incêndios no Estado de Roraima (01.12.1997 a 30.04.1998) em 16.05.1998: Relatório Técnico II. Boa Vista: INPA/Roraima, 1998. Relatório de Pesquisa.

BARBOSA, R. I. Distribuição espacial e temporal de focos de calor em Roraima detectados pelo NOAA-AVHRR (1999-2009). In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 9., 2010, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UNICENTRO, 2010. p. 363-370.

BARBOSA, R. I.; FEARNside, P. M. Carbon and nutrient flows in an Amazonian forest: fine litter production and composition at Apiaú, Roraima, Brazil. Tropical Ecology, v. 37, p. 115–125, 1996.

BARBOSA, R. I.; FEARNside, P. M. Incêndios na Amazônia brasileira: estimativa da emissão de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Roraima na passagem do evento "El Niño" (1997/98). Acta Amazonica, Manaus, v. 29, n. 4, p. 513-534, 1999.

BARBOSA, R. I.; XAUD, M. R.; SILVA, G. N. F.; CATTÂNEO, A. C. Cinzas na Amazônia: incêndios florestais reencontram Roraima. Rio de Janeiro: Ciência Hoje, v. 35, n. 207, p. 22-27, 2004.

BARLOW, J.; PERES, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. Phil. Trans. R. Soc. B., v.363, p.1787–1794, 2008.

BARLOW, J.; PERES, C. A.; LAGAN, B. O.; HAUGAASEN, T. Large tree mortality and the decline of forest biomass following Amazonian wildfires. Ecology Letters, v. 6, p. 6–8, 2003.

BARLOW, J.; SILVEIRA, J. M.; MESTRE, L. A. M.; ANDRADE, R. B.; CAMACHO D'ANDREA, G.; LOUZADA, J.; VAZ-de-MELLO, F. Z.; NUMATA, I.; LACAU, S.; COCHRANE, M. A. Wildfires in bamboo-dominated Amazonian Forest: impacts on above-ground biomass and biodiversity. PLoS ONE, v. 7, n. 3, 2012. e33373. doi:10.1371/journal.pone.0033373. Disponível em:
<http://www.plosone.org/article/fetchObject.action?uri=info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0033373&representation=PDF>. Acesso em: 15.ago.2012.

BRADLEY, B.; JACOB, R.; HERMANCE, J.; MUSTARD, J. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. Remote Sensing of Environment, v. 106, n. 2, p. 137, 2007. ISSN 00344257. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425706003014>>. Acesso em: 24.fev.2013.

BROWN, I. F.; SCHROEDER, W.; SETZER, A.; MALDONADO, M. J. R.; PANTOJA, N.; DUARTE, A. F.; MARENGO, J. Monitoring fires in Southwestern Amazonia rain forest. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, v. 87, n. 26, p. 253-264, 2006.

BUDOWSKI, G. N. Los bosques de los trópicos húmedos de América. Turrialba, v. 16, p. 278-285, 1966.

CARDOZO, F. S.; MARTINS, F. S. R. V.; PEREIRA, L. O.; SATO, L. Y.; MOURA, Y. M.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E. Avaliação de áreas queimadas a partir dos índices espectrais NDVI e NDBR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7950-7957. DVD.

CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P.; PALACIOS, A. Assessment of different spectral indices in the red-near infrared spectral domain of burned land discrimination. International Journal of Remote Sensing, v. 23. n. 23. p. 5103-5110, 2002.

CHUVIECO, E.; OPAZO, S.; SIONE, W.; DEL VALLE, H.; ANAYA, J.; DI BELLA, C.; CRUZ, I.; MANZO, L.; LÓPEZ, G.; MARI, N.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; MORELLI, F.; SETZER, A.; CSISZAR, I.; KANPANDEGI, J. A.; BASTARRIKA, A.; LIBONATI, R. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. Ecological Applications, v. 18, n. 1, p. 64-79, 2008.

CIENTEC. Mata Nativa 2: manual do usuário. Viçosa-MG, Brazil. CIENTEC, 2006. 295 p.

COCHRAN, W.G. Sampling techniques. 3.ed. New York: John Wiley, 1977. 428 p.

COCHRANE, M. A. O significado das queimadas na Amazônia. Ciência Hoje, v. 27, n. 157, p. 26-31, 2000.

COCHRANE, M. A.; ALENCAR, A.; SCHULZE, M.; SOUZA, C.; NEPSTAD, D. C.; LEFEBVRE, P.; DAVIDSON, E. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. Science, v. 284, p. 1832-5, 1999.

COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. Global Change Biology, v. 15, p. 601-612, 2009.

COCHRANE, M. A.; SCHULZE, M. D. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition. Biotropica, v. 31, p. 2-16, 1999.

- COLWELL, R. K. EstimateS: statistical estimation of species richness and shared species from samples. Version 8. Disponível em: Persistent URL: <http://purl.oclc.org/estimates>. 2006. Acesso em: 25.jun.2012.
- COLWELL, R. K.; MAO, C. X.; CHANG, J. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. Ecology, v. 85, p. 2717-2727, 2004.
- COSTA, P.; XAUD, H.; MOURÃO, M. Florística de uma capoeira em área de transição, no município de Mucajá, estado de Roraima. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 7, 20 a 25 de novembro de 2005, Caxambu – MG. Anais... São Paulo: SEB, 2005. [Disponível em: <http://www.seb-ecologia.org.br/viiceb/resumos/1086a.pdf>. Acesso em: 10.Ago.2011.
- COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C. D. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. Theor. Appl. Climatol, v. 78, p. 137–156, 2004.
- DE SANTIS, A.; ASNER, G. P.; VAUGHAN, P. J.; KNAPP, D. E. Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery, Remote Sensing of Environment, v. 114, n. 7, p. 1535-1545, 2010.
- DISPERATI, A. A.; SANTOS, J. R. Geotecnologias: a chave da integração de dados para otimizar o inventário e monitoramento florestal. Ambiência (UNICENTRO), v. 4, p. 13-21, 2008.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MACHADO, E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. Acta Amazonica, v. 35, p. 155-173, 2005.
- EVA, H.; LAMBIN, E. F. Remote sensing of biomass burning in tropical regions: sampling issues and multisensor approach. Remote Sensing of Environment, v. 64, p. 292-315, 1998.
- FERREIRA, L. M. M.; TONINI, H.; XAUD, H. A. M.; MOURÃO JÚNIOR, M.; ARCO-VERDE, M. F.; LOPES, C. E. V. Melhoria na sustentabilidade social e ambiental de proprietários rurais na região do Apiaú, RR. In: PORRO, R. (Ed.). Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009. p. 681-689.
- FORZZA, R. C.; LEITMAN, P. M.; COSTA, A. F.; CARVALHO Jr.; A. A.; PEIXOTO, A. L.; WALTER, B. M. T.; BICUDO, C.; ZAPPI, D.; COSTA, D. P.; LLERAS, E.; MARTINELLI, G.; LIMA, H. C.; PRADO, J.; STEHMANN, J. R.; BAUMGRATZ, J. F. A.; PIRANI, J. R.; SYLVESTRE, L.; MAIA, L. C.; LOHMANN, L. G.; QUEIROZ, L. P.; SILVEIRA, M.; COELHO, M. N.; MAMEDE, M. C.; BASTOS, M. N. C.; MORIM, M. P.; BARBOSA, M. R.; MENEZES, M.; HOPKINS, M.; SECCO, R.; CAVALCANTI, T. B.;

SOUZA, V. C. Introdução. In: Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro-JBRJ, 2010. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/2012/>. Acesso em: jan.2011 a jul.2012.

FREITAS, R. M.; ARAI, E.; ADAMI, M.; SOUZA, A. F.; SATO, F. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSA, R. R.; ANDERSON, L. O.; RUDORFF, B. F. T. Virtual laboratory of remote sensing series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America. Journal of Computational Interdisciplinary Sciences, v. 2, p. 57-64, 2011.

GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D. P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C. O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. Remote Sensing of Environment, v. 113, p. 408-420, 2009.

GITAS, I. Z.; MITRI, G.; VERAVERBEKE, S.; POLYCHRONAKI, A. Advances in remote sensing of post-fire vegetation recovery monitoring - a review. In: FATOYINBO, T. (Ed.). Remote sensing of biomass - principles and applications. 2012. ISBN: 978-953-51-0313-4. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/remote-sensing-of-biomassprinciples-and-applications/advances-in-remote-sensing-of-post-fire-monitoring-a-review>>. Acesso em: 4.jul.2012.

GOLDAMMER, J. G. Preface. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges. Heidelberg: Springer-Verlag, 1990.

GOLDAMMER, J. G.; SEIBERT, B. The impact of droughts and forest fires on tropical lowland rain forest of East Kalimantan. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, p. 11-31, 1990. (Ecological Studies, v. 84).

GONÇALVES, F. G.; SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. Acta Amazonica, v. 38, n. 2, p. 229-244, 2008.

HAARPAINNER, J.; ALMEIDA FILHO, R.; SHIMABUKURO, Y. E.; MALNES, E.; LAUKNES. Comparison of Envisat ASAR deforestation monitoring in Amazônia with Landsat-TM and ALOS PALSAR images. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), Natal. Anais... São José dos Campos, INPE, 2009. p. 5857-5864. DVD.

HARALICK, R. M.; SHANMUGAN, K.; DINSTEN, I. Textural features for limage classification, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 3, n. 6, p. 610-621, 1973.

HOOFMANN, A. A.; HINRICHS, A.; SIEGERT, F. Fire damage in East Kalimantan in 1997/98 related to land use and vegetation classes: satellite radar inventory results and proposals for further actions. IFFM/SFMP GTZ, 1999. 31 p. (26 p.) (Final Report).

HUDAK, A. T.; BROCKETT, B. H. Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery. Int. J. Remote Sensing, v. 25, p. 3231-3243, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Contagem da população 2007: IBGE cidades. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em 10.ago.2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico da vegetação brasileira. Manuais Técnicos em Geociências, 1, Rio de Janeiro, 1992. 92 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Avaliação rápida dos danos ambientais dos incêndios que atingiram as florestas de Roraima em 1998. Relatório preliminar não publicado. Brasília: IBAMA, 1998, 87 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Detecção do desmatamento em tempo quase real (DETER). Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/deter/>. Acesso em 27.07.2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite / Monitoring of the brazilian amazon forest by satellite. PRODES. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>. Acesso em: 06.Jan.2012. 2012b.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Monitoramento de queimadas. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/queimadas>. Acesso em ago.2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas>. Acesso em: jul. 2012. 2012a.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability. In: PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., van der LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Eds.). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4). Cambridge: Cambridge University Press. 2007. 976 p.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). ALOS-2: The Advanced Land Observing Satellite-2. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/pr/brochure/pdf/04/sat29.pdf>. Acesso em : jan.2013.

JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. Strengthening fire ecology's roots. In. JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Eds.). Forest fires: behavior and ecological effects. San Diego / London: Academic Press, 2001. cap.1, p.1-9.

KAUFMAN, Y.; JUSTICE, C.; FLYNN, L.; KENDALL, J.; PRINS, E.; GIGLIO, L.; WARD, D.; MENZEL, P.; SETZER, A. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS. JGR, v. 103(D24), p. 32215-32238, 1998. Disponível em: <http://www.cstars.ucdavis.edu/papers/html/kaufmanetal1998a/index.html>. Acesso em: 18.08.2009

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ESCADA, P. A. S. O megaincêndio do século – 1998 (The wildfire of the Century). São José dos Campos: TRANSEC, 1998. 86 p.

KLITGAARD, B. B.; LEWIS, G. P. Neotropical Leguminosae (Papilionoideae) - Neotropikey from Royal Botanic Gardens, Kew, UK. Disponível em: [http://www.kew.org/science/tropamerica/neotropikey/families/Leguminosae_\(Papilionoideae\).htm](http://www.kew.org/science/tropamerica/neotropikey/families/Leguminosae_(Papilionoideae).htm). Acesso em: 18.ago.2011.

KORTING, T. S. Geodma: a toolbox integrating data mining with object-based and multi-temporal analysis of satellite remotely sensed imagery. 2012. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2012.

KUPLICH, T. M.; CURRAN, P.J. Estimating texture independently of tone in simulated images of forest canopies. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. (SBSR), 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. Artigos, p. 2209 - 2216. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17- 00017-X. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/11.19.09.53/doc/16_473.pdf >. Acesso em: 03. dez.2008.

LAMPRECHT, H. Ensayo sobre unos métodos para el análisis estructural de los bosques tropicales. Acta Científica Venezolana, v. 13, p. 77-119, 1962.

LARCHER, W. Ecofisiologia vegetal. São Paulo: EPU, 1986. 319 p.

LEGENDRE, P.; BIRKS, H. J. B. From classical to canonical ordination. Chapter 8, In: BIRKS, H.J.B.; LOTTER, A. F.; JUGGINS, S.; SMOL, J. P. (Eds.). Tracking Environmental Change using Lake Sediments, v.5: Data handling and numerical techniques. Springer, Dordrecht (in press). 2012. Disponível em: <http://biol09.biol.umontreal.ca/PLcourses/Ordination.pdf>. Acesso em: jul. 2012.

LEONARDI, S. S.; ORTIZ, J. de O.; FONSECA, L. M. G. Comparação de técnicas de fusão de imagens para diferentes sensores orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4111-4113. CD-ROM.

LEPŠ, J.; ŠMILAUER, P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge: Cambridge University Press. 2003. 284 p.

LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; FREITAS, R. M.; ARAGÃO, L. E. O. C.; FORMAGGIO, A. R.; LOMBARDI, R. Mapeamento de cicatrizes de queimadas na amazônia brasileira a partir da aplicação do modelo linear de mistura espectral em imagens do sensor MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5925-5932. CD-ROM.

LORENZI, H. Árvores Brasileiras - manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2ed. Nova Odessa-SP: Instituto Plantarum. v.2, 1998. 368 p.

LORENZI, H. Árvores Brasileiras - manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 3ed. Nova Odessa-SP: Instituto Plantarum. v.1 , 2000. 368 p.

MAGURRAN, A. E. Measuring biological diversity. Victoria: Wiley-Blackwell. 2004. 260 p.

MAGURRAN, A. E. Diversidad ecológica y su medición. Vedrà, Barcelona. 1989. 200 p.

MANLY, B. F. J. Multivariate statistical methods - a primer. New Zealand: Ed. Chapman and Hall, 1994. 210 p.

MARTINS, F. S. R. V. Caracterização e estimativa de biomassa aérea de florestas atingidas pelo fogo a partir de imagens polarimétricas ALOS/PALSAR. 2012. 171 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/03.08.13.38-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

MARTINS, F. S. R. V.; XAUD, H. A. M.; SANTOS, J. R.; GALVAO, L. S. Effects of fire on above-ground forest biomass in the northern Brazilian Amazon. Journal of Tropical Ecology, v. 28, n. 6, p. 591-601, 2012. doi: <10.1017/S0266467412000636>.

MOURÃO Jr.; M.; MOURA NETO, M. A.; BENDAHAN, A. B.; XAUD, M. R.; XAUD, H. A. M. Probabilidade de precipitação pluvial mensal no campo experimental Serra da Prata, Mucajá - Roraima (1993-2005). 2006. Boa Vista-RR, Brazil. (Embrapa Roraima. Boletim de Pesquisa, 6).

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. Aims and methods of vegetation ecology. New York: John Wiley, 1974. 547 p.

NASCIMENTO, M. T.; FELFILI, J. M.; OLIVEIRA FILHO, A.; FRANÇA, J. T.; HAY, J.; FONTES, M. A.; GRIBEL, R. Queimadas em Roraima: causas e conseqüências para suas florestas. Ciência Hoje, Rio de Janeiro, v. 157, n. jan/fev, p. 40-43, 2000.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). EOS Program Description. Disponível em: http://eospsso.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/description.php . Acesso em: 19.08.2009.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). LDCM: Landsat Data Continuity Mission - LDCM. Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/overview/index.html. Acesso em fev. 2013a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). MODIS Active Fire and Burned Area Products. 2010b. Disponível em: <http://modis-fire.umd.edu/index.html>. Acesso em: 01.06.2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). MODIS Rapid Response System. 2010. Disponível em: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/apps/#app01>. Acesso em: 01.06.2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). NASA's NPP Satellite Acquires First VIIRS Image. 2013. Disponível em: http://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/news/viirs-firstlight.html. Acesso em fev. 2013b.

NEEFF, T.; DUTRA, L. V.; SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAÚJO, L. S. Tropical forest measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. Forest Science, v. 51, n. 6, p. 585-594, 2005.

NELSON, B. W. Fogo em florestas da Amazônia Central em 1997. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1675-1682. CD-ROM.

NELSON, B. W.; MESQUITA, R.; PEREIRA, J. L. G.; SOUZA, S. G. A.; BATISTA, G. T.; COUTO, L. B. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. Forest Ecology and Management, v. 119, p. 149-167, 1999.

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. A. Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fires. Brasília, Brazil: The Pilot Program to Conserve the Brazilian Rain Forest, World Bank, 1999. 190 p.

NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES-FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, v. 363, p. 1737–1746, 2008.

NUGROHO, M.; HOEKMAN, D. H. SAR systems for operational forest monitoring in Indonesia. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. v. 33, Part B6. Amsterdam 2000.

ODUM, E. P. Fatores limitantes e o ambiente físico. In. Odum, E.P. Ecologia. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. Cap.5, p. 141-179.

OLIVEIRA, A. A. Diversidade, estrutura e dinâmica do componente arbóreo de uma floresta de terra firme de Manaus, Amazonas. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo – USP, São Paulo-SP, Brazil. 1997.

OLIVEIRA, A. N.; AMARAL, I. L. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. Acta Amazonica, v. 34, p. 21-34, 2004.

OLIVEIRA, A. N.; AMARAL, I. L.; RAMOS, M. B. P.; NOBRE, A. D.; COUTO, L. B.; SAHDO, R. M. Composição e diversidade florístico-estrutural de um hectare de floresta densa de terra firme na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. Acta Amazonica, v. 38, p. 627-642, 2008.

PATRONO, A.; BAPTISTA, A.; EBELTJES, J. Multitemporal Landsat TM data for monitoring the effects of forest fires and vegetation recovery processes in Mediterranean areas”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B7, Amsterdam, 13-23 July, (2000), p. 1131-1136, 2000.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. Inventário florestal. Curitiba: Edição dos autores, 1997. 316 p.

PEREIRA, M. C. Detecção, monitoramento e análise de alguns efeitos ambientais de queimadas na Amazônia através da utilização de imagens dos satélites NOAA e Landsat, e dados de aeronave. 1987. 268 p. (INPE-4503-TDL/326). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos, 1987.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5/TM images of Amazonia. Int. J. Remote Sensing, v. 14, n. 11, p. 2061-2078, 1993.

PINHO, C. M. D. Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos-SP. 2006. 178 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

PIROMAL, R. A. S.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. Acta Amazonica, v. 38, n. 1, p. 77-84, 2008.

PONZONI, F.J.; LEE, D.C.L.; HERNANDEZ FILHO, P. Avaliação da área queimada e da regeneração da vegetação afetada pelo fogo no Parque Nacional de Brasília através de dados do TM/Landsat. São José dos Campos: INPE, 1986. 32p (INPE-4035-RPE/522).

R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2011. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

RADAMBRASIL. Projeto RADAMBRASIL. Folha NA.20 Boa Vista e parte das folhas NA 21, Tumucumaque, N. 20 Roraima e NB 21: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM, Rio de Janeiro-RJ, Brazil, 1975. 428 p.

RENNÓ, C. D.; FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S. A system for region image classification based on textural measures. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. (SBSR), 9. (SBSR), 1998, Santos. Anais... São José dos Campos: INPE, 1998. Artigos, p. 1195-1202. CD-ROM. On-line. ISBN 85-17-00015-3. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.11.14.26/doc/10_211o.pdf>. Acesso em: 03.dez.2008.

RIBEIRO, J. E. L. S.; HOPKINS, M. J. G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C. A.; COSTA, M. A. S.; BRITO, J. M.; SOUZA, M. A. D.; MARTINS, L. H. P.; LOHMANN, L. G.; ASSUNÇÃO, P. A. C. L.; PEREIRA, E. C., SILVA, C. F., MESQUITA, M. R., PROCÓPIO, L. C. Flora da Reserva Ducke: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra firme na Amazônia Central. Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Department for International Development (DFID), 1999. 816 p.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estimativa de áreas queimadas com produtos MODIS como subsídio à estimativa de emissões de gases de efeito estufa pela queima de biomassa na Amazônia e cerrado brasileiros, 2009. 187 p. (INPE-15783-TDI/1526). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos. 2009.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estudo de recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes de fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/LANDSAT. 2003. 172 p. (INPE-12663-TDI/1006). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

RODRIGUEZ TELLO, J. C.; NASCIMENTO IRMAO, M.; LOPES VIANA, A.; SARAIVA BEZERRA, S. A.; PAZ CASTRO, J. Composição florística e estrutura fitossociológica da floresta ombrófila densa sub montana (Platô) face à elaboração do plano de gestão ambiental da área verde do Campus da Universidade Federal do Amazonas Flora. Revista. Forestal Venezolana, v. 52, p. 149-158, 2008.

ROSENQVIST, A.; SHIMADA, M.; ITO, N.; WATANABE, M. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 45, n. 11, p. 3307-3316, 2007.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L.; JUSTICE, C. O.; JU, J., The collection 5 MODIS burned area product – global evaluation by comparison with the MODIS active fire product, Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 3690–3707, doi:10.1016/j.rse.2008.05.013, 2008.

ROY, D. P.; JIN, Y; LEWIS, P.E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data, Remote Sensing of Environment, v. 97, p. 137–162, 2005. ISSN 0034-4257, 10.1016/j.rse.2005.04.007.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J.C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: A.Silva Ed., 2007. 428 p. ISBN 978-85-60507-00-9.

SALUSTIANO, R. E.; REIS FILHO, C. A. Algoritmos de Sensores em Consenso aplicados ao sensoriamento e monitoramento de ambientes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6111-6117. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.06.11.50>>. Acesso em: 7.jun.2010.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; CÔRTE, A. P. D.; FERNANDES, L. A. V. Inventários florestais: planejamento e execução. Curitiba: Multi-Graphic, 2006. 271 p.

SANTOS, J. R. Análise automática de dados do sensor MSS/Landsat na avaliação de áreas queimadas na instalação e conservação de projetos agropecuários. In: Reunion Plenaria SELPER, 4, 1984, Santiago. Memoria Final del IV Reunión Plenaria SELPER. Santiago - CHILE: SELPER, 1984. p. 95-102.

SANTOS, J. R.; PARDI LACRUZ, M. S.; ARAÚJO, L. S.; XAUD, H. A. M. El proceso de queima de biomassa de bosque tropical y de sabanas en la Amazonia Brasileira: experiencias de monitoreo com dados ópticos y de microondas. Série Geográfica, v. 7, p. 97-108, 1998.

SANTOS, J. R.; AOKI, H. Monitoramento do Parque Nacional de Brasília através de dados orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1. (SBSR), 1978, São José dos Campos. Anais... São José dos Campos: INPE, 1978. p. 118-134. Printed, On-line. ISBN 978-85-17-00045-4. (INPE-6630-PRE/2665). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/09.23.13.17>>. Acesso em: 18.08.2009

SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SOLER, L. L.; SANT'ANNA, S. J. S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. Remote Sensing of Environment, v. 87, n. 4, p. 482-493, 2003.

SANTOS, J. R.; MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; DUTRA, L. V.; GONÇALVES, F. G. Mapping recent deforestation in the Brazilian Amazon using simulated L-band MAPSAR images. International Journal of Remote Sensing, v. 29, p. 4879-4889, 2008.

SCHILLING, A. C.; BATISTA, J. L. F. Curva de acumulação de espécie e suficiência amostral em florestas tropicais. Revista Brasileira de Botânica, v. 31, n. 1, p. 179-187, 2008.

SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C.; PEREIRA JR., A. C.; ALMEIDA, S. A. O. Relatorio de atividades do Projeto IBDF-INPE "SEQE": ano 1987. Sao Jose dos Campos: INPE, 1988. 101 p. (INPE-4534-RPE/565).

SETZER, A.; MORELLI, F.; LOMBARDI, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas nas imagens MODIS do INPE. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: A. Silva Ed., 2007. p. 403-417.

SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; LEE, D. C. L.; PEREIRA, M. C. Dados sensorizados no monitoramento e avaliação de áreas queimadas: o caso do Parque Nacional de Emas (GO). Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 26, n. 10, p. 1589-1598, 1991. (INPE-5312-PRE/1709).

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R. M.; MARTINI, P. R.; LIMA, A. Monitoring land cover in Acre State, western Brazilian Amazonia, using

multitemporal remote sensing data. International Journal of Image and Data Fusion, v. 1, n. 4, p.325-335, 2010.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R. M.; LIMA, A.; VALERIANO, D. M.; BROWN, I. F.; MALDONADO, M. L. R. Fraction images derived from Terra Modis data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. International Journal of Remote Sensing, v. 30, p. 1537-1546, 2009.

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T.; ANDERSON, L. O.; ESPIRITO-SANTO, F. D. B.; FREITAS, R. M.; AULICINO, L. C. M.; MAURANO, L. E. P.; ARAGÃO, J. R. L. Detecção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do projeto DETER. São José dos Campos: INPE, 2005. 63 p. (INPE-12288-RPQ/796).

SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; VALERIANO, D. M.; ANDERSON, L. O.; ESPÍRITO SANTO, F. D. B. Desflorestamento na Amazônia – Sistema DETER. In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Eds.). O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. São José dos Campos: A. Silva Ed., 2007. p. 389-401.

SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; NOVO, E. M. L. M.; KRUG, T.; HESS, L. Estimativa da área de cobertura florestal afetada pelo incêndio em Roraima, utilizando dados multi-sensores. São José dos Campos: INPE, 1999. 65 p. (INPE-7119-RPQ/697).

SILVA, K. E. Florística e estrutura espacial: 15 hectares de parcelas permanentes na floresta densa de terra firme na Amazônia Central. 2010. 89 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal).. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG.

SILVA, O. F.; BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G. Fusão de imagens de sensoriamento remoto utilizando a transformada wavelet Haar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6175-6182. CD-ROM.

SILVA, R. G. Manual de prevenção e combate aos incêndios florestais. Brasília: IBAMA, 1998. 80 p.

SILVESTRINI, R. A.; SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D.; COE, M.; RODRIGUES, H.; ASSUNÇÃO, R. Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. Ecological Applications, v. 21, p. 1573-1590, 2011.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo. Curitiba: FUPEF, 2007. 264 p.

SONG, C.; GRAY, M. G.; GAO, F. Remote sensing of vegetation with Landsat imagery. In: WENG, H. (Ed.). Advances in Environmental Remote Sensing: sensors, algorithms, and applications, CRC Press/Taylor and Francis, 4ed., 2011. p.3-29.

TER BRAAK, C. J. F.; ŠMILAUER, P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to CANOCO for Windows. Software for Canonical Community Ordination (version 4.5),

Centre for Biometry Wageningen, Wageningen, The Netherlands, Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA, 2002.

TROPICOS.org. Missouri Botanical Garden. [Online]. Available: <http://www.tropicos.org>. [Accessed: Jun-Aug-2012].

UHL, C.; CLARK, K.; CLARK, H.; MURPHY, P. Early plant succession after cutting and burning in the upper Rio Negro region of the Amazon Basin. The Journal of Ecology, v. 69, p. 631–649, 1981.

VASCONCELOS, S. S.; BROWN, I. F. The use of hot pixels as an indicator of fires in the MAP region: Tendencies in recent years in Acre, Brazil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4549-4556. CD-ROM.

VERAVERBEKE, S.; LHERMITTE, S.; VERSTRAETEN, W. W.; GOOSSENS, R. The temporal dimension of differenced Normalized Burn Ratio (dNBR) fire/burn severity studies: the case of the large 2007 Peloponnese wildfires in Greece. Remote Sensing of Environment, v. 114, p. 2548–2563, 2010.

WOODHOUSE, I. H. Introduction to microwave remote sensing. Boca Raton: Taylor & Francis Group CRC Press, 2006. 370 p.

XAUD, H. A. M. Queimada: uma faca de dois gumes. (Embrapa Roraima. Embrapa Informa, 11). Embrapa Roraima, 1998.

XAUD, H. A. M.; SANTOS, J. R. Contribuição da abordagem multisensor no monitoramento de florestas tropicais afetadas por incêndios recorrentes. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 9. (SENGEF), 2010, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UNICENTRO, 2010. p. 170-177. DVD. ISBN 21788634.

XAUD, H. A. M.; BISPO, P. C.; SERVELLO, E. L.; LIMA, A.; ARENAS-TOLEDO, J. M.; FORMAGGIO, A. R. Detecção de cicatrizes de queimadas a partir de imagens MODIS-TERRA no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009a. p. 5523-5530. DVD.

XAUD, H. A. M.; FONSECA, L. M. G.; GOLTZ, G. A. M.; SANTOS, J. R.; XAUD, M. R. Object-based image analysis applied to SAR and optical data for mapping periurban areas in Brazil. In: EARSeL WORKSHOP IN LAND USE AND LAND COVER, 3, 2009, Bonn - Germany. Proceedings... Bonn: EARSeL, 2009b.

XAUD, H. A. M.; MARTINS, F. S. R. V.; SANTOS, J. R. Tropical forest degradation by mega-fires in the northern Brazilian Amazon, Forest Ecology and Management, v. 294, p. 97-106, 2013.

XAUD, H. A. M.; SANTOS, J. R.; ARAI, E.; XAUD, M. R. Detecção de cicatrizes de fogo em área de florestas em Roraima utilizando imagens do sensor MODIS. In:

SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 8. (SENGEF), 2008, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UNICENTRO, 2008. v. CDROM. p.332-340.

XAUD, M. R. Avaliação de dados TM/LANDSAT e SAR/JERS na caracterização da cobertura vegetal e distribuição de fitomassa em áreas de contato floresta/savana no Estado de Roraima – Brasil. 1998. 151 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

XAUD, M. R. Rede Proambiente, projeto componente 4: pesquisa e implementação de tecnologia em redução fogo. Embrapa, 2006.

XAUD, M. R.; MOURÃO JR., M.; XAUD, H. A. M.; SILVA, G. F. N. Dinâmica de focos de calor e parâmetros meteorológicos observados em ecossistemas florestais de contato em Roraima. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15. (CBA), 2007, Aracaju. Anais... São Paulo: LAA, 2007. s/p.

XAUD, M. R.; XAUD, H. A. M. Análise espacial dos focos de calor e do desflorestamento do Estado de Roraima. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS APLICADOS À ENGENHARIA FLORESTAL, 9. (SENGEF), 2010, Curitiba. Anais... Curitiba: FUPEF/UNICENTRO, 2010. v. CD-ROM. p. 387-392.

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

ZUO, Y.; GEB, L.; ZHANGC, K. Evaluation of ALOS PALSAR applicability to generate bushfires scars map. In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING, 31. (ACRS), 2010, Hanoi. Proceedings... Hanoi: ACRS, 2010. Disponível: <<http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceedings2010.php>>. Acesso em: 04.out.2012.

APÊNDICE 1 – DADOS FLORÍSTICOS E FITOSSOCIOLÓGICOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL

Tabela AP.1 - 30 espécies de maior Valor de Importância (VI) em 50 parcelas de 25m x 100m. Onde: (N) número de indivíduos; (U) total de parcelas em que ocorreram as respectivas espécies; (AB) Área Basal; (D) Densidade; (F) Frequência; (Do) Dominância; (A) absolutas e (R) relativas.

| Nome Científico | N | U | AB | DA | DR (%) | FA (%) | FR (%) | DoA | DoR (%) | VI | VI (%) |
|--|------|----|-------|-------|--------|--------|--------|-------|---------|-------|--------|
| <i>Cecropia leucocoma</i> | 1050 | 41 | 22,62 | 84 | 18,77 | 82 | 3,02 | 1,81 | 10,49 | 32,28 | 10,76 |
| <i>Phenakospermum guyanense Maximiliana martiana</i> | 934 | 21 | 16,51 | 74,72 | 16,7 | 42 | 1,55 | 1,32 | 7,65 | 25,90 | 8,63 |
| <i>Pouteria</i> sp.1 | 293 | 35 | 12,24 | 23,44 | 5,24 | 70 | 2,58 | 0,98 | 5,67 | 13,49 | 4,5 |
| <i>Oenocarpus bacaba</i> | 204 | 39 | 9,93 | 16,32 | 3,65 | 78 | 2,87 | 0,79 | 4,6 | 11,12 | 3,71 |
| <i>Protium</i> sp.3 | 281 | 32 | 5,41 | 22,48 | 5,02 | 64 | 2,36 | 0,43 | 2,51 | 9,89 | 3,3 |
| <i>Vitex</i> sp.1 | 80 | 24 | 11,11 | 6,4 | 1,43 | 48 | 1,77 | 0,89 | 5,15 | 8,35 | 2,78 |
| <i>Protium</i> sp.1 | 122 | 24 | 7,31 | 9,76 | 2,18 | 48 | 1,77 | 0,59 | 3,39 | 7,34 | 2,45 |
| <i>Eugenia</i> sp. | 112 | 38 | 4,82 | 8,96 | 2 | 76 | 2,8 | 0,39 | 2,24 | 7,04 | 2,35 |
| <i>Geissospermum sericeum</i> | 151 | 35 | 3,41 | 12,08 | 2,7 | 70 | 2,58 | 0,27 | 1,58 | 6,86 | 2,29 |
| <i>Apeiba</i> sp. | 101 | 11 | 7,16 | 8,08 | 1,81 | 22 | 0,81 | 0,57 | 3,32 | 5,94 | 1,98 |
| <i>Pouteria</i> sp.3 | 109 | 27 | 2,16 | 8,72 | 1,95 | 54 | 1,99 | 0,17 | 1 | 4,94 | 1,65 |
| <i>Dinizia excelsa</i> | 85 | 28 | 2,54 | 6,8 | 1,52 | 56 | 2,06 | 0,20 | 1,18 | 4,76 | 1,59 |
| <i>Talisia</i> sp.1 | 11 | 8 | 8,54 | 0,88 | 0,2 | 16 | 0,59 | 0,68 | 3,96 | 4,75 | 1,58 |
| <i>Eschweilera</i> sp. | 49 | 19 | 5,07 | 3,92 | 0,88 | 38 | 1,4 | 0,41 | 2,35 | 4,63 | 1,54 |
| Jacaranda copaia | 97 | 19 | 3,01 | 7,76 | 1,73 | 38 | 1,4 | 0,24 | 1,4 | 4,53 | 1,51 |
| <i>Vochysia</i> sp.2 | 73 | 25 | 2,38 | 5,84 | 1,31 | 50 | 1,84 | 0,19 | 1,1 | 4,25 | 1,42 |
| <i>Luehea</i> sp. | 78 | 3 | 5,61 | 6,24 | 1,39 | 6 | 0,22 | 0,45 | 2,6 | 4,22 | 1,41 |
| <i>Astrocaryum aculeatum</i> | 95 | 19 | 2,31 | 7,6 | 1,7 | 38 | 1,4 | 0,19 | 1,07 | 4,17 | 1,39 |
| <i>Guarea kunthiana</i> | 54 | 26 | 2,08 | 4,32 | 0,97 | 52 | 1,92 | 0,17 | 0,97 | 3,85 | 1,28 |
| <i>Inga</i> sp.1 | 56 | 22 | 2,59 | 4,48 | 1 | 44 | 1,62 | 0,21 | 1,2 | 3,82 | 1,27 |
| <i>Manilkara huberi</i> | 55 | 27 | 1,34 | 4,4 | 0,98 | 54 | 1,99 | 0,11 | 0,62 | 3,60 | 1,2 |
| <i>Couepia</i> sp. | 30 | 14 | 4,29 | 2,4 | 0,54 | 28 | 1,03 | 0,34 | 1,99 | 3,56 | 1,19 |
| <i>Licania</i> sp. | 51 | 25 | 1,48 | 4,08 | 0,91 | 50 | 1,84 | 0,12 | 0,69 | 3,44 | 1,15 |
| <i>Duguetia echinophora</i> | 47 | 24 | 1,74 | 3,76 | 0,84 | 48 | 1,77 | 0,14 | 0,81 | 3,42 | 1,14 |
| <i>Cecropia sciadophylla</i> | 64 | 21 | 1,42 | 5,12 | 1,14 | 42 | 1,55 | 0,11 | 0,66 | 3,35 | 1,12 |
| <i>Eschweilera amara</i> | 51 | 18 | 1,28 | 4,08 | 0,91 | 36 | 1,33 | 0,10 | 0,59 | 2,83 | 0,94 |
| <i>Licaria canella</i> | 33 | 15 | 1,87 | 2,64 | 0,59 | 30 | 1,11 | 0,15 | 0,87 | 2,56 | 0,85 |
| <i>Virola</i> sp.2 | 40 | 17 | 1,25 | 3,2 | 0,72 | 34 | 1,25 | 0,10 | 0,58 | 2,55 | 0,85 |
| <i>Pouteria</i> sp.2 | 35 | 14 | 1,83 | 2,8 | 0,63 | 28 | 1,03 | 0,15 | 0,85 | 2,51 | 0,84 |
| Subtotal: 30 espécies | 14 | 7 | 3,61 | 1,12 | 0,25 | 14 | 0,52 | 0,29 | 1,67 | 2,44 | 0,81 |
| Subtotal: Demais Espécies | 4455 | - | 156,9 | 356,4 | 79,7 | 1356 | 50,0 | 12,6 | 72,8 | 202,4 | 67,5 |
| Total: 177 espécies | 1138 | - | 58,7 | 91,0 | 20,3 | 1358 | 50,0 | 4,70 | 27,2 | 97,6 | 32,52 |
| | 5593 | 50 | 215,6 | 447,4 | 100,0 | 2714 | 100,0 | 17,25 | 100,0 | 300,0 | 100,0 |

ANEXO 1 – EQUAÇÕES APLICADAS NA ANÁLISE FLORÍSTICA E FITOSSOCIOLÓGICA

| Descritor ou parâmetro | Fórmula |
|--------------------------------------|---|
| Densidade Absoluta | $DA_i = \frac{n_i}{A}$ |
| Densidade Relativa | $DR_i = 100 \frac{DA_i}{\sum_{i=1}^S DA_i}$ |
| Frequência Absoluta | $FA_i = 100 \frac{u_i}{u_t}$ |
| Frequência Relativa | $FR_i = 100 \frac{FA_i}{\sum_{i=1}^S FA_i}$ |
| Dominância Absoluta | $DoA_i = \frac{G_i}{A}$ |
| Dominância Relativa | $DoR_i = 100 \frac{G_i}{\sum_{i=1}^S G_i}$ |
| Índice de Valor de Importância | $IVI = DR_i + DoR_i + FR_i$ |
| Índice de Diversidade de Shannon | $H = - \sum_{i=1}^S [pe_i * \ln (pe_i)] ; pe = \frac{n_i}{N}$ |
| Uniformidade ou Equilíbrio de Pielou | $J = \frac{H'}{\ln(S)}$ |
| Coeficiente de Mistura de Jentsch | $QM = \frac{S}{N}$ |
| Onde: | <p><i>i</i> = espécie; <i>n_i</i> = nº de indivíduos da espécie <i>i</i>; <i>N</i> = nº total de indivíduos na parcela <i>A</i> = área amostrada (ha); <i>G_i</i> = área basal da espécie <i>i</i> (m²); <i>u_i</i> = nº de parcelas onde a espécie <i>i</i> ocorre; <i>u_t</i> = nº de parcelas amostrais; <i>H'</i> = índice de diversidade de Shannon <i>S</i> = nº total de espécies</p> |