



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15783-TDI/1526

**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**

Roberto Javier Riveira-Lombardi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Thelma Krug e Alberto Setzer, aprovada em 17 de abril de
2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.22.07.35>>

INPE
São José dos Campos
2009

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15783-TDI/1526

**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**

Roberto Javier Riveira-Lombardi

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Thelma Krug e Alberto Setzer, aprovada em 17 de abril de
2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/04.22.07.35>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Rivera-Lombardi, Roberto Javier.

R524e 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 / Roberto Javier Riveira-Lombardi. – São José dos Campos : INPE, 2009.
187p. ; (INPE-15783-TDI/1526)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Thelma Krug e Alberto Setzer.

1. Amazônia. 2. Cerrado. 3. Sensoriamento remoto. 4. Queimadas. 5. Emissões atmosféricas. I. Título.

CDU 528.8:630*43

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Sacerdotamento Romano

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / IHPE / São José dos Campos - SP

Dra. Thelma Krug


Orientador(a) / IHPE / SJCampos - SP

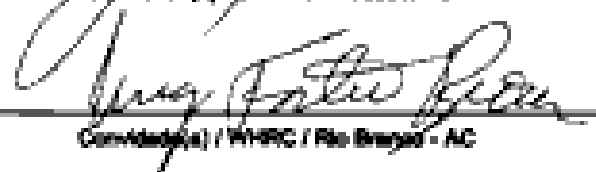
Dr. Alberto Wainborg Setzer


Orientador(a) / IHPE / SJCampos - SP

Dr. Getúlio Teixeira Batista


Convidado(a) / UNITAU / Taubaté - SP

Dr. Irving Foster Brown


Convidado(a) / FURB / Rio Branco - AC

Aluno (a): Roberto Javier Rivera Lombardi

São José dos Campos, 17 de abril de 2009

"Hay hombres que luchan un día y son buenos. Hay otros que luchan un año y son mejores. Hay otros que luchan muchos años y son muy buenos. Pero hay quienes luchan toda la vida, esos son imprescindibles".

Bertolt Brecht

*A meus pais,
Edda María (in memorium) e Roque Julio,
e a minha filha Beatriz,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Às Instituições que viabilizaram a realização do Curso de Doutorado: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE).

De maneira muito especial à Dra. Thelma Krug e ao Dr. Alberto Waingort, orientadores desta Tese. Pela amizade, confiança e incentivo à realização desta pesquisa; pela orientação, aprendizado, discussões produtivas e dedicação nos momentos necessários, contribuindo com suas experiências e conhecimentos; e pela oportunidade de realizar o Curso de Doutorado.

À Dra. Nuris Orihuela pelo apoio incondicional desde a ABAE, pela confiança e incentivo à realização desta pesquisa. Tudo isso, sem dúvida, significou a diferença que me levou culminar este trabalho.

Aos docentes do curso de Sensoriamento Remoto, em especial aos Drs. Yosio Shimabukuro e João Roberto dos Santos, pela atenção e conhecimentos repassados.

À Regina Freitas pelo apoio imensurável ao longo destes anos, amizade sincera, carinho e grande motivação. Com certeza, esta etapa da vida teria sido bem mais difícil sem a tua valiosa ajuda.

À Liliana Carvajal, pelo seu amor incondicional, companhia, paciência e apoio até o final.

Ao Victor Gimenez, irmão e amigo, sempre me assistindo nos momentos necessários com palavras de alento ou no auxílio material.

Aos funcionários da Fundação para a Ciência Aeroespacial, Aplicações e Tecnologias (FUNCATE) pelos dados cedidos, apoio e amizade, em especial ao Ubirajara Freitas e a Clotilde Ferri.

Ao Cláudio Almeida, Adriana Scolastrici, Sergio Dousseau (Gargamel), Gildardo Arango, Roberta Rosemback, Vanildes Ribeiro, Filipe Lopes, Jesús Lemus e Victor Hugo Aguilar pelo apoio técnico durante o processamento dos dados e levantamento da informação temática e, principalmente, pela amizade e motivação.

Ao André Lima pelas discussões proveitosas e importantes contribuições dadas a este trabalho.

Ao Fabiano Morelli pelo apoio, discussões e comentários que contribuíram na elaboração deste trabalho.

Ao Heber Ureta pelo suporte e apoio incondicional nos momentos mais difíceis, sempre atento ao desenvolvimento deste trabalho.

A todas as pessoas que de alguma forma me apoiaram nas diferentes fases desta pesquisa, de maneira especial a todo o pessoal da Secretaria de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE.

Aos Amigos: Denis Laesker, Leticia Carvalho, Eliane Marinho, Jean Paul Soriano, Jenifer Peña, Andrea Mourão, Ricardo Carvalho, Eunice Lindemmeyr, Tatiana Freitas, Socorro Martim, Luis Holder, Misael Medina e Michele Alves pelo estímulo e amizade.

RESUMO

Na atualidade, as estimativas dos parâmetros utilizados nos modelos de emissões globais estão baseadas em informações obtidas com sensores de resolução espacial baixa e moderada, e embora se tenha avançado muito desde o surgimento das primeiras plataformas orbitais, ainda é necessário melhorar a confiabilidade dessas estimativas. Esta melhora depende, basicamente, da capacidade da comunidade científica para desenvolver técnicas e procedimentos que permitam estimar com maior exatidão parâmetros como a área queimada. Assim, o principal objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de três produtos para estimar a extensão de áreas queimadas e de um produto para identificar fogos ativos, desenvolvidos a partir de diferentes algoritmos de detecção automática, baseados em modelos de mistura espectral e técnicas de classificação empíricas, utilizando dados orbitais do sensor MODIS/Aqua e Terra, com diferentes resoluções espaciais (250, 500 e 1000 m). Com o auxílio destes algoritmos foi estimada a área queimada nos biomas Amazônia e Cerrado no Brasil, durante o ano 2005, como variável de entrada nos modelos de emissões atmosféricas brutas de gases de efeito estufa decorrentes da queima de biomassa. A área total queimada para o Bioma Amazônia utilizando os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, MCD45, *Detecção de Área Queimada* e MOD14 foi de 70.500 km², 20.900 km², 64.100 km² e 149.200 km², respectivamente. A diferença entre as estimativas de área queimada foi de 128.300 km² entre o maior e o menor valor estimado (85%). No bioma Cerrado a área total queimada desses produtos foi de 115.700 km², 77.400 km², 26.000 km² e 80.400 km², respectivamente. A diferença entre o maior e o menor valor estimado de área queimada foi de 89.700 km² (77%). Conseqüentemente, essas discrepâncias nas estimativas da biomassa queimada obtidas a partir dos diferentes produtos de quantificação de áreas queimadas, foram responsáveis pelas discrepâncias observadas nas estimativas de emissões atmosférica brutas. A avaliação das estimativas de áreas queimadas com os produtos MODIS fundamentou-se na determinação do grau de concordância entre os produtos de áreas queimadas e da interpretação visual das cicatrizes do fogo detectadas com imagens do sensor TM/Landsat (classificação de referência), por meio da matriz de erros e da análise de regressão, considerando dois setores de validação localizados nos estados do Acre e Rondônia. O produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* foi o que apresentou o maior grau de concordância entre as áreas queimadas detectadas e as observadas na classificação de referência (81 e 93% de concordância) e um coeficiente de regressão linear de 0,57 e 0,77, respectivamente para ambos setores validados.

BURNED AREA ESTIMATION USING MODIS FIRE PRODUCTS AS A SUBSIDY FOR GREENHOUSE GASES EMISSIONS ESTIMATION DUE TO BIOMASS BURNING IN THE BRAZILIAN AMAZON AND CERRADO

ABSTRACT

At present, the estimates of parameters used in global emissions models are based on low and moderate spatial resolution satellite data, and even though those were advanced since the rising of the first orbital platforms, it is still necessary to reduce the uncertainty of these estimates. This improvement depends basically, on the capacity of the scientific community to develop techniques and procedures that would allow a more accurate estimate of burned areas. Thus, the main objective of this study was to evaluate three MODIS burned area and one MODIS active fire products developed from different automated change detection algorithms, based on spectral mixing model, empirical derived thresholds and classification techniques using satellite data from MODIS/Aqua and Terra, with different spatial resolutions (250, 500 and 1000 m). Automated change detection algorithms were used to estimate the amount of burned areas in the Brazilian Amazonia and Cerrado biomes for the year 2005, as a subsidiary parameter to biomass burning global emissions greenhouse gases models. Burned area products quantification algorithms results show expressive discrepancies in biomass burning estimates. In Amazonia biome the total area burned labeled by the MODIS burned area products is 70.500 km² (*Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*), 20.900 km² (*MCD45*) and 64.100 km² (*Deteção de Área Queimada*), while MODIS active fire product (MOD14) is 149.200 km². The difference between lowest and highest values estimates is 128.300 km² (85%). In Cerrado biome the total area burned labeled by the MODIS fire products is 115.700 km², 77.400 km², 26.000 km² e 80.400 km², respectively. The difference between lowest and highest values estimates is 89.700 km² (77%). These results confirm that uncertainties in burned area estimates based on low and moderate spatial resolution satellite data significantly contributes to the uncertainties in burned area gross emission estimates. To quantitatively evaluate the results a validation of the MODIS fire products estimates was applied by comparing the results with a burned area visual interpretation of TM/Landsat images (reference classification), using an error matrix and a linear correlation analysis in two sites located at Acre and Rondônia states. The MODIS burned area product *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* shows the highest accuracy between the observed values and the reference classification (81 e 93%); and by the linear correlation coefficient (0,57 and 0.77), respectively, for both validation sites.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivo Geral	28
1.2 Objetivos Específicos	28
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1 Estimativas de Emissões Atmosféricas Utilizando Dados Orbitais	29
2.1.1 Estimativas de Emissões Atmosféricas a Partir da Concentração dos Componentes da Fumaça.....	32
2.1.1.1 Medições em Campo e Laboratório.....	32
2.1.1.2 Medições com Dados de Sensoriamento Remoto	32
2.1.2 Estimativas de Emissões Atmosféricas a Partir da Quantidade de Biomassa Queimada.....	35
2.1.2.1 Biomassa Total Queimada.....	35
2.1.2.1.1 Quantificação da Área Total Queimada com Dados Orbitais	36
2.1.2.1.1.1 Algoritmos para Identificação e Quantificação de Áreas Queimadas.....	39
2.1.2.1.2 Densidade da Biomassa	44
2.1.2.1.3 Eficiência da Queima.....	49
2.1.2.1.4 Eficiência da Combustão	52
2.1.2.2 Estimativa De Emissões Atmosféricas Em Relação À Quantidade De Biomassa Consumida.....	54
2.1.2.2.1 Fator de Emissão	54
2.1.2.3 Estimativa de Emissões Atmosféricas em Relação a um Gás de Referência....	55
2.1.2.3.1 Quociente de Emissão	55
3 MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1 Descrição e Localização da Área De Estudo.....	57

3.2	Material.....	58
3.2.1	Produtos Orbitais.....	58
3.2.2	Dados Cartográficos e Temáticos.....	60
3.2.3	Aplicativos Computacionais.....	60
3.3	Metodologia.....	61
3.3.1	Criação do Banco de Dados e Processamento de Dados Orbitais.....	62
3.3.2	Geração de Produtos de Queimadas.....	63
3.3.2.1	Produto Anomalia Termal (MOD14).....	63
3.3.2.2	Algoritmo de Detecção de Mudanças (MCD45).....	66
3.3.2.3	Algoritmo de Áreas Queimadas.....	88
3.3.2.4	Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas.....	99
3.3.3	Estimativa das Emissões Atmosféricas a Partir da Quantidade de Biomassa Queimada.....	106
3.3.4	Avaliação das Estimativas de Área Queimada.....	116
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	121
4.1	Estimativas da Área Queimada.....	121
4.1.1	Estimativa da Área Queimada para cada Produto de Áreas Queimadas.....	121
4.2	Avaliação da Exatidão das Estimativas de Área Queimada.....	141
4.2.1	Índices de Concordância.....	141
4.2.2	Análise de Regressão.....	147
4.3	Análise das Diferenças entre as Estimativas de Áreas Queimadas.....	150
4.4	Estimativa de Emissões Atmosféricas.....	155
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	163
	A APÊNDICE A – LISTAGEM DAS CLASSES DE VEGETAÇÃO.....	175
	APÊNDICE B – ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	179

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Localização da área de estudo Fonte: Adaptada de IBGE (2004).....	57
3.2 Fluxograma geral do trabalho.....	62
3.3 Variação angular relativa a 220 dias de observações da refletância de superfície para um mesmo pixel georreferenciado, mostrando a geometria de visada (satélites Terra em azul e o Aqua em vermelho) e a geometria solar (satélite Terra em cyan e o Aqua em laranja). Os raios representam o incremento do ângulo zenital de 0° a 90° (valor máximo da geometria de visada do sensor MODIS em 65°). Os eixos x e y representam o incremento do ângulo azimutal. Fonte: Adaptado de Justice et al. (2006).	67
3.4 Roy 2002. Exemplo da refletância de superfície para um pixel representativo de área queimada (círculos cheios) e um pixel de área não queimada (círculos vazios) da banda 5 do sensor MODIS, observados em um período de 16 dias (16 de setembro a 01 de outubro de 2000; dia Juliano 260 a 275) para o ângulo de iluminação solar médio de 26°. Fonte: Adaptada de Roy ET AL. (2002)	68
3.5 Efeitos da Função de Distribuição da Refletância Bidirecional de Superfície em uma série temporal de dados diários da banda 2 (0,841-0,876 μ m) do sensor MODIS para um mesmo pixel. Fonte: Adaptado de Justice et al. (2006).	69
3.6 Diagrama conceptual da implementação do algoritmo MCD45 para detecção de mudança terrestres, indicativa de possíveis áreas queimadas. Fonte: Adaptado de Roy et al. (2002)	71
3.7 Exemplo das refletâncias de superfície da banda 5 do sensor MODIS referente ao dia 01 de outubro de 2000 (dia Juliano 275): (a) refletância observada; (b) refletância predita e (c) resultado do Z-escore estimado mostrando as mudanças nas refletâncias em (a) e (b), em escala colorida (mudanças persistentes não incluem branco nem cinza). Fonte: Adaptado de Roy et al. (2002)	72
3.8 Exemplo de uma série temporal de refletâncias de superfície observadas (triângulos vazios) e BFR preditas (triângulos cheios) da banda 5 do sensor MODIS e os correspondentes valores Z-escore (pontos negros), para um mesmo pixel observado em um período de 46 dias (7 dias sem dados), desde 07 de setembro a 22 de outubro de 2000 (dia Juliano 250 a 295). Neste exemplo a ocorrência da queima corresponde ao dia Juliano 275. Fonte: Adaptado de Roy et al. (2002)	74

3.9 (a) Refletâncias de superfície características das áreas queimadas (cicatrices do fogo) (triângulos cheios) e não queimadas (triângulos vazios) observadas nas bandas do visível e do infravermelho próximo do sensor MODIS, detectadas entre os dias 01 e 31 de agosto de 2002; (b) separação (distancia Bhattachayya) entre as refletâncias de superfície de áreas queimadas e não queimadas. Fonte: Adaptado de Roy et al. (2005)	76
3.10 Ajustes na duração da janela temporal do modelo BRDF invertido. Fonte: Modificada de Roy et al. (2005)	77
3.11 Ajustes na duração da janela temporal do modelo BRDF invertido e estimativa multitemporal dos Z-score (janela dos Sbusca e Steste). Fonte: Adaptado de Roy et al. (2005)	78
3.12 Exemplo da identificação do primeiro candidato a queimada (Dprimeiro), do número total de observações que foram utilizadas (Nusados) e as detectadas como queimadas (Ndetectados) para ambas orientações. A escala de cores mostra os dias em que o Dprimeiro foi detectado (azul= 09 de agosto, vermelho= 23 de outubro, preto as áreas não queimadas e em branco onde houve um número insuficiente de observações para inverter o modelo BRDF). Os Ndetectados e os Nusados nos Steste= 16 dias estão definidos na legenda. Fonte: Adaptado de Roy et al. (2005)	81
3.13 Mosaico de imagens MODIS convertidas para 8 bits referente aos dias de ocorrência das queimadas ("Burndate") para o mês de outubro de 2005. As classes das coberturas da terra estão representadas em diferentes níveis de cinza: áreas queimadas neve, corpos d'água, e pixels sem dados suficientes para inverter o modelo BRDF.....	86
3.14 Mosaico colorido (RGB) do mês de outubro de 2005. Em azul escuro estão representados os corpos d'água e em vermelho e amarelo o dia aproximado de ocorrência das queimadas.	87
3.15 Área total queimada do produto MCD45 na área de estudo para o ano 2005.....	88
3.16 Exemplo de imagens diárias MODIS/Aqua nível 1B correspondentes à banda 20: (a) horário de passagem (GMT) às 18:08:17 e (b) às 16:31:17.	90
3.17 Exemplo do Efeito "bow-tie" nas imagens MODIS. Adaptada de Wolfe et al.; 2002.....	90
3.18 Exemplo do deslocamento em uma imagem MODIS/Aqua relativo à correção geométrica.....	91
3.19 Exemplo de imagens diárias MODIS/Aqua da banda 20 recortadas a 45°.....	92
3.20 Aumento do tamanho do pixel nas imagens MODIS, em relação ao ângulo de visada do satélite. Onde, H é a altitude do satélite e R o raio da Terra.....	93
3.21 Exemplo de pixels saturados pela alta emissividade dos alvos terrestres na banda 20 do sensor MODIS devido à alta reflexão solar no zênite.....	94

3.22	Exemplo de imagens-mosaicos (quinzenais) correspondentes à banda 20 do sensor MODIS/Aqua.....	95
3.23	Imagem-mosaico do IVDN de referência anual estimado para o ano 2005.....	97
3.24	Fluxograma da aplicação do Algoritmo de Áreas Queimadas	98
3.25	Exemplo de seleção de datas após a verificação da cobertura de nuvens existentes nas imagens. Bordas em vermelho correspondem às imagens selecionadas	100
3.26	Exemplo da imagem fração sombra correspondente ao dia 19/09/2005, gerada a partir da aplicação do MLME para o Estado de Tocantins. Em círculos vermelhos as áreas queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.	102
3.27	Exemplo de segmentação da imagem fração sombra correspondente ao dia 19/09/2005 para o Estado de Tocantins, aplicando o método de crescimento por regiões. Em círculos vermelhos as áreas queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.....	104
3.28	Exemplo da classificação automática da imagem segmentada correspondente ao dia 19/09/2005 para o Estado de Tocantins, aplicando o algoritmo de classificação não supervisionado ISOSEG. Em círculos vermelhos as áreas queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.....	105
3.29	Área total queimada em um setor do Estado de Tocantins: a) resultado do mapeamento gerado automaticamente e b) resultado da edição visual dos erros da classificação automática. Polígonos em azul representam falsas detecções e polígonos negros os erros de omissão.....	106
3.30	Distribuição das unidades amostrais do Projeto RADAMBRASIL. Fonte: MCT (2006)	109
3.31	Desmatamento no bioma Amazônia até o ano 2004. Fonte: INPE (2008)	112
3.32	Mapa de vegetação atualizado para o ano 2002 (Bioma Amazônia). Fonte: MCT (<i>no prelo</i>).....	113
3.33	Mapa do Projeto PROBIO para o bioma Cerrado, correspondente ao estado Tocantins. Fonte: MMA (2004)	115
3.34	Localização das áreas pilotos utilizadas na validação dos produtos de áreas queimadas.....	116
4.1	Área queimada estimada pelo produto. Mapeamento de Cicatrizes de Queimada no bioma Amazônia.....	122
4.2	Área queimada estimada pelo produto MCD45 no bioma Amazônia.....	123
4.3	Área queimada estimada pelo produto Detecção de Área Queimada no bioma Amazônia.....	124
4.4	Área queimada estimada pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada no bioma Cerrado	125

4.5	Área queimada estimada pelo produto MCD45 no bioma Cerrado	126
4.6	Área queimada estimada pelo produto Detecção de Área Queimada no bioma Cerrado	127
4.7	Área queimada estimada pelo produto Anomalia Termal no bioma Amazônia.....	128
4.8	Área queimada estimada pelo produto Anomalia Termal no bioma Cerrado	129
4.9	Diagrama de barras indicando as estimativas de área queimada nos biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE) geradas a partir dos seguintes produtos: a) Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (Produto 1), b) MCD45 (Produto 2), c) Detecção de Área Queimada (Produto 3), e d) MCD14 (Anomalia Termal).....	130
4.10	Exemplo de ajuste do algoritmo Detecção de Área Queimada correspondente à primeira quinzena de outubro de 2004, para uma versão preliminar deste algoritmo. (a) em círculos vermelhos são indicadas as áreas com valores de radiância saturados por reflexos em corpos d'água; e (b) eliminação dos pixels saturados por reflexos, após o ajuste do algoritmo.	133
4.11	Exemplo de ocorrências de queimadas no sub-bosque para o Setor Acre: a) localização das áreas queimadas na imagem TM/Landsat do dia 13 de outubro de 2005, (b) áreas queimadas detectadas pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, c) áreas queimadas detectadas pelo produto MCD45, e d) áreas queimadas detectadas pelo produto Detecção de Área Queimada.....	135
4.12	Exemplo de permanência de cicatrizes do fogo de apenas 5 dias devido à regeneração da vegetação. Queimadas seriam despercebidas pelo sensor em revisitas do satélite (MODIS) acima do tempo de permanência destas queimadas: a) Imagem MODIS do dia 10 de outubro de 2005 localizada no estado de Tocantins e b) Imagem MODIS do dia 15 de outubro de 2005	137
4.13	Exemplo de ocorrências de queimadas detectadas pelo produto Detecção de Área Queimada (polígonos em negro), em uma série temporal quase diária (imagens MODIS), onde foram omitidas as detecções pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (em vermelho), devido à alta cobertura de nuvens	139
4.14	Áreas queimadas omitidas inicialmente pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, identificadas após a comparação com as estimativas do produto Detecção de Área Queimada	140
4.15	Índices de concordância em % (Setor Acre) para cada um dos produtos de áreas queimadas: Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (Produto 1), MCD45 (Produto 2) e Detecção de Área Queimada (Produto 3)	142
4.16	Índices de concordância em % (Setor Rondônia) para cada um dos produtos de áreas queimadas: Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (Produto 1), MCD45 (Produto 2) e Detecção de Área Queimada (Produto 3).	143
4.17	Exemplo de superestimativas de áreas queimadas geradas automaticamente pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, corrigidas na fase de edição visual (região sul do estado de Tocantins): (a) imagem MODIS/Terra correspondente ao dia 10 de setembro de 2005, (b) resultado da classificação	

automática gerada pelo produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, e (c) resultado do ajuste da classificação automática realizado pelo intérprete.	146
4.18 Gráficos de dispersão (Setor Acre) apresentando a proporção das células de 4 km x 4 km, classificadas como queimada nas classificações de controle (Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, Produto 2= MCD45 e Produto 3= Detecção de Área Queimada), e a proporção das células classificadas como queimada na classificação de referência.	148
4.19 Gráficos de dispersão (Setor Rondônia) apresentando a proporção das células de 4 km x 4 km, classificadas como queimada nas classificações de controle (Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada, Produto 2= MCD45 e Produto 3= Detecção de Área Queimada), e a proporção das células classificadas como queimada na classificação de referência.	149
4.20 Exemplo comparando a classificação de referência (TM/Landsat de 30 m de resolução espacial), em vermelho, com as classificações de controle (MODIS/Aqua e Terra), no Setor Rondônia: (a) produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (250 m), polígonos negros, (b) Produto MCD45 (500 m), polígonos verdes, e (c) Produto Detecção de Área Queimada (1000 m), polígonos azuis	151
4.21 Exemplo de deslocamentos na localização de áreas queimadas observados entre classificações de diferentes resoluções espaciais. Em negro a classificação do produto Mapeamento de Cicatrizes de Queimada e em vermelho o produto Detecção de Área Queimada. Observa-se uma melhor concordância acumulada entre as classificações à medida que aumenta a distância (raio) entre pixels classificados como área queimada em cada um dos produtos.	153

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Características dos produtos orbitais utilizados	59
3.2 Imagens TM/Landsat utilizadas na validação dos produtos de área queimada	117
3.3 Exemplo da matriz de erros	119
4.1 Estimativa da área queimada nos bioma Amazônia (AM) e Cerrado (CE) utilizando diferentes algoritmos.	130
4.2 Índices de concordância obtidos para os diferentes produtos de áreas queimadas (Setor Acre)..	141
4.3 Índices de concordância obtidos para os diferentes produtos de áreas queimadas (Setor Rondônia).	142
4.4 Concordância entre produtos de áreas queimadas Mapeamento de Cicatrizes de Queimada e Detecção de Área Queimada, acumulada para diferentes distâncias de deslocamento entre pixels de área queimada	152
4.5 Estimativas de emissões brutas de gases de efeito estufa para os biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE), em Tg (1 Tg = 10 ¹² g).	156
4.6 Comparação do total das estimativas de emissões brutas de CO para os biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE) para o ano 2005, com outros modelos de emissões (2000), em Tg (1 Tg = 10 ¹² g).	158

1 INTRODUÇÃO

O incremento nas concentrações atmosféricas de alguns GEE, devido a fatores de origem natural ou antropogênica tem sido associado a mudanças no clima global. A influência exercida por esses fatores na modificação do balanço de energia no sistema Terra-atmosfera e sua importância como mecanismo potencial de mudança climática, pode ser avaliada através do conceito de forçante radiativa. Uma forçante radiativa positiva, como aquela produzida pelo aumento nas concentrações atmosféricas de alguns GEE decorrentes de atividades humanas, altera consideravelmente a energia térmica retida na atmosfera e, conseqüentemente, o clima mundial (IPCC, 2001).

A mudança global do clima vem se manifestando de diversas formas, destacando-se o aquecimento global, a maior frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, as alterações nos regimes de chuvas, as perturbações nas correntes marinhas, a retração de geleiras e a elevação do nível do mar. Essas mudanças poderiam ocasionar impactos nos sistemas naturais e humanos e comprometer a disponibilidade de recursos básicos, como água e alimentos, a biodiversidade e os ecossistemas terrestres e marinhos, os assentamentos humanos e a saúde humana entre outros (IPCC, 2001).

Os principais GEE na atmosfera terrestre são o vapor d'água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O), o metano (CH_4) e o ozônio (O_3). Também existem outros GEE produzidos totalmente pelo homem como os halocarbonetos, o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os hidrofluorcarbonos (HFC's) e os perfluorcarbonos (PFC's). As concentrações atmosféricas de GEE, como o CO_2 , o N_2O , o CH_4 e o O_3 alcançaram, durante o decênio de 1990, os níveis mais altos jamais registrados como resultado de atividades antropogênicas na biosfera (IPCC, 2001).

Dentre as atividades humanas mais importantes que contribuem com as emissões destes gases, tem-se: a) a queima de carvão, petróleo e gás natural para a produção de energia e para os sistemas de transportes; b) a queima de biomassa resultante da conversão de florestas e savanas para outros usos da terra e da queima de resíduos agrícolas; c) a aplicação de fertilizantes agrícolas; d) os cultivos de arroz e pecuária; e) as emissões

diretas de produtos químicos produzidos pelo homem a partir de diferentes fontes, incluindo propelentes gasosos (LEVINE, 1991).

A queima de biomassa induzida por atividades antropogênicas ou por causas naturais é uma fonte importante de emissões globais de gases e particulados para a atmosfera, como CO₂, óxidos de nitrogênio (NO_x), N₂O, monóxido de carbono (CO), CH₄ e outros hidrocarbonetos não metanos (HCNM) que entram na circulação atmosférica global e contribuem para aumentar o efeito estufa (CO₂, CH₄ e N₂O). A oxidação de CO, CH₄ e HCNM, em presença de NO_x, causa o aumento da concentração de ozônio (O₃) na troposfera como resultado da combustão incompleta durante as queimadas (WMO, 1995).

Durante as queimadas o carbono é a fração predominante emitida, principalmente na forma de CO₂ (90%), CO, hidrocarbonetos (CH₄, C₂H) e HCNM. O CO₂ é a espécie de maior interesse devido às grandes quantidades deste gás que são liberadas, em intervalos curtos de tempo (CRUTZEN e ANDREAE, 1990).

Em uma longa escala de tempo, o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera devido à queima de biomassa não é significativo, tendo em vista a sua reincorporação durante a rebrota da vegetação depois do fogo. No entanto, quando a biomassa queimada não é restabelecida rapidamente o CO₂ é adicionado à atmosfera até sua remoção por algum outro processo, contribuindo assim para o efeito estufa na atmosfera e para as mudanças climáticas globais (ANDREAE, 1991). Por outro lado, gases como o CH₄ e o N₂O, liberados durante as queimadas, permanecem na atmosfera ainda que a biomassa tenha sido recuperada totalmente, já que eles não participam da fotossíntese.

Técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para estimar emissões atmosféricas decorrentes da queima de biomassa. Os sistemas sensores a bordo dos satélites possuem a capacidade de prover informação de forma regular e sistemática em nível regional ou global das atividades do fogo. As informações obtidas a partir dos dados orbitais são úteis para compreender os fatores e processos envolvidos durante a queima de biomassa.

Parâmetros requeridos nos modelos de emissões atmosféricas como área queimada, densidade da biomassa, conteúdo de água no combustível entre outros, podem ser deduzidos de forma direta ou indireta a partir de dados orbitais (AHERN et al., 2001; Justice et al., 2002a). No entanto, os cálculos de emissões atmosféricas globais apresentam uma ampla diversidade de incertezas quando utilizados dados de sensoriamento remoto de baixa resolução espacial causadas, principalmente, por imprecisões nas estimativas da biomassa queimada e pela dinâmica espaço-temporal do fogo. Por outro lado, alguns dos parâmetros que relacionam a quantidade da biomassa queimada com os fluxos de emissões apresentam margens de erros pouco conhecidas.

Estimar as emissões de gases de efeito estufa resultantes da queima de biomassa é uma tarefa muito complexa de ser realizada devido às incertezas nas medições dos parâmetros biofísicos utilizados nos modelos de emissões atmosféricas. Os níveis de incerteza nas medições desses parâmetros estão diretamente relacionados com as escalas de trabalho e com a variabilidade espaço-temporal da atividade do fogo e do combustível da biomassa.

Apesar das estimativas dos parâmetros requeridos nos modelos de emissões atmosféricas utilizando dados de sensoriamento remoto apresentarem algumas limitações, essas medições representam a única alternativa para quantificar emissões atmosféricas em nível global. Por outro lado, em virtude dos sensores terem a capacidade de obter informação de alvos terrestres de forma regular e sistemática em diferentes resoluções espaciais e espectrais (e.g. das regiões óptica e termal do espectro eletromagnético), o uso de dados orbitais contribue significativamente na representação da heterogeneidade espaço-temporal do fogo, principalmente, quando ocorrem em diferentes níveis de detalhe.

Na atualidade, as estimativas dos parâmetros utilizados nos modelos de emissões globais estão baseadas em informações obtidas com sensores de resoluções espacial baixa e moderada, e embora se tenha avançado muito desde o surgimento das primeiras plataformas orbitais, ainda é necessário melhorar a confiabilidade dessas estimativas. Esta melhora depende, basicamente, da capacidade da comunidade científica para

desenvolver técnicas e procedimentos que permitam estimar com maior exatidão parâmetros como a área queimada.

As técnicas e procedimentos comumente utilizados para a identificação e quantificação de áreas queimadas baseiam-se na aplicação de algoritmos automáticos, modelos de mistura espectral e técnicas de interpretação visual, conforme as propriedades espectrais (tanto emissivas quanto refletivas) que apresenta o fogo ativo e as cicatrizes do fogo em diferentes regiões do espectro eletromagnético.

Diversos produtos para a identificação e quantificação de áreas queimadas têm sido desenvolvidos a partir de dados orbitais de resolução moderada (e.g. o sensor MODIS/Terra e Aqua), no entanto as estimativas da área queimada obtidas utilizando esses produtos podem apresentar discrepâncias relativas não só à resolução espacial dos dados, mas também às técnicas e aos procedimentos empregados para o mapeamento das queimadas (JAIN, 2007).

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso de diferentes técnicas e procedimentos para a identificação e quantificação de áreas queimadas, desenvolvidos a partir de dados do sensor MODIS, os quais são comumente utilizados como insumo nas estimativas globais de emissões atmosféricas brutas dos principais gases de efeito estufa (CO_2 , CO , CH_4 , N_2O e NO_x), decorrentes da queima de biomassa nos biomas Amazônia e Cerrado, para o ano 2005.

1.2 Objetivos específicos

Visando o alcance do objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- (a) Quantificar a área afetada pelo processo de queima de biomassa nos biomas Amazônia e Cerrado, mediante o uso de produtos de áreas queimadas gerados a partir de diferentes procedimentos automáticos ou de técnicas de classificação visual.

- (b) Caracterizar, com base no mapa de vegetação e áreas antropizadas, o tipo de fisionomia vegetal afetada pelo processo de queima de biomassa, para cada um dos produtos de áreas queimadas utilizados no presente estudo.
- (c) Estimar a quantidade total de biomassa consumida pelo fogo em cada uma das fisionomias vegetais estudadas, utilizando valores de densidade da biomassa e da eficiência da queima disponíveis na literatura.
- (d) Fornecer estimativas de emissões atmosféricas brutas de CO₂, acima do solo, em cada uma das fisionomias vegetais estudadas, em relação à quantidade de biomassa consumida pelo fogo.
- (e) Fornecer estimativas de emissões atmosféricas brutas, acima do solo, em cada uma das fisionomias vegetais estudadas, dos principais gases de efeito estufa (CO₂, CO, CH₄, N₂O e NO_x).

2. FUDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estimativas de emissões atmosféricas utilizando dados orbitais

As estimativas de emissões globais resultantes da queima de biomassa têm sido feitas a partir de medições diretas ou indiretas de parâmetros biofísicos, relacionados com processos e fatores do fogo que alteram a estrutura e composição de comunidades vegetais. Essas alterações dependem, principalmente, de fatores como: a extensão da área queimada, a frequência e a intensidade do fogo, e a sensibilidade da vegetação ao fogo (SOUSA, 1984). A compreensão desses processos e fatores tem sido documentada na literatura através do conhecimento sobre a ecologia do fogo, as medições e modelagem das características do fogo, os processos de combustão, a emissão e o transporte de espécies químicas decorrentes das queimadas.

Estimativas de emissões atmosféricas podem ser feitas de forma direta através da medição da concentração dos componentes da fumaça emitidos durante as queimadas, a partir de medições em campo ou com dados obtidos com sensores orbitais ou aerotransportados. Porém, as medições nas quais este procedimento é adotado devem ser feitas simultaneamente durante a ocorrência das queimadas, tornando-as uma tarefa árdua devido às dificuldades operacionais em sincronizar as campanhas de medições com a atividade do fogo.

As emissões atmosféricas produzidas durante a ocorrência de queimadas estão diretamente relacionadas com a quantidade de biomassa consumida em um determinado ecossistema. A biomassa total queimada e a quantidade correspondente de gases emitidos podem ser estimadas de forma indireta a partir de parâmetros biofísicos como: a área queimada, a densidade da biomassa, a eficiência de combustão e fatores ou quocientes de emissão para as espécies químicas relacionadas (LEVINE, 1999).

2.1.1 Estimativas de emissões atmosféricas a partir da concentração dos componentes da fumaça

2.1.1.1 Medições em campo e laboratório

Medições diretas em nível local relacionando as características da biomassa, as taxas de emissão e o tipo de combustão são realizadas em campo (queimas prescritas ou naturais) ou em laboratório, visando extrair parâmetros de emissão que possam ser utilizados posteriormente nas estimativas de emissões, principalmente onde não existam dados disponíveis (PALACIOS-ORUETA et al., 2005).

Experimentos em níveis regional e global, a partir de medições simultâneas em estações terrestres e com sensores aerotransportados, têm sido desenvolvidos em regiões com alta incidência de queimadas (Amazônia, cerrado brasileiro, savanas africanas, entre outras), obtendo-se dados importantes sobre a evolução do fogo, a queima de biomassa, as características do combustível e as taxas de emissão (KAUFMAN et al, 1992; WARD et al., 1992; ANDREAE et al., 1998). Este tipo de estudo tem demonstrado que existe forte relação entre a complexidade da vegetação, as condições ambientais e as emissões quando se pretende desenvolver modelos para obter estimativas de emissões em nível regional e global.

2.1.1.2 Medições com dados de sensoriamento remoto

Dados de sensoriamento remoto são utilizados para medir a concentração de partículas nas plumas de fumaça emitidas durante as queimadas devido à sua alta correlação com emissões de gases-traço (WARD, 1986; KAUFMAN et al., 1990a). As estimativas de concentração de partículas de fumaça são feitas calculando-se a espessura óptica da fumaça e baseiam-se nas diferentes propriedades de absorção e espalhamento da radiação solar que apresentam vários dos seus componentes na região óptica do espectro eletromagnético (0,4 - 1,3 μm) (PALACIOS-ORUETA et al., 2005), utilizando os seguintes métodos:

a) Diferença de refletâncias

Segundo a origem (combustão ou nevoeiros) e as características (tamanho), as partículas atmosféricas apresentam tipos distintos de espalhamento e de absorção em diferentes comprimentos de onda como, por exemplo, na região do azul ($0,4 - 0,5\mu\text{m}$) e do vermelho ($0,6 - 0,7\mu\text{m}$) (CHUVIECO, 1996). Desta forma, a concentração de partículas atmosféricas é medida através dos contrastes observados entre as refletâncias nestas regiões do espectro (KAUFMAN et al., 1992).

A nova geração de sensores como o VEGETATION/SPOT (bandas na região do azul, verde, infravermelho próximo -IVP- e o infravermelho médio -IVM-) e o MODIS/Terra-Aqua (múltiplas bandas na região óptica) são adequados para este tipo de aplicação (KING et al., 1999). Também é possível estimar a espessura óptica da fumaça e medir a absorção das partículas atmosféricas a partir de dados do sensor AVHRR (bandas do vermelho e do IVP). Kaufman et al. (1990a) estimaram a taxa de emissão de gases-traço a partir da taxa de emissão de partículas obtidas com dados do AVHRR e coeficientes de emissão obtidos em incêndios florestais nos Estado Unidos.

b) Medições diretas com sensores providos de bandas de absorção de gases

Medições diretas da concentração de gases têm sido feitas com o sensor MOPITT/Terra (Measurements of Pollution in the Troposphere). Este sensor, projetado para medir a concentração de CO e CH₄ na atmosfera, tem medido o incremento de CO decorrente da queima de biomassa em várias regiões do mundo, examinando de forma direta as variações espaço-temporais nas emissões destes gases e independentemente de outros parâmetros ou modelos.

Lamarque et al. (2003) utilizaram dados deste sensor para identificar plumas de CO decorrentes da queima de biomassa em incêndios de grandes extensões ao noroeste dos Estados Unidos, assim como as emissões e a transferência deste gás para o leste desse país. Liu et al. (2005) correlacionaram medições obtidas em campo e em laboratório (direção do vento, quantidade de área queimada, densidade de biomassa, fatores de emissão), com as emissões de CO obtidas com o sensor MOPITT e focos de incêndios

detectados com o sensor AVHRR. Os resultados indicaram a potencialidade deste sensor para detectar plumas de CO decorrentes de incêndios em florestas de grandes extensões e as respectivas variações temporais deste gás, utilizando composições de três dias. O modelo de distribuição espacial de CO obtido por este sensor durante as queimadas foi consistente com a localização e a densidade dos focos de incêndios detectados pelo AVHRR e a direção do vento medida em campo.

Cabe destacar algumas restrições apontadas por esses autores como a baixa resolução do sensor MOPITT (22 km x 22 km no nadir), que limitou a detecção de plumas de CO em incêndios de grandes extensões e as áreas sem cobertura de nuvens, já que as emissões de CO decorrentes de pequenos incêndios e baixas densidades de biomassa não são detectadas pelo sensor, assim como a impossibilidade em se obter dados em dias nublados. Outra limitante importante refere-se à baixa sensibilidade apresentada pelo sensor nas camadas limítrofes, apontada como possível causa no incremento das estimativas de emissões obtidas (em um incêndio de aproximadamente 6.937 km², no noroeste dos Estados Unidos, o sensor estimou para o mês de agosto do ano 2000 a emissão de CO em cerca de 4 Mt em comparação a 1-3 Mt medidas em campo) Liu et al. (2005).

Outros experimentos utilizando sensores aerotransportados e dados orbitais têm sido utilizados para estimar a concentração de gases-traço na atmosfera. Kaufman et al. (1992) associaram partículas de fumaça, emitidas a partir de queimadas em pastagens e florestas convertidas para outros usos na Amazônia brasileira, em medições simultâneas com as emissões de gases-traço realizadas em campo. Os resultados mostraram que os coeficientes entre as partículas de fumaça emitidas e gases-traço como CO e CH₄ permaneceram quase constantes, ao contrário das variações observadas nos coeficientes entre estes gases e o CO₂.

No entanto, neste experimento, cabe notar que foram utilizadas medições de apenas dois incêndios para estimar os coeficientes entre as partículas e os gases-traço CO e CH₄, e de três incêndios para os coeficientes entre os gases-traço emitidos; portanto, os resultados obtidos não podem ser considerados conclusivos. Por outro lado, cabe destacar as dificuldades na aplicação das técnicas de medição e instrumentos requeridos

neste tipo de experimento, como a necessidade em se medir simultaneamente dados de campo, aerotransportados e orbitais e os procedimentos para caracterizar as condições de observação da pluma de fumaça, feitas através da coleta de dados multitemporais em diferentes níveis altitudinais e para diferentes tipos de combustão (com e sem chama).

Finamente, cabe destacar medições feitas utilizando diferentes ângulos de visada do sensor para estimar a espessura óptica atmosférica a partir das diferentes refletâncias observadas sobre uma mesma cobertura da terra, em diferentes ângulos de visada. Aplicações deste método têm sido feitas com dados do sensor MISR (Multi-Angle Imaging Spectroradiômetro) a bordo da plataforma Terra, ou POLDER (Polarization and Directionality of the Earth Reflectances) sobre a plataforma ADEOS (KING et al., 1999).

2.1.2 Estimativas de emissões atmosféricas a partir da quantidade de biomassa queimada

As estimativas de emissões atmosféricas resultantes da queima de biomassa baseiam-se na integração de parâmetros que relacionam a quantidade da biomassa queimada e os fluxos de emissões, com fatores de emissão que dependem do tipo do combustível e da fisionomia vegetal afetada pelo fogo, assim como da eficiência da combustão (SEILER e CRUTZEN, 1980; ROBINSON, 1989). O tipo e a quantidade de gases-traço emitidos durante as queimadas está relacionado com a composição física e química dos ecossistemas afetados e com fatores ambientais como a precipitação, a umidade, a temperatura, a topografia e a velocidade do vento (WARD et al., 1992).

2.1.2.1 Biomassa total queimada

A quantidade total de biomassa (combustível) consumida pelo fogo (M) é comumente determinada de forma indireta, para uma região e um ecossistema determinado, através do modelo proposto por Crutzen et al. (1979) e Seiler e Crutzen (1980) (Equação 2.1):

$$M = A \times B \times E \quad (\text{peso da matéria seca}) \quad (2.1)$$

Sendo, A a área total queimada (superfície); B a densidade da biomassa (peso/superfície); e E a eficiência da queima (adimensional).

Esta equação integra uma série de parâmetros biofísicos que podem ser estimados utilizando diversos procedimentos em vários níveis de generalização, sendo possível sua aplicação em escalas espaço-temporais variadas. Em alguns casos, a informação necessária para gerar esses parâmetros encontra-se bem definida. No entanto, em outros casos, as informações estão baseadas em séries de dados ou observações muito limitadas (SEILER e CRUTZEN, 1980; KASISCHKE e BRUHWILER, 2003; PALACIOS-ORUETA et al., 2005). Alguns métodos para estimar os parâmetros na Equação (2.1) envolvendo diferentes ecossistemas, assim como a origem das incertezas nas medições e modelagem são discutidas a seguir, focando a potencialidade dos dados de sensoriamento remoto para obter essas informações.

2.1.2.1.1 Quantificação da área total queimada com dados orbitais

Para fins deste trabalho, se aplicam as seguintes definições sobre ecologia do fogo: (a) *queimada*, refere-se ao processo de combustão de fitomassa e/ou subprodutos desta combustão; (b) *área queimada*, refere-se à extensão da superfície afetada por queimadas identificáveis nas imagens TM/Landsat e MODIS/Aqua e Terra; (c) *cicatriz do fogo*, refere-se ao comportamento espectral das áreas queimadas após o fogo ter consumido, total ou parcialmente, o material combustível; (d) *fogo ativo*, é um termo utilizado para designar o fogo ardendo no momento da passagem do satélite; e (e) *focos de calor*, refere-se eventos com temperaturas que sensibilizam o sensor termal a bordo dos satélites Aqua e Terra, no momento da sua passagem. Pode ou não corresponder a uma queimada ou incêndio.

A identificação e quantificação de áreas queimadas a partir de dados orbitais podem ser abordadas sob dois pontos de vista distintos. O primeiro visa a observação das queimadas no momento em que estas estão ocorrendo, quando ainda estão ativas, utilizando a informação adquirida nas regiões do infravermelho termal (IVT) ou IVM do espectro eletromagnético. As plataformas orbitais utilizadas neste tipo de observação apresentam alta frequência de revisita (quase diária) associadas a uma moderada ou

baixa ou resolução espacial (entre 250 m² e 4 km²). No segundo caso, objetiva-se a observação das áreas após a ocorrência do fogo, mediante a discriminação da cicatriz do fogo deixada no terreno, utilizando dados adquiridos nas regiões do visível e do IVP. Normalmente, os sistemas sensores utilizados neste tipo de detecção são de alta resolução espacial.

As estimativas de áreas queimadas derivadas do número de focos de calor (indicativo de possíveis fogos ativos) têm sido comumente geradas com as bandas termal 3 (3,55-3,93 μm) e 4 (10,5-11,5 μm) do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), com resolução espacial de 1km x 1km (no nadir). Contudo, o uso desses dados apresenta certas limitações para monitorar fogos ativos ou detectar queimadas, já que o sensor AVHRR foi concebido para realizar observações meteorológicas, provocando incertezas nas estimativas de área queimada e, conseqüentemente, no cálculo das emissões globais de gases traço resultantes da queima de biomassa (KAUFMAN et al., 1990b).

Recentemente, dados do sensor MODIS têm sido utilizados nas estimativas de áreas queimadas tanto na detecção de fogos ativos, quanto na discriminação das cicatrizes do fogo. Este sensor permite a geração de imagens com resolução espacial de 250 a 1.000 m (na região do visível e IVP e na região do IVM e IVT, respectivamente) e possui frequência de revisita entre 1 e 2 dias no Equador (em condições ideais como ausência de nuvens ou recortes das bordas). Os valores de radiância detectados pelo sensor são quantificados em classes dinâmicas de 12 bits, o que implica em 4.096 níveis digitais (JUSTICE et al., 2002a).

Em relação ao AVHRR/NOAA, os dados obtidos a partir do sensor MODIS devem ser mais precisos e adequados ao monitoramento global e regular de superfícies queimadas, uma vez que apresenta melhoria significativa na geometria de aquisição de seus dados e bandas espectrais projetadas para a identificação de fogos ativos com valores de radiância de saturação mais altos (ROY et al., 2002).

Tradicionalmente, o uso de sensores de baixa resolução espacial tem demonstrado ser útil para monitorar os padrões espaço-temporais diários da atividade do fogo. Embora o monitoramento do fogo ativo utilizando a faixa do IVT esteja bastante avançado, a

capacidade dos sensores de baixa resolução para mapear, com precisão e tempo hábil, as cicatrizes do fogo, ainda está sendo demonstrada (ARINO et al., 2000).

Por outro lado, a baixa resolução espacial destes sensores, de 1,1 km no nadir e de 2,4 km fora do nadir, ao longo do sentido da órbita do satélite, e de 6,9 km ao longo do sentido da varredura do sensor, no caso do AVHRR; e de 1 km no nadir e de até 4 km fora do nadir, para o MODIS, pode ocasionar estimativas errôneas da área queimada, subestimando o número de focos de calor ao omitir queimadas menores do que a resolução espacial do sensor e, conseqüentemente, subestimando a área queimada (SETZER et al., 1994).

Em relação aos dados obtidos com o sensor MODIS, cabe destacar as distorções causadas nas imagens de Nível 1B (correção geométrica e radiométrica), em comparação com as imagens de Nível 0 (sem nenhum tipo de correções), como resultado da correção do efeito "*bowtie*". Este efeito, produto da oscilação do espelho no sistema de varredura "*cross-track*", o qual conduz a uma sobreposição de *pixels*, durante o imageamento, para ângulos de varredura acima de 25 graus em relação ao nadir, provoca distorções na radiometria e geometria dos novos *pixels* remapeados nas imagens de Nível 1B. Portanto, esses novos *pixels* podem não necessariamente representar o mesmo valor e posição dos *pixels* originais.

Sensores de alta resolução espacial, como o TM/Landsat e o SPOT, são freqüentemente utilizados para estimar áreas queimadas através da discriminação da cicatriz do fogo, em regiões relativamente pequenas e para estudos de caso. A discriminação das cicatrizes do fogo é comumente feita com a informação obtida na região do IVP (0,7 - 1,3 μm), já que as mudanças induzidas pelo fogo nas propriedades espectrais da vegetação são mais evidentes nesta região do que no visível, principalmente quando as condições anteriores ao fogo apresentam alto conteúdo de material combustível e os processos de combustão produzem grandes quantidades de resíduos de carvão vegetal (PEREIRA et al., 1997).

A resolução espacial destes sensores (30 e 20 m, respectivamente para o Landsat e o SPOT) os converte em instrumentos ideais para determinar o padrão espacial e quantificar com precisão adequada as áreas queimadas (EVA e LAMBIN, 1998). No

entanto, quando existe necessidade de informação para áreas extensas, esses sensores tornam-se inadequados, tanto no que diz respeito à resolução temporal quanto ao campo de visada. A resolução temporal (16 e 26 dias, respectivamente para o Landsat e o SPOT), juntamente com a presença de nuvens, dificulta a observação contínua da atividade do fogo. Por outro lado, o reduzido campo de visada dessas imagens impõe a aquisição de um grande número de imagens para análises regional ou global. Para o cobertura dos biomas Amazônia e Cerrado seriam necessárias cerca de 432 cenas TM/Landsat, ou seja 224 e 208 respectivamente para cada bioma (MMA, 2008; MMA, 2007).

2.1.2.1.1 Algoritmos para identificação e quantificação de áreas queimadas

Tendo em vista a necessidade de se mapear áreas queimadas em nível global, utilizando um grande número de dados orbitais, diferentes técnicas têm sido desenvolvidas para automatizar este procedimento. A quantificação de áreas queimadas pode ser feita através de algoritmos para mapeamento automático tanto dos fogos ativos, quanto das cicatrizes do fogo ou combinando ambas abordagens. O mapeamento automático pode ser feito mediante a observação direta do valor da radiância captada pelo sensor ou de maneira indireta, utilizando produtos derivados da combinação da informação entre diferentes regiões do espectro eletromagnético, como por exemplo, os índices de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - IVDN -, SAVI), o Índice de Monitoramento Ambiental Global (GEMI); entre outros, e a temperatura da superfície.

França (2001) desenvolveu um algoritmo de identificação e quantificação de áreas queimadas a partir de mosaicos quinzenais das imagens do sensor AVHRR, na região contínua do cerrado brasileiro. A identificação das áreas queimadas utilizando o algoritmo foi baseada em limiares de detecção para as bandas 1 (0,6 μ m), 2 (0,9 μ m) 3 (3,7 μ m) e para o IVDN visando diferenciar fogos ativos de outros alvos com características espectrais semelhantes (reflexos em solos agrícolas e corpos d'água). Os resultados obtidos foram calibrados com dados do sensor TM/Landsat e geradas duas equações para estimar a área queimada no Cerrado com $r^2 = 0,8$ e $0,7$. A área queimada

no período de 01/mai/98 a 30/abr/99 foi estimada em cerca de 429.000 km² (com intervalo de confiança de 96%), apontando para um erro inferior a 15% na quantificação anual de queimadas.

Conard et al. (2002) estimaram áreas queimadas em várias regiões da Rússia, durante o período de queimas do ano 1998, utilizando dados do sensor AVHRR. O método para mapeamento de áreas queimadas foi baseado na detecção de fogos ativos (bandas 3 e 4) e na discriminação de cicatrizes do fogo (bandas 2 e 3). O algoritmo combinou a informação de diferentes regiões do espectro valendo-se dos seguintes critérios: a) a localização e o tamanho dos fogos ativos foram utilizados para identificar cicatrizes do fogo em imagens obtidas após a ocorrência da queima; b) mudanças na cobertura vegetal foram mapeadas como queimadas somente se fogos ativos também fossem detectados; c) pequenas áreas de fogo ativo foram mapeadas como queimada unicamente se as correspondentes cicatrizes do fogo fossem discriminadas em imagens obtidas após a ocorrência da queima; e d) áreas extensas de fogos ativos foram mapeadas como queimadas quando os respectivos *pixels* apresentassem altas temperaturas durante 7 dias consecutivos, mesmo que não fosse possível a discriminação das cicatrizes do fogo durante o mesmo período.

Embora o uso de dados do sensor AVHRR seja amplamente utilizado para estimar a área queimada, é importante destacar as seguintes limitações deste sensor: a) detecta somente as queimadas ativas no momento da passagem do satélite, podendo não detectar queimadas ocorridas em horários diferentes daqueles das passagens do satélite; b) frentes do fogo menores do que 50 m ou sob dossel não são detectadas; c) a radiação solar refletida por corpos d'água ou solos expostos, para ângulos específicos de reflexão, podem apresentar a mesma assinatura espectral dos fogos ativos; e d) embora as bandas 3 e 4 possam ser utilizada para identificar a temperatura dos focos de calor, fogos ativos cobrindo apenas parte do *pixel* (0,01 – 0.1%) são suficientes para saturar a banda 3 deste sensor, superestimando as áreas queimadas (NOAA, 1985; Kaufman et al., 1990b; Robinson, 1991; Kidwell, 1991; Setzer, 1993).

Algoritmos envolvendo o uso de dados do sensor MODIS têm sido utilizados recentemente para quantificar áreas queimadas. Dentre os mais difundidos cabe destacar

o produto MOD14, desenvolvido pela equipe científica do *MODIS fire products*, disponível em cinco diferentes versões. Este algoritmo identifica a ocorrência de anomalias termais, estima a energia total emitida durante as queimadas e calcula o coeficiente entre as fases de combustão com e sem chama. O algoritmo utiliza uma árvore de decisão baseada na emissão de energia dos focos de calor nos comprimentos de onda de 4µm e 11µm, gerando estimativas com vários níveis de confiança, conforme os ângulos de incidência da fonte e de observação do sensor. Não obstante, Kaufman e Justice (1998) alertam para limitações deste algoritmo como: a) diferentes tipos de combustão cobrindo um mesmo *pixels* dificultam a caracterização do tipo de fogo (eficiência da combustão); e b) queimadas de pequeno porte ou com valores baixos de temperatura (provenientes de queimas com pouco material combustível) são de difícil detecção.

Roy et al. (2002) e Roy et al. (2008b) utilizaram dados de refletância da superfície obtidos com o sensor MODIS visando estimar áreas queimadas. O primeiro estudo é um protótipo do produto *Modis global burned area* (MCD45), anterior às cinco diferentes versões disponíveis na atualidade, referente a uma série temporal de 56 dias da região sul do continente africano, durante o período de queimas do ano 2000. A análise qualitativa dos resultados indicou que o algoritmo desenvolvido mostrou-se eficaz para a detecção de áreas queimadas na região estudada tanto na localização, quanto na identificação do dia aproximado de ocorrência das queimadas. Por outro lado, a análise individual das bandas de reflectância de superfície utilizadas mostrou que a banda 5 (1,230 -1,250 µm) apresentou a melhor discriminação entre áreas queimadas y não queimadas, seguida da banda 2 (0,841- 0,876 µm) e da banda 6 (1,628 - 1,652 µm).

O segundo estudo apresentou os primeiros resultados da versão 5 do produto *Modis global burned area* (MCD45) e os comparou com o produto MOD14. As áreas queimadas foram discriminadas por tipo de fisionomia vegetal afetada pelo fogo, em escala global e continental, entre julho de 2001 e junho de 2002. Os resultados indicaram que o produto MCD45 estimou em $3,66 \times 10^6$ km² a área queimada, enquanto que o produto MOD14 detectou para o mesmo período de estudo um total de $2,78 \times 10^6$

km²; ou seja, uma diferença de 24% para menos em relação ao estimado pelo produto MCD45.

Em ambos estudos as estimativas foram feitas utilizando um modelo bi-direcional de refletância invertido sob a premissa de que grande parte das variações na refletância observada é devido às variações do ângulo de visada e iluminação do sensor, ao longo do campo de visada (110°). Durante as passagens consecutivas do satélite, a exceção das altas latitudes, o restante do planeta é observado em diferentes ângulos de visada e iluminação em ciclos de 16 dias. Esta variação angular pode ser modelada invertendo o modelo bi-direcional de refletância em oposição a dados multitemporais de refletância da superfície. Assumindo que as condições da superfície terrestre não mudaram, os parâmetros do modelo invertido podem ser utilizados para prever observações em ângulos de visada e iluminação diferentes. Desta forma, qualquer divergência entre os valores preditos e os observados é atribuída às mudanças na cobertura da terra ou a alvos não terrestres (nuvens e sombras).

Os resultados obtidos com o produto MCD45 (área queimada) mostraram alta correspondência quando comparados qualitativamente com os produtos MOD14 (detecção de fogos ativos), assim como coerência espaço-temporal com a distribuição das queimadas. Porém, a validação destes resultados encontra-se em andamento e trabalhos futuros correlacionados devem considerar questões como: a) a operabilidade do algoritmo utilizando múltiplas bandas; b) como diferenciar mudanças na cobertura da terra causadas por queimadas daquelas ocasionadas por outro tipo de mudanças rápidas; e c) como seria o desempenho do algoritmo em regiões com diferentes regimes de queima.

Setzer et al. (2007) desenvolveram um algoritmo automático para detecção de áreas queimadas em imagens Modis baseado em França (2001) para imagens AVHRR do satélite NOAA-14, porém utilizando apenas duas classes: área queimada e área não queimada. O algoritmo relaciona a ocorrência de queimadas com mudanças na cobertura da terra utilizando a informação contida na região do visível para estimar o IVDN (atual) e de um IVDN de referência (máximo), e na região do IVM (bandas 1, 2, 20 e 21 do sensor MODIS, respectivamente).

Na aplicação deste algoritmo a detecção de *pixels* representativos de áreas queimadas é feita a partir das imagens diárias para, depois, gerar mosaicos quinzenais onde são totalizados os *pixels* de queimadas. Os autores constataram que este procedimento minimiza os erros de omissão na detecção de áreas queimadas, ocasionados pelo incremento do tamanho do *pixel* ao longo da linha de imageamento e pela geometria das imagens. Pela combinação destes dois aspectos, um *pixel*, que na imagem original (diária) representa uma queimada, pode desaparecer ou ter seu valor original alterado quando gerados os mosaicos (temporais) de bandas individuais ou de produtos derivados, já que durante a composição dos mosaicos utilizam-se critérios de substituição de *pixels* à medida que novas imagens são acrescentadas.

Para exemplificar as diferentes fases do processamento os autores selecionaram a cena Modis/Aqua (1km² de resolução espacial) do dia 08 de setembro de 2004, às 16:56 h, e definiram o Distrito Federal como área de trabalho. Os resultados indicaram que o algoritmo não apresentou erros de comissão (sobreestimativas de áreas queimadas), mostrando-se eficaz para a detecção automática da vegetação em estado de combustão ativa, já que na faixa de 3,7 a 4,0 μm os *pixels* representativos de áreas queimadas apresentam temperaturas muito mais altas do que a vegetação não afetada pela queima de biomassa. No entanto, para uma melhor análise do desempenho deste algoritmo é necessário comparar os resultados com estimativas a partir de focos de calor, bem como com validações de campo ou de imagens de média resolução espacial.

Os autores utilizaram uma grande queimada ocorrida no Parque Nacional de Ilha Grande, na divisa entre os estados do Paraná e Mato Grosso do Sul, no período de 30 de abril a 15 de maio de 2006, para realizar testes preliminares de validação visando aprimorar os limiares do algoritmo de detecção de áreas queimadas. Os resultados indicaram que o algoritmo testado estimou em 57 km² a área queimada, enquanto que a análise das imagens TM/Landsat-5 resultou em 220 km² de área queimada no parque; ou seja, o algoritmo automático das imagens Modis/Aqua subestimou a área queimada por um fator de 3,9 vezes. Dentre as possíveis causas para a subestimativa da área queimada os autores indicaram a baixa disponibilidade de imagens Modis/Aqua cobrindo a área estudada (apenas nove de dezesseis possíveis passagens do satélite),

limites conservativos das variáveis do algoritmo e a duplicação e omissão de blocos de 10 linhas nas imagens Modis causadas pelo efeito "*bow-tie*".

Em relação à determinação da extensão das áreas queimadas as dificuldades observadas na aplicação do algoritmo de detecção de áreas queimadas estão associadas a: a) baixa resposta espectral das áreas queimadas; b) o tamanho da maioria das queimadas no Brasil é menor à resolução espacial do sensor; c) a vegetação pode ter sido parcialmente queimada; d) a vegetação viva queima distintamente da vegetação morta; e) em áreas de pastos e cerrados a regeneração da vegetação ocorre em poucos dias mudando as propriedades espectrais do alvo; e f) as imagens Modis apresentam limitações técnicas intransponíveis que dificultam a comparação temporal de mosaicos.

2.1.2.1.2 Densidade da biomassa

Estimativas da densidade da biomassa (combustível da biomassa) é uma tarefa complexa devido à heterogeneidade da vegetação e às mudanças no uso e cobertura da terra, o que torna difícil obter valores atualizados, principalmente, para quantificar biomassa viva ou morta (PALACIOS-ORUETA et al., 2005). As estimativas deste parâmetro apresentadas na literatura têm sido feitas a partir de medições em campo, modelos ecológicos ou com dados de sensoriamento remoto (BOX et al., 1989).

A densidade da biomassa (combustível da biomassa) é definida como o total da vegetação viva ou morta acima do solo, passível de ser consumida pelo fogo (ignição e combustão) (WARD et al., 1996). O combustível propriamente dito refere-se às características da biomassa viva e morta (e.g., massa e densidade) que contribui com a propagação e severidade do fogo (BURGAN e ROTHERMEL, 1984). Normalmente, o termo densidade do combustível é utilizado para descrever a composição e as características físicas do combustível de uma área determinada; no entanto, devido à dificuldade desta tarefa, generalizações são feitas através de modelos de combustíveis (ANDERSON, 1982).

Os modelos de combustíveis representam o comportamento típico do fogo ou das condições do combustível para uma área específica. Segundo Rollins et al. (2004), os modelos atuais apresentam limitações para prever o comportamento do fogo, pois

estes não incluem informações suficientemente detalhadas sobre a densidade ou conteúdo de água no combustível.

Em estudos realizados na Amazônia, vários autores que estimaram este parâmetro encontraram variações com um fator de até 2 vezes, entre diferentes tipos de cobertura (e.g., FEARNSIDE, 1985; BROWN e LUGO, 1986). Ward et al. (1992) mediram a densidade da biomassa em áreas pilotos do cerrado e da Amazônia brasileira, no período de 28 de agosto a 04 de setembro de 1990, valendo-se de modelos de interseção planar. Para isto, foram definidas linhas de transectos antes da ocorrência das queimadas (30, 15 e 10, respectivamente para as florestas primárias e secundárias na Amazônia, e campos no cerrado).

As medições mostraram que ao longo do gradiente da vegetação do cerrado a densidade da biomassa incrementou-se de 0,71 a 1,00 kg m⁻²; enquanto que na fisionomia de florestas o conteúdo de biomassa estimado foi superior às fisionomias de campo por um fator de até quase 30 vezes; ou seja, 29,2 e 12,1 kg m⁻², respectivamente para as florestas primárias e secundárias na Amazônia. Para as fisionomias de campos a densidade da biomassa foi equivalente ao total da biomassa acima do solo, enquanto que na floresta semidecídua, os troncos e o dossel são relativamente resistentes ao fogo. O estudo mostrou também que o combustível fino morto queima totalmente, contribuindo significativamente com a propagação do fogo de superfície.

Kauffman et al. (1994) quantificaram o combustível da biomassa ao longo do gradiente de vegetação do cerrado (de campo limpo a cerrado *sensu stricto*), na Reserva Ecológica do IBGE, através de medições e coleta de material em campo. Os resultados apontaram para uma maior quantidade de combustível no cerrado *sensu stricto* (10.031 kg/ha), e menor na fisionomia de campo limpo (7.128 kg/ha). Nas fisionomias de campo limpo e campo sujo, as gramíneas representaram entre 91 e 94% do total da biomassa acima do solo. Nas fisionomias de campo cerrado e cerrado *sensu stricto*, as gramíneas compreenderam apenas 27% da biomassa acima do solo; a biomassa remanescente era composta de madeira morta (18%), liteira (36%) e folhas de arbustos (18%).

Dados de sensoriamento remoto também são utilizados para estimar a densidade da biomassa, principalmente, com a informação contida na região óptica do espectro

eletromagnético, a partir da qual são derivados diferentes índices de vegetação. Em nível regional ou global, é comum utilizar dados do sensor AVHRR/NOAA ou MODIS/Terra-Aqua. Porém, para obter maior precisão nas estimativas, os índices de vegetação devem ser estimados com dados de alta resolução espacial, a exemplo do TM/Landsat.

Barbosa et al. (1999) estimaram emissões de gases-traço e aerossóis a partir da quantificação da biomassa total queimada e de fatores de emissão obtidos com parâmetros biofísicos. A densidade da biomassa foi estimada com dados da literatura e com o IVDN (AVHRR). Os resultados alcançados mostraram uma subestimação da biomassa queimada em relação aos valores encontrados na literatura. Entre 1985 e 1991 os autores estimaram a biomassa queimada entre 704 e 2168 Tg, verificando variações com um fator de até 3,3 vezes para menos, em relação aos valores estimados por Hao et al. (1990) e Hao e Liu (1994) de 2.818 e 2.320 Tg, respectivamente.

Palacios-Orueta et al. (2004) estimaram emissões atmosféricas a partir da queima de biomassa em savanas do continente Africano, baseados no modelo proposto por Seiler e Crutzen (1980). Parâmetros como a densidade da biomassa e a eficiência da queima foram modelados com dados de sensoriamento remoto dentro de um contexto espacial e temporal, visando melhorar a precisão nas estimativas de emissões. Na metodologia proposta pelos autores, a estimativa da densidade da biomassa foi baseada na variação espacial dos índices de vegetação (IVDN), obtidos com dados do sensor SPOT-Vegetation, no período de um ano.

Cabe notar que o IVDN tem sido amplamente utilizado por diversos autores como substituto da produção de biomassa em diferentes ecossistemas; demonstrando, em escala global, que existe alta correlação entre estas duas variáveis (BARBOSA et al., 1999; BOX et al., 1989). No entanto, é importante ressaltar que o IVDN é sensível à biomassa verde, mas não a outros componentes como troncos e galhos que, em muitos ecossistemas, representam a maior parte da biomassa. Assim sendo, o uso desta metodologia é apropriada em ecossistemas de savana ou campos, porém sua aplicação em áreas de florestas não está comprovada.

Outra variável importante que contribui com a precisão nas estimativas refere-se à disponibilidade de informação atualizada sobre o combustível da biomassa. Nos ecossistemas de savana ou campos, é possível atualizar as estimativas deste parâmetro relacionando a quantidade de biomassa com os intervalos de retorno do fogo (recorrência), já que altas taxas de recorrência podem ser indicativas de baixa disponibilidade de biomassa.

Um exemplo desta metodologia é apresentado por Olson (1981), ao reconhecer a relação inversa que existe entre a quantidade de biomassa e a frequência e intensidade do fogo. A partir desta relação o autor estabeleceu diferentes categorias de recorrência para os principais ecossistemas do mundo. Scholes et al. (1996a) incluíram as recorrências em estimativas da biomassa total consumida pelo fogo, relacionando o regime de queima com categorias de vegetação. Desta forma, os autores inferiram a quantidade de biomassa em função dos intervalos de retorno do fogo. Contudo, cabe destacar que neste tipo de procedimento há o risco de se associar erroneamente regimes de queima aos tipos fisionômicos, principalmente quando os mapas de vegetação disponíveis encontram-se em escalas grosseiras.

Estimativas da densidade da biomassa podem ser feitas através do mapeamento do combustível utilizando dados de sensoriamento remoto, envolvendo técnicas de processamento de dados. Segundo Keane et al. (2001), duas estratégias são utilizadas para mapear o combustível em diferentes escalas. A primeira associa de forma direta as características do combustível ao resultado da classificação de imagens ou da interpretação de fotos aéreas. A segunda estratégia utiliza dados orbitais de forma indireta, substituindo as características dos ecossistemas pela densidade do combustível. Esta abordagem parte do princípio de que é possível classificar algumas propriedades biofísicas e biológicas da vegetação com dados orbitais, já que estes atributos estão bem correlacionados com as características do combustível ou com os modelos de combustíveis.

McKinley et al. (1985) classificaram diretamente em um mapa de vegetação as características do combustível estimadas com o IVDN e componentes principais, calculadas a partir da composição de imagens AVHRR. Em escala mais detalhada,

Merrill et al. (1993) estimaram biomassa viva em gramíneas do Parque Nacional de Yellowstone (Estados Unidos), utilizando modelos de regressão nas bandas 4, 6 e 7 do sensor MSS/Landsat. Waring e Running (1998) estimaram a biomassa do dossel a partir do Índice de Área Folhar (IAF) utilizando área foliar específica (kg/m^2). Salas e Chuvieco (1994) classificaram imagens TM/Landsat diretamente com o mapa de modelos de combustível de Anderson (1982).

Apesar desta abordagem ser considerada uma técnica simples que minimiza a propagação de erros, como aqueles provenientes da classificação da vegetação, deve-se alertar que a exatidão do mapeamento direto do combustível é adequada para estimar biomassa total viva ou morta em ecossistemas de savana ou arbustivo (FRIEDL et al., 1994; Millington et al., 1994). Porém, em áreas florestadas, apresenta limitações importantes na discriminação entre combustíveis da superfície e do dossel, já que este último impede ao sensor detectar o sub-bosque (ELVIDGE, 1988; BELWARD et al., 1994).

Novos métodos para estimar a densidade da biomassa utilizam dados de sensores ativos como os radares de abertura sintética (SAR) e de luz polarizada (Light Detection and Ranging - LIDAR), este último emite pulsos entre as faixas do ultravioleta e o IVP. No caso do radar, a informação obtida com esse sensor proporciona estimativas precisas sobre a altura e a quantidade de vegetação, utilizando sistemas múltiplos de polarização, de ângulos de visada e de bandas de observação. Embora as resoluções espacial e temporal sejam mais adequadas para estudos em nível local, o atual crescimento dos sistemas de radar orbital possibilitaria no futuro próximo, a realização de estimativas de biomassa em nível global (PALACIOS-ORUETA et al., 2005).

Em relação aos dados obtidos com o sensor LIDAR, as metodologias utilizadas apontaram para uma alta precisão deste sensor quando utilizado para estimar a altura e a área basal de comunidades arbóreas. Apesar da ampla difusão deste sensor em várias plataformas orbitais, problemas técnicos têm dificultado sua operabilidade. No entanto, a futura disponibilidade destes dados também possibilitaria estimativas de biomassa em nível global (PALACIOS-ORUETA et al., 2005).

Embora diferentes métodos sejam utilizados para estimar a densidade da biomassa com dados e técnicas de sensoriamento remoto, é importante destacar que existem incertezas nas medições deste parâmetro quando obtidas com dados orbitais. Uma das propriedades mais importante do combustível que contribui notavelmente com a incerteza nas estimativas de biomassa é a sua alta variabilidade espacial e temporal. Por outro lado, existe muita dificuldade para discriminar tipos diferentes de combustível utilizando dados orbitais, devido à disparidade entre o tamanho do material combustível e a resolução espacial das imagens. O combustível fino é muito pequeno para ser detectado pelos sensores que operam atualmente e, normalmente, encontra-se escondido sob a vegetação rasteira (FINNEY, 1998).

2.1.2.1.3 Eficiência da queima

É considerado um dos parâmetros de maior incerteza utilizados para estimar a biomassa queimada devido à alta variabilidade espacial do combustível e da sua disponibilidade, a qual não depende só das características dos ecossistemas, mas também das condições ambientais locais (CARVALHO et al., 2001). Desconsiderando a influência da precipitação, a eficiência da queima depende da quantidade de água contida nas plantas e do combustível fino (vivo ou morto) consumido pelo fogo (MENAUT et al., 1991).

O conteúdo de água nas plantas varia segundo cada espécie. Na estação seca, a camada herbácea da vegetação (composta principalmente por folhas de gramíneas) apresenta baixo conteúdo de água (20 a 30%), enquanto que no estrato arbustivo este valor é maior (cerca de 50%). A disponibilidade de água influencia nas mudanças fenológicas da vegetação e determina a proporção relativa do material vivo e morto (MENAUT et al., 1991). O material fino morto é mais propenso à combustão e à influência do fogo do que a vegetação viva (devido ao alto conteúdo de água) e do que outros componentes do combustível da biomassa (PALACIOS-ORUETA, et al., 2005).

Antes da queima, a proporção de matéria morta é significativamente maior na vegetação herbácea seca do que na úmida. Considerando a proporção relativa de material vivo e morto e o respectivo conteúdo de água em ambos, a proporção de água contida no estrato graminóide decresce gradativamente desde o final do período úmido, momento

em que a biomassa atinge seu máximo valor (cerca de 50% de água), até o auge do período seco (cerca de 30% de água). Portanto, queimadas que ocorrem no início do período seco consomem menores quantidades de combustível do que aquelas ocorridas durante o final deste período, apresentando uma baixa eficiência de combustão e, conseqüentemente, diferenças significativas nas emissões atmosféricas (MENAUT et al., 1991).

Em escala global, as estimativas do conteúdo de água no material combustível são normalmente feitas a partir de índices meteorológicos, utilizando variáveis como a temperatura do ar, a umidade relativa, a precipitação e a velocidade do vento. Em uma primeira aproximação estes índices parecem ser adequados para estimar a eficiência da queima (MACK et al., 1996); contudo, para modelar este parâmetro são requeridas medições distribuídas espacialmente de forma contínua, a qual é praticamente inviável neste tipo de escala considerando a escassez ou ausência de dados meteorológicos em certas áreas do planeta (PALACIOS-ORUETA, et al., 2005). Por outro lado, os índices meteorológicos são adequados para estimar o conteúdo de água em combustíveis finos secos, porém seu uso não é apropriado na vegetação viva ou em combustíveis de maior tamanho (VINEY, 1991; VIEGAS et al., 2001).

Vários autores têm estimado valores médios de eficiência da queima para diversos ecossistemas e tipos de cobertura da terra, utilizando diferentes métodos. Scholes et al. (1996a) estimaram a quantidade de combustível consumido utilizando um mapa de vegetação do Hemisfério Sul do continente africano, reclassificando as classes originais em tipos fisionômicos com regimes de queima similares. A partir desta reclassificação os autores definiram cinco tipos de combustível diferentes, modelando a acumulação do combustível para cada ano investigado.

Dados de sensoriamento remoto são utilizados para estimar a eficiência da queima através do mapeamento da severidade do fogo após a ocorrência das queimadas. O mapeamento da severidade do fogo permite avaliar os efeitos da variabilidade na distribuição espaço-temporal do fogo na vegetação como, por exemplo, a mortalidade das plantas e o regime de queima (WHITE et al., 1996; MEDLER e YOOL, 1997; LAMBIN, 2003). Dados orbitais também são apropriados para monitorar o conteúdo de

água no combustível vivo combinando índices de vegetação (e.g., variação temporal do IVDN) com a temperatura da superfície (PALTRIDGE e BAKER, 1988).

Barbosa et al. (1999) estimaram a quantidade de biomassa queimada em um período de 6 anos utilizando como parâmetros a área queimada, a densidade da biomassa e a eficiência da queima. Este último parâmetro foi estimado com base no Índice de Verdor Relativo (RGI), o qual é calculado a partir do coeficiente entre o IVDN atual e os IVDN máximo e mínimo do período de estudo. O uso do RGI visa discriminar as variações sazonais da vegetação das mudanças espaciais (e.g., mudança na cobertura da terra). Por este motivo, é considerado adequado para detectar as alterações no conteúdo de água nos combustíveis.

No entanto, a relação entre o conteúdo de água nos combustíveis e o IVDN tem sido recentemente questionada, depois de demonstrado que este índice de vegetação não é tão sensível às variações do conteúdo de água quanto à quantidade de clorofila da vegetação; além de se comprovar que as estimativas de eficiência da queima utilizando o IVDN são mais precisas em comunidades herbáceas do que em comunidades arbustivas ou florestais (CECCATO, et al., 2001; CHUVIECO et al., 2003).

Outros estudos têm sugerido o uso das refletâncias da região do IVP e do IVM como melhor estimador do conteúdo de água (Índice Infravermelho por Diferença Normalizada - IIDN), em substituição do IVDN (baseado nas refletâncias da região do vermelho e do IVP). Chuvieco et al. (2004) relacionaram o conteúdo de água em combustíveis com a temperatura da superfície e com o IIDN, obtidos com dados orbitais de diferentes resoluções (TM/Landsat, Vegetation/SPOT e AVHRR/NOAA), visando estimar a eficiência da queima em ecossistemas Mediterrâneos (gramíneas e arbustais). Os resultados deste trabalho apontaram para uma boa correlação entre o conteúdo de água nos combustíveis e a refletância do IVM, para ambos ecossistemas. Essa correlação aumentou quando a refletância do IVM foi substituída pelo índice de vegetação.

Após a estimativa da quantidade de biomassa consumida pelo fogo (Equação 2.1), a massa total de uma espécie química determinada (e.g., carbono) emitida para a atmosfera durante a queimada é relacionada com M (Equação 2.2):

$$M(C) = C \times M$$

(2.2)

Em que, $M(C)$ é a massa total de carbono emitida (peso); e C é o conteúdo de carbono na biomassa (combustível) queimada (adimensional). Neste caso, C é geralmente assumido como sendo 45% da massa do combustível consumida pelo fogo (M) (SCHOLLES et al., 1996b), variando entre 40 e 50% dependendo do tipo fisionômico afetado pelo fogo (CRUTZEN e ANDREAE, 1990; PRINCE et al., 1995).

Posteriormente, a massa total de CO_2 emitida durante a queimada [$M(CO_2)$] (peso) pode ser relacionada com $M(C)$ através da eficiência da combustão (EC) (adimensional), utilizando a seguinte Equação:

$$M(CO_2) = EC \times M(C) \quad (2.3)$$

Onde, EC corresponde à fração de carbono emitido como CO_2 em relação à quantidade total de carbono emitido durante a queimada [$M(C)$].

Cabe explicar aqui que a massa total emitida durante a queimada pode ser estimada para qualquer espécie química. No entanto, esse cálculo é feito, preferencialmente, para o CO_2 ou o CO (considerados como gases de referência), já que a partir da massa total emitida em cada um destes gases é possível correlacionar as emissões dos gases restantes, dependendo do tipo de combustão ocorrida (com ou sem chama). (PALACIOS-ORUETA et al., 2005).

2.1.2.1.4 Eficiência da combustão

A eficiência da combustão é um parâmetro fundamental que integra grande parte das variáveis que afetam a oxidação do combustível da biomassa (WARD e HARDY, 1991). O tipo de ignição associado à estrutura e composição da vegetação e às condições climáticas (principalmente o conteúdo de umidade) influenciam a eficiência da combustão e, conseqüentemente, a biomassa consumida e as taxas de emissões. (WARD et al., 1992).

A eficiência da combustão representa a contribuição relativa de duas fases que ocorrem durante as queimadas: a combustão com e sem chama. A fase da combustão com chama é mais eficiente do que a sem chama, e resulta na emissão de maiores proporções de espécies químicas como CO₂, NO, NO₂, N₂O e N₂, porém menores quantidades de gases de combustão incompleta como CO, CH₄ e outros hidrocarbonetos que não metano (NMHC) (KASISCHKE et al., 1995).

A extensão e o tempo de ocorrência do fogo são variáveis importantes, pois a combustão com chama predomina no início do fogo e dura poucos minutos devido à rápida oxidação do combustível fino disponível. A fase de combustão com chama (alta temperatura e disponibilidade de oxigênio) está associada a taxas de emissões altas (ANDREAE e MERLET, 2001). A eficiência da combustão nesta fase tem sido medida em uma ampla variedade de incêndios e normalmente encontra-se acima de 0,90 (para valores de referência entre 0 e 1) (WARD e HAO, 1991). Por outro lado, taxas de emissões em fogos que ocorrem durante a noite são mais baixas do que durante o dia (FERGUSON et al., 2000).

A maioria dos valores encontrados na literatura refere-se a estimativas deste parâmetro feitas para os ecossistemas de savana e floresta. Ward et al. (1992) estimaram a eficiência de combustão em áreas de cerrado e na floresta tropical úmida (Amazônia). Na vegetação de savana e campos a eficiência da combustão foi de 0,94 durante a fase de combustão com chama (90% da biomassa queimada), e de 0,90 na fase de combustão sem chama (apenas 10% da biomassa queimada). Para a floresta primária e secundária foram encontrados valores de eficiência menores, sendo que na fase de combustão com chama a eficiência foi de 0,88 (apenas 20% da biomassa queimada) e de 0,80 na fase de combustão sem chama (80% da biomassa queimada).

Resultados obtidos por Kauffman et al. (1994), ao longo do gradiente de vegetação do cerrado, mostraram que nas fisionomias de campo limpo e campo sujo a combustão sem chama esteve ausente após a fase de combustão com chama. Inversamente, nas fisionomias de campo cerrado e cerrado *sensu stricto* (particularmente em combustíveis lenhosos vivo e morto) prevaleceu a combustão sem chama. A eficiência de combustão

foi estimada em 95, 92,5 e 93,5%, respectivamente para as fisionomias de campo limpo, campo cerrado e cerrado *sensu stricto*.

2.1.2.2 Estimativa de emissões atmosféricas em relação à quantidade de biomassa consumida

2.1.2.2.1 Fator de emissão

Outra forma de representar as emissões de gases de efeito estufa é através de um fator de emissão (FE), definido como a quantidade de uma determinada espécie química emitida para a atmosfera [$M(X_i)$] em relação à quantidade do combustível (seco) consumido ($M_{biomassa}$) (Equações 2.4 e 2.5). O cálculo destes parâmetros requer o conhecimento da quantidade de carbono contida na biomassa queimada e do balanço de carbono durante a queimada; os quais são de difícil quantificação em campo, ao contrário do que acontece quando medidos em laboratório onde são facilmente determinados. O carbono total emitido é normalmente estimado através do somatório das concentrações de CO_2 , CO , hidrocarbonetos e particulados de carbono, quando disponíveis.

$$FE(X_i) = \frac{M(X_i)}{M_{biomassa}} = \frac{M(X_i)}{M(C)} (C) \quad (2.4)$$

$$FE(X) \cong \frac{(X)}{\sum [(C_{CO_2}) + (C_{CO}) + (C_{CH_4}) + \dots]} (C) \quad (2.5)$$

Onde $FE(X_i)$ é o fator de emissão para uma espécie química determinada e expressa-se comumente em gramas de uma espécie química por kg de matéria seca (biomassa consumida), (X) é a concentração de uma determinada espécie química na pluma de fumaça e $[(C_{CO_2}) + (C_{CO}) + (C_{CH_4}) + \dots]$ correspondem às concentrações de várias espécies de carbono na pluma de fumaça. De maneira alternativa, o balanço de carbono de uma queimada pode ser estimado mediante a multiplicação do CO_2 na pluma de fumaça vezes um fator assumido representativo das emissões de carbono que não- CO_2 .

Assim, a massa total da espécie (X_i) emitida é relacionada com a biomassa total consumida através da seguinte Equação:

$$M(X_i) = FE(X_i) \times M \quad (2.6)$$

Finalmente, é importante salientar que as medições utilizadas no cálculo do EF estão disponíveis unicamente para algumas áreas específicas do planeta ou para experimentos realizados em laboratório. Portanto, o uso deste modelo em áreas onde as mudanças na cobertura da terra são freqüentes (e.g., áreas de floresta convertidas para outros usos) ou que apresentam alta variabilidade entre diferentes classes de cobertura (e.g., florestas em oposição a savanas), ocasiona altos níveis de incerteza nas estimativas de emissões; em razão da dificuldade de se aplicar coeficientes precisos.

2.1.2.3 Estimativa de emissões atmosféricas em relação a um gás de referência

2.1.2.3.1 Quociente de emissão

O quociente de emissão, estimado a partir de experimentos em condições específicas de queima, é a razão entre a concentração de uma espécie química e a concentração de uma espécie de referência (CO_2 ou CO) emitida durante a queimada [$ER(X_i)$] (adimensional).

A partir do momento em que é estimada a massa de CO_2 emitida, a massa de qualquer outra espécie química [$M(X_i)$] (peso de um determinado gás/período determinado) produzida durante as queimadas e liberada para a atmosfera pode ser estimada em relação a uma espécie de referência (neste caso o CO_2 , mas poderia ser também em relação ao CO), normalizada para cada espécie química, através de [$ER(X_i)$]. Por exemplo, o quociente de emissão para uma espécie determinada (X_i) em relação ao CO_2 , seria:

$$ER_{(X_i | CO_2)} = \frac{\Delta X_i}{\Delta CO_2} = \frac{(X_i)_{fumaça} - (X_i)_{ambiente}}{(CO_2)_{fumaça} - (CO_2)_{ambiente}} \quad (2.7)$$

Desta forma, a massa total da espécie (X_i) emitida é relacionada com a massa total de CO_2 emitida [$M(CO_2)$], através de [$ER(X_i)$].

$$M(X_i) = ER(X_i) \times M(CO_2) \quad (2.8)$$

Em que (X_i) pode ser qualquer uma das espécies de gases-traço (CO, CH₄, NO_x, NH₃, O₃, etc).

A escolha do gás de referência é feita com base nos objetivos definidos em uma análise determinada ou em função do tipo de combustão (com chama ou sem chama) na qual o gás de referência predomina. O CO é predominantemente emitido durante a fase de combustão sem chama; assim, é considerado um gás de referência adequado para estimar outras espécies emitidas durante esta fase. Segundo Andreae e Merlet (2001) altas correlações têm sido observadas entre os gases emitidos durante a fase sem chama e o CO, o que torna mais precisa as estimativas de emissões de gases-traço na qual as emissões de CO são previamente conhecidas. Inversamente, correlações entre os gases emitidos durante a fase sem chama e o CO₂ são relativamente mais baixas.

Por outro lado, espécies de gases emitidas durante a fase com chama apresentam boa correlação com o CO₂; portanto, considerado um gás de referência adequado para essas espécies químicas. Em razão de que a maior parte da quantidade de carbono emitido durante uma queimada é na forma de CO₂, o quociente de emissão de um determinado gás em relação ao CO₂ permite estimar a emissão de gases-traço baseado na quantidade de biomassa queimada. Por este motivo, o quociente utilizando o CO₂ como gás de referência é o parâmetro mais adequado para estimativas de emissões em nível regional e global. Contudo, quando as características da combustão não são conhecidas, é comum utilizar um fator de emissão para estimar o CO₂, e *EC* para estimar outros gases (com o CO₂ como referência) (ANDREA E MERLET, 2001).

A estimativa de emissões atmosféricas baseadas no quociente de emissão não requer conhecimento sobre a composição nem a quantidade do combustível consumido; portanto, este procedimento torna-se adequado para estudos em campo, particularmente para medir a concentração de espécies nas plumas de fumaça em lugares onde usualmente não existe informação sobre o combustível (PALACIOS-ORUETA 2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição e localização da área de estudo

A área de estudo compreende duas regiões ecológicas: a) a região do bioma Amazônia, com uma área de cerca de 4.197.000 km², abrangendo em sua totalidade os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Roraima, a maior parte de Rondônia (98,8%), parte de Mato Grosso (54%), Maranhão (34%) e Tocantins (9%) representando 49,29 % do território brasileiro; e b) a região do bioma Cerrado com uma área de cerca de 2.037.000 km², ocupando a totalidade do Distrito Federal, grande parte dos estados de Goiás (97%), Tocantins (91%), Maranhão (65%), Mato Grosso do Sul (61%), Minas Gerais (57%), além de porções menores dos estados Mato Grosso, Piauí, Bahia, Maranhão, São Paulo e Paraná, ocupando 23,92 % do território brasileiro (IBGE, 2004) (Figura 3.1).



FIGURA 3.1 - Localização da área de estudo.
FONTE: Adaptada de IBGE (2004)

3.2 Material

3.2.1 Produtos orbitais

Para a realização deste estudo foram utilizados diferentes produtos orbitais obtidos a partir do sensor MODIS, a bordo dos satélites Aqua e Terra e do sensor TM, a bordo do satélite Landsat (Tabela 3.1). No total foram empregados quatro produtos de áreas queimadas disponibilizados em endereços eletrônicos ou como resultado da aplicação de procedimentos automáticos de detecção de queimadas: a) *Produto Anomalia Termal (MOD14)*, b) *Algoritmo de Detecção de Mudanças (MCD45)*, c) *Algoritmo de Detecção de Área Queimada*, e d) *Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas*. As áreas queimadas empregadas para a validação dos produtos orbitais utilizados são o resultado da interpretação visual de cenas TM/Landsat (INPE/DGI, *on-line*).

O produto MOD14 utilizado para a detecção de anomalias termais foi obtido através da pagina web: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>. O produto Algoritmo de Detecção de Queimadas (SETZER et al., 2007) foi aplicado a partir das imagens MODIS/Aqua brutas, disponíveis na pagina web: <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/areasimg.php>. Por fim, o produto Mapeamento de Cicatrizes do Fogo empregado na detecção de áreas queimadas, foi obtido a partir das imagens refletância de superfície do sensor MODIS/Terra, disponíveis na pagina web: <https://wist.echo.nasa.gov>.

TABELA 3.1 - Características dos produtos orbitais utilizados.

Produtos de queimadas	Fonte do dado	Aplicação	Orbita/Ponto ou Tiles	Resolução
Áreas Queimadas (Validação)	TM bandas 3,4 e 5	Validação dos produtos de queimadas	002/067 (Acre) e 231/67 (Rondônia)	-Resolução espacial: 30 m. -Resolução temporal: 16 dias
MOD14	MODIS Terra Bandas 21, 22 e 31	Detecção de queimadas (anomalias termais).	Faixas de 2.350 km	-Resolução espacial: 1 km. -Resolução temporal: quase diário.
MCD45	MODIS Aqua e Terra. Bandas 2, 5 e 7	Detecção de áreas queimadas	- H10/V09; - H11/V08 até H11/V10; - H12/V08 até H12/V11; e - H13/V08 até H13/V11	-Resolução espacial: 500 m (bandas 2, 5, 6 e 7); 500 m -Resolução temporal: mosaicos mensais
Algoritmo de Detecção Área Queimada	MODIS Aqua. Bandas 1, 2, 20 e 21	Detecção de áreas queimadas	Faixas de 2.350 km.	-Resolução espacial: 250 m (bandas 1 e 2); 1 km (bandas 20 e 21) -Resolução temporal: quase diário
Mapeamento de Cicatrizes do Fogo	MODIS Terra. Bandas 1, 2 e 6	Detecção de áreas queimadas.	- H10/V09; - H11/V08 até H11/V10; - H12/V08 até H12/V11; e - H13/V08 até H13/V11	-Resolução espacial: 250 m (bandas 1 e 2); 500 m (banda 6) -Resolução temporal: quase diário

O período de estudo compreendeu todos os meses do ano 2005, contudo na quantificação das áreas queimadas utilizando o produto “Mapeamento de Cicatrizes do Fogo” o período de estudo foi determinado com base ao período de maior ocorrência de queimadas, definido pelos focos de calor registrados pelo Programa Proarco (INPE/CPTEC, *on-line*). Assim, para a região do bioma Amazônia foi desconsiderada da análise os meses de maio e junho (2005), entendidos como meses de muito baixa ocorrência de queimadas (LIMA et al.; 2009). No caso do bioma Cerrado, o período de estudo compreendeu o período seco do ano 2005 (maio a dezembro), onde se concentra a maior ocorrência de queimadas nesta região.

É importante destacar que os meses excluídos em ambas regiões estudadas referem-se aos respectivos períodos chuvosos caracterizados por uma alta cobertura de nuvens, o qual dificulta a identificação de áreas queimadas, e pela ocorrência pouco expressiva de queimadas. Portanto, para fins de este estudo, as queimadas ocorridas durante os meses

chuvosos do ano 2005, que não foram mapeadas pelo produto "Mapeamento de Cicatrizes do Fogo", é considerada desprezível (cerca de 1%) em relação aos produtos restantes.

3.2.2 Dados cartográficos e temáticos

Mapas de vegetação e uso da terra provenientes dos projetos PROBIO Amazônia (MMA, 2007) e Cerrado (MMA, 2004), na escala de 1:250.000, e do Projeto RADAMBRASIL (1981) (1:500.000) foram utilizados para identificar os diferentes tipos fisionômicos da vegetação estudada, visando estimar a quantidade do material combustível afetado pelo processo de queima de biomassa. As áreas de floresta e campos convertidas para outros usos (corte raso) foram identificadas com dados do Projeto PRODES (desmatamento bruto), obtidos com imagens do sensor Landsat/TM (resolução espacial de 30 x 30 m), reamostrados para 60 x 60 m pela FUNCATE para o II Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, *no prelo*).

3.2.3 Aplicativos computacionais

Para o processamento dos dados orbitais foram utilizados os aplicativos SPRING (Sistema para Processamento de Informações Georeferenciadas) (CÂMARA et al., 1996), TeraScan (*Remote Sensing Software Ground Station*) e MRT (*Modis Reprojection Tool*); respectivamente para os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, *Detecção de Área Queimada* e *MCD45*.

A integração dos produtos temáticos foi realizada com o auxílio dos aplicativos SPRING, ENVI (*Environment for Visualizing Images*), ARCGIS e TerraView (Projeto TerraView). Os programas computacionais desenvolvidos para o cruzamento da informação temática utilizaram a linguagem computacional LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), incorporado ao aplicativo SPRING, e IDL (*Interactive Data Language*), integrado ao aplicativo ENVI.

3.3 Metodologia

Neste capítulo são apresentadas as rotinas metodológicas utilizadas no desenvolvimento do trabalho. O estudo foi dividido em quatro fases indicadas no fluxograma apresentado na Figura 3.2 e detalhadas a seguir.

- a) Criação do Banco de Dados e Processamento dos Dados Orbitais, aquisição dos produtos de áreas queimadas, e registro e processamento dos dados orbitais e temáticos;
- b) Quantificação das áreas queimadas e caracterização das áreas afetadas pela queima de biomassa;
- c) Atualização dos mapas de vegetação e avaliação dos produtos de áreas queimadas;
- d) Estimativa da biomassa queimada e do conteúdo de CO₂; e
- e) Estimativas das emissões globais brutas de GEE.

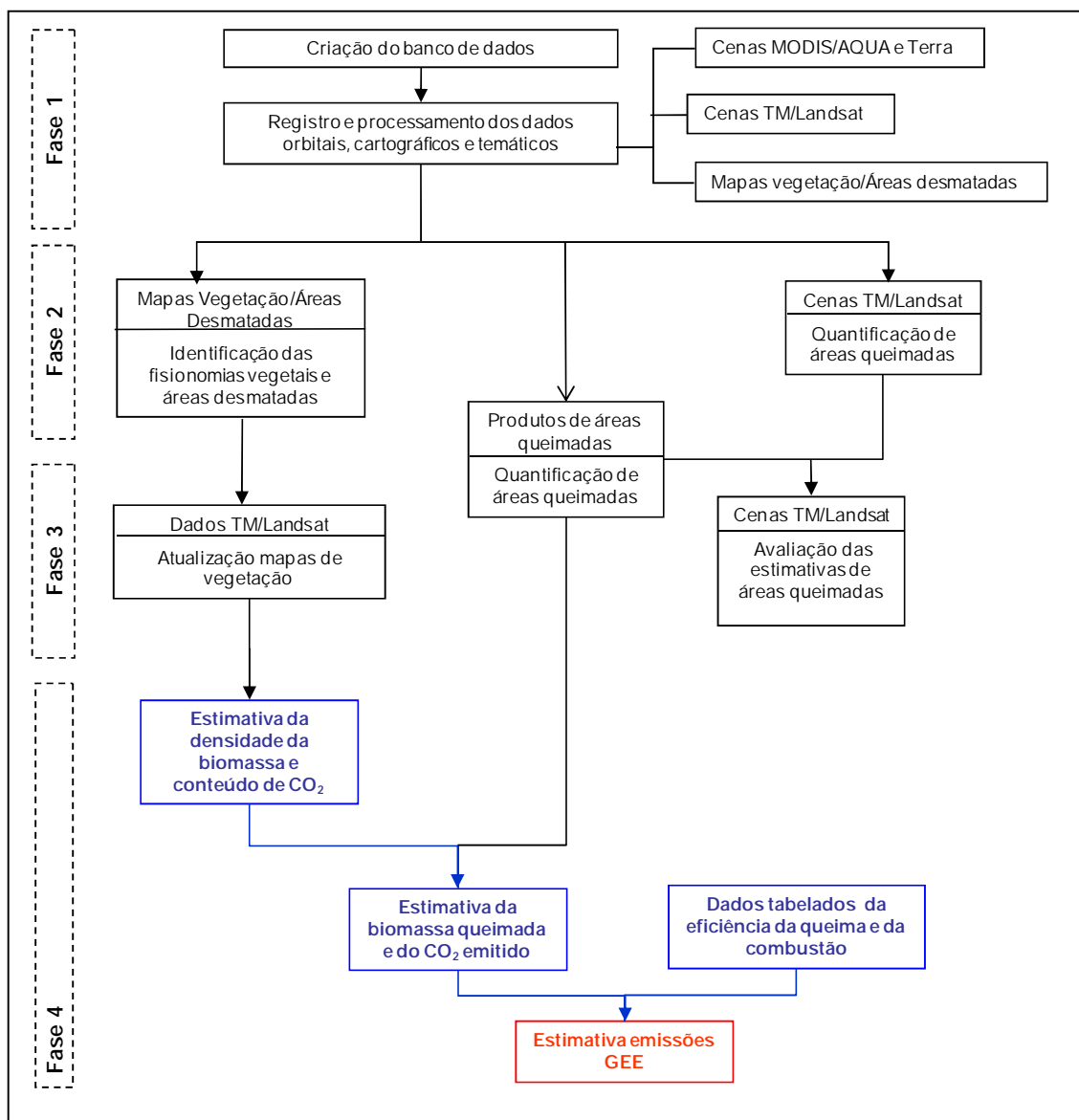


FIGURA 3.2 - Fluxograma geral do trabalho.

3.3.1 Criação do Banco de Dados e Processamento dos Dados Orbitais

Para a realização deste estudo foi criado um banco de dados georreferenciado utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG), no qual foram armazenados os dados orbitais, os produtos de áreas queimadas dos sensores MODIS e TM, os mapas de vegetação da área de estudo e os produtos temáticos resultantes dos cruzamentos e da interpretação desses dados. A escala de trabalho adotada foi de 1:500.000, determinada

com base na escala de levantamento da informação temática e na resolução espacial dos produtos MODIS (250, 500 e 1000 m),

3.3.2 Geração de Produtos de Queimadas

Os produtos de queimadas utilizados neste estudo foram o resultado da aplicação de algoritmos automáticos, do modelo linear de mistura espectral e de procedimentos de interpretação e edição visual de imagens MODIS e TM, visando a quantificação e distribuição de queimadas, conforme as propriedades espectrais (tanto emissivas quanto refletivas) que apresenta o fogo ativo e as cicatrizes do fogo em diferentes regiões do espectro eletromagnético, a saber:

- a) No momento em que estas estão ocorrendo, quando estão ativas (fogo ativo), utilizando a informação adquirida na região termal;
- b) Após a ocorrência do fogo (cicatrizes do fogo), mediante a detecção da cicatriz do fogo deixada no terreno, utilizando dados adquiridos principalmente na região do visível, IVP e IVM do espectro eletromagnético; ou ainda combinando esses procedimentos.

A seguir são descritos os diferentes procedimentos utilizados neste estudo para a identificação e a quantificação de áreas queimadas.

3.3.2.1 Produto Anomalia Termal (MOD14)

O produto MOD14 é um algoritmo para detecção de anomalias termais (indicativas de queimadas) desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), baseado no algoritmo de detecção de fogos ativos do AVHRR/NOAA e do TRMM VIRS. O algoritmo inclui vários parâmetros relacionados ao fogo, como a ocorrência de anomalias termais, agrupadas em diferentes classes de temperatura, com base na energia emitida pela queimada (JUSTICE, 2006). As anomalias termais são agrupadas diariamente com uma resolução espacial nominal de 1 km (INPE, *on-line*).

O algoritmo utiliza as temperaturas de brilho das bandas 21 e 22 (centradas em $4 \mu m$), denotadas como T_4 , com limiares de saturação nas temperaturas de 500 K e 331 K, respectivamente; e da banda 31 (centrada em $11 \mu m$), denotada como T_{11} , com limiar de saturação cerca dos 400 K. Considerando que a banda de saturação mais baixa (banda 22) apresenta menor ruído e menor erro de quantização, T_4 é obtida, sempre que possível, por esta banda; caso contrario utiliza-se a banda de saturação mais alta (21). A banda 1 (centrada em $0,65 \mu m$) e a banda 2 (centrada em $0,86 \mu m$), reamostradas de sua resolução espacial nominal de 250 m para 1 km, é também utilizada para identificar superfícies altamente refletivas, possíveis ocasionadoras de falsas detecções de queimadas. Esta refletância é denotada por ρ_2 (JUSTICE et al., 2002a).

A estratégia de detecção de fogos ativos é baseada na detecção absoluta de *pixels* de queimadas com sinal suficientemente forte (fogos ativos primários), e na detecção relativa da emissão termal dos *pixels* do entorno que apresentam sinal mais fraco (fogos ativos do entorno). A detecção relativa permite identificar *pixels* com valores de temperatura muito elevados, acima da emissão termal dos pixels do entorno. Essa estratégia permite determinar variações da temperatura da superfície e da refletividade causadas pela radiação solar (JUSTICE et al., 2002a).

A seguir são apresentados os procedimentos adotados no algoritmo MOD14 para a identificação de fogos ativos:

a) Verificações preliminares

Para evitar falsas detecções de queimadas todos os *pixels* que apresentarem $T_4 < 325$ K (305 K à noite) ou $T_4 - T_{11} < 10$ K (3 K à noite) ou $\rho_2 > 0,3$ (somente durante o dia) são imediatamente eliminados como possíveis queimadas.

Para realizar uma detecção absoluta de *pixels* de queimadas, o algoritmo requer que pelo menos uma das duas condições seja satisfeita:

- $T_4 > 360$ K (330 K à noite)
- $T_4 > 330$ K (315 K à noite) e $T_4 - T_{11} > 25$ K (10 K à noite)

Caso nenhuma destas condições seja atingida o algoritmo prossegue a realizar a detecção dos fogos ativos do entorno, nos quais o *pixel* de queimada é identificado a partir dos valores médios dos *pixels* do entorno, multiplicado por três vezes os desvios padrões de T_4 e $T_4 - T_{11}$:

- $T_4 > \text{média}(T_4) + 3\text{desvios_padrões}(T_4)$; e

- $T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3\text{desvios_padrões}(T_4 - T_{11})$

Assumindo que ao redor de um *pixel* de fogo primário a temperatura decresça proporcionalmente à distância; a média, a mediana e o desvio padrão são calculados para os pixels que estão dentro de uma grade expansível, centrada em um pixel que aspire ser considerado como queimada, até que seja identificado um número considerável de pixels do entorno representativos de nuvens, água ou não queimadas. Esse número corresponde a 25% dos *pixels* vizinhos dentro de uma grade, em um mínimo de seis *pixels*.

Pixels representativos dos corpos d'água são identificados mediante uma máscara externa previamente definida, e os de nuvens são identificados com uma máscara de "nuvens" obtida a partir do produto MODIS (MOD35). Cabe ressaltar que os *pixels* do entorno considerados como não queimadas serão identificados como tal quando: $T_4 < 325 \text{ K}$ (305 K à noite) e $T_4 - T_{11} < 20 \text{ K}$ (10 K à noite). Caso algum dos desvios padrões seja inferior a 2 K, o valor de 2 K é utilizado no seu lugar.

Assim sendo, a extensão da grade para identificar os fogos ativos do entorno que se encontram ao redor de fogos primários pode aumentar em até um máximo de 21×21 *pixels*, a fim de se delimitar o entorno destes últimos daqueles *pixels* representativos de nuvens, água ou não queimadas. Caso esse limite seja alcançado e a condição anterior relativa ao número de pixels do entorno válidos não for atingida (25% representando nuvens, água ou não queimadas), então o procedimento de detecção relativa de queimadas é desconsiderada. Por outro lado, se a detecção absoluta de queimadas não conseguir identificar fogos ativos nesta situação, o algoritmo rotulará o *pixel* como sendo "desconhecido".

b) Aplicação do algoritmo

Unificando as verificações anteriores em uma única expressão, um *pixel* será classificado pelo algoritmo como sendo uma queimada, quando utilizado para cálculos diurnos, se as seguintes condições são cumpridas:

$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3\text{desvios_padrões}(T_4) \text{ ou } T_4 > 330 \text{ K}\};$ e

$\{T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3\text{desvios_padrões}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}\};$ ou

$T_4 > 360 \text{ K}$

Quando utilizado para cálculos noturnos, o algoritmo transforma-se para:

$\{T_4 > \text{média}(T_4) + 3\text{desvios_padrões}(T_4) \text{ ou } T_4 > 315 \text{ K}\};$ e

$\{T_4 - T_{11} > \text{mediana}(T_4 - T_{11}) + 3\text{desvios_padrões}(T_4 - T_{11}) \text{ ou } T_4 - T_{11} > 10 \text{ K}\};$ ou

$T_4 > 330 \text{ K}$

Finalmente, possíveis falsas detecções de queimadas ocorridas durante o dia são eliminadas se os *pixels* nas bandas 1 e 2 apresentarem uma refletância acima de 30% e estiverem dentro do ângulo de reflexão especular de 40°. Cabe salientar que embora o produto *Anomalia Termal* não possa ser considerado um produto para a quantificação de áreas queimadas, o uso deste tipo de algoritmos nos modelos de estimativas de emissões globais de GEE decorrentes de queimadas tem sido amplamente utilizado (Boschetti et al., 2004)

3.3.2.2 Algoritmo de detecção de mudanças (MCD45)

O produto MCD45 é um algoritmo para mapeamento de áreas queimadas (cicatrices deixadas pelo fogo) desenvolvido pela NASA a partir da informação obtida em séries temporais de imagens de refletância de superfície do sensor MODIS/Terra (Produto MOD09/TERRA, nível de processamento L2G), bandas 2 (0,841- 0,876 μm), 5 (1,230 -

1,250 μm) e 7 (2,105 - 2,155 μm), com resolução espacial nominal de 250 m (banda 2) e 500 m (bandas 5 e 7) (NASA, *on-line_a*).

O algoritmo vale-se do modelo Função de Distribuição da Refletância Bidirecional de Superfície (BRDF) para detectar, em uma série temporal de dados diários, a data aproximada de mudanças na cobertura da terra (e. g. queima de biomassa). A BRDF é utilizada para modelar as variações das refletâncias de superfície devidas à variação nos ângulos de elevação solar e de visada do satélite (dependência direcional da refletância), presente em campos de visada amplos como o do sensor MODIS. A BRDF é utilizada para prever mudanças nas refletâncias de superfície, em relação a um estado previamente observado (ROY et al., 2008a).

Essas variações angulares para as imagens MODIS estão representadas graficamente em coordenadas polares na Figura 3.3. Na aplicação do algoritmo MCD45 não foram consideradas observações com ângulo de visada zenital acima de 45° , já que a área observada pelo campo de visada instantâneo (IFOV) do sensor MODIS incrementa-se rapidamente a partir deste ângulo (WOLFE et al., 1998).

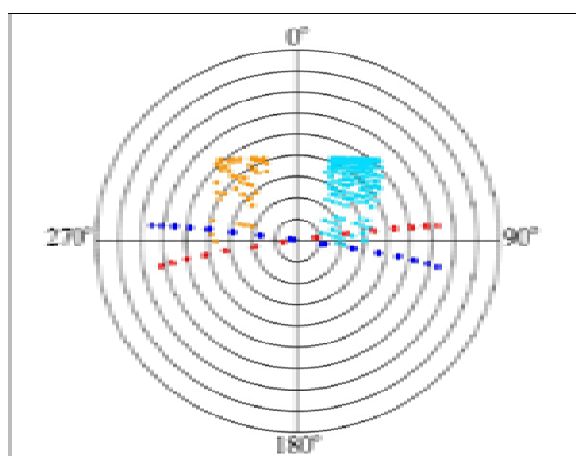


FIGURA 3.3 - Variação angular relativa a 220 dias de observações da refletância de superfície para um mesmo *pixel* georreferenciado, mostrando a geometria de visada (satélites Terra em azul e o Aqua em vermelho) e a geometria solar (satélite Terra em ciano e o Aqua em laranja). Os raios representam o incremento do ângulo zenital de 0° a 90° (valor máximo da geometria de visada do sensor MODIS em 65°). Os eixos x e y representam o incremento do ângulo azimutal.
FONTE: Adaptado de Justice et al. (2006).

As variações da refletância de superfície observadas pelo sensor (diminuição ou incremento), em função dos ângulos de elevação solar e de visada (fonte de iluminação-superfície terrestre-sensor), descritas através da BRDF, influenciam a refletância de um determinado *pixel* quando observado ao longo de uma série temporal (Figura 3.4). Essas variações dificultam a caracterização das diferentes coberturas da terra ocasionando falsas detecções de mudanças terrestres como, por exemplo, a ocorrência de uma queimada (diminuição da refletância) (ROY et al., 2002).

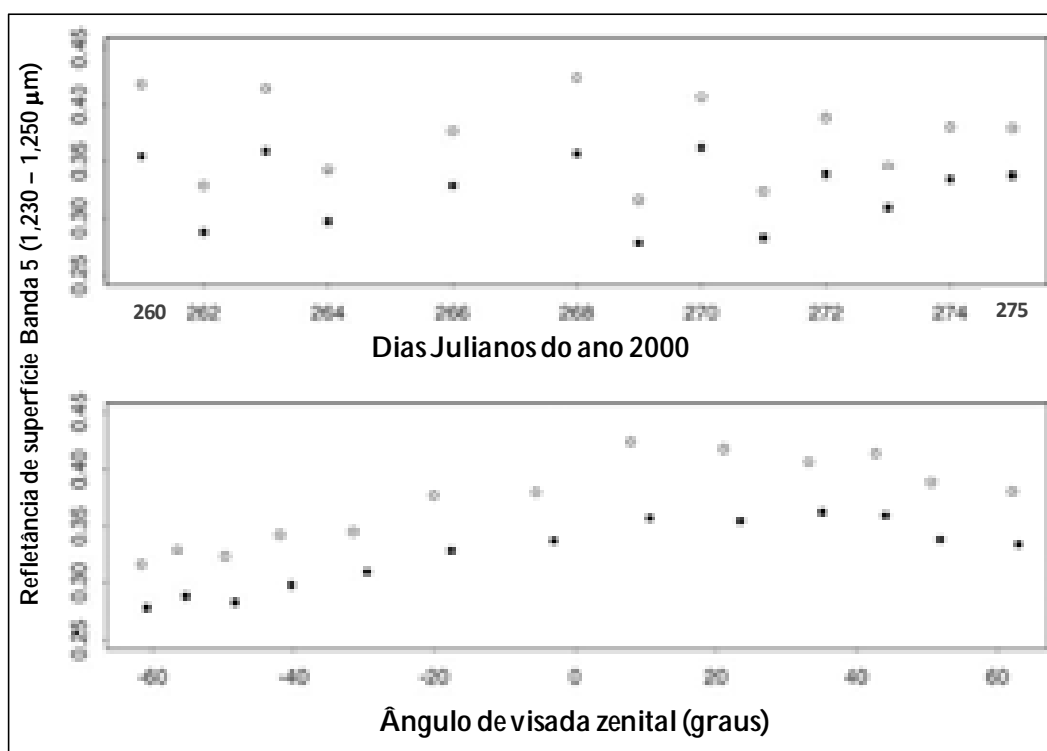


FIGURA 3.4 - Exemplo da refletância de superfície para um *pixel* representativo de área queimada (círculos cheios) e um *pixel* de área não queimada (círculos vazios) da banda 5 do sensor MODIS, observados em um período de 16 dias (16 de setembro a 01 de outubro de 2000; dia Juliano 260 a 275) para o ângulo de iluminação solar médio de 26°. FONTE: Adaptada de Roy et al. (2002).

Essa dificuldade em se diferenciar alvos terrestres sucede, principalmente, quando utilizados mosaicos temporais de imagens ou índices espectrais para mapeamento de queimadas, como pode ser deduzido na Figura 3.5 (para as mesmas variações angulares da Figura 3.3); onde a diminuição da refletância de um *pixel* representando uma

queimada, causada por efeitos da BRDF, é menor do que as variações das refletâncias do mesmo pixel observado antes da ocorrência da queimada (JUSTICE et al., 2006).

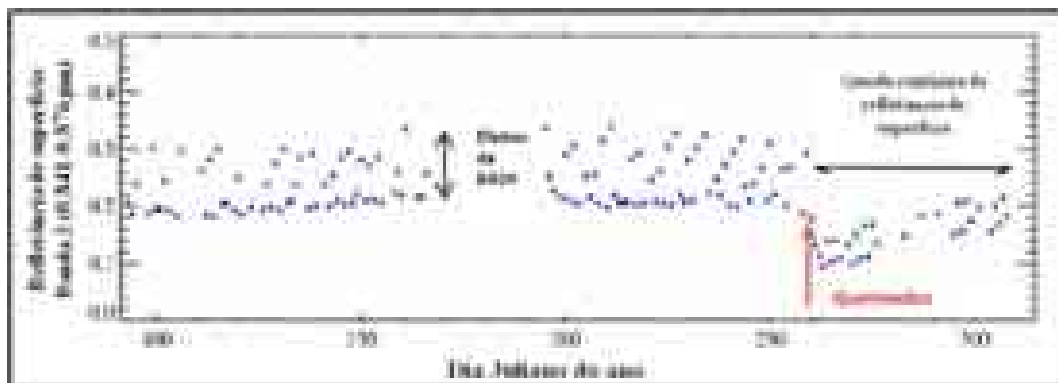


FIGURA 3.5 - Efeitos da Função de Distribuição da Refletância Bidirecional de Superfície em uma série temporal de dados diários da banda 2 (0,841-0,876 μm) do sensor MODIS para um mesmo *pixel*.
FONTE: Adaptado de Justice et al. (2006).

No entanto, é importante destacar que a BRDF é utilizada pelo algoritmo MCD45 para observar as variações angulares encontradas nos dados MODIS, valendo-se logo de medições estatísticas para detectar as probabilidades de ocorrência de mudanças na cobertura da terra; e não para minimizar os efeitos da dependência direcional da refletância, como é o caso de mapeamentos de queimadas utilizando índices espectrais.

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados na geração do produto MCD45, segundo Roy et al. (2002) e Roy et al. (2005).

a) Estimativa dos valores preditos utilizando o modelo de refletância bidirecional

A metodologia utilizada para a geração do produto MCD45 baseia-se na inversão do modelo linear de kernels, em função dos ângulos de visada do satélite e de iluminação solar, conhecidos como RossThick-LiSparseReciprocal BRDF. No algoritmo MCD45 essa inversão é feita para cada *pixel* georreferenciado das bandas 2 e 5, em um mínimo de sete observações da refletância de superfície ($m \geq 7$) (valores recentes observados), selecionadas em séries temporais de dezesseis dias de refletâncias observadas (janela temporal de $n = 16$).

Um mínimo de sete observações é definido visto que estudos realizados indicaram que observações menores ocasionam resultados instáveis (GAO et al., 2002). Por outro lado, são definidas janelas temporais de dezesseis dias já que para diferentes ângulos de visada e iluminação (a exceção das altas latitudes terrestres), o planeta é observado pelos satélites Terra e Aqua em ciclos de dezesseis dias. Ou seja, a observação de um mesmo *pixel*, em iguais condições de geometria de iluminação e de visada do sensor, só acontece a cada dezesseis dias.

A refletância bidirecional de superfície (BRF) observada pelo sensor, em função dos ângulos de elevação solar e de visada (fonte de iluminação-superfície terrestre-sensor), em um determinado comprimento de onda ($\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$), pode ser determinada por:

$$\rho(\lambda, \Omega, \Omega') = \underline{P} \cdot \underline{K} \quad (3.1)$$

Onde, Ω e Ω' são os ângulos de visada e iluminação, respectivamente; \underline{P} representa o vetor dos parâmetros angulares (iluminação e visada); e \underline{K} é o vetor contendo os valores kernel.

Assim, a detecção de mudanças terrestres pelo algoritmo é realizada invertendo o modelo BRDF em oposição às refletâncias bidirecionais (BFR) observadas (m), utilizando os parâmetros resultantes do modelo para prever valores de refletâncias e das incertezas associadas (BFR) para os ângulos de visada e iluminação das observações subsequentes (valores preditos) (equações 3.1 e 3.2), no intuito de fornecer valores prováveis da refletância de superfície (Figura 3.6).

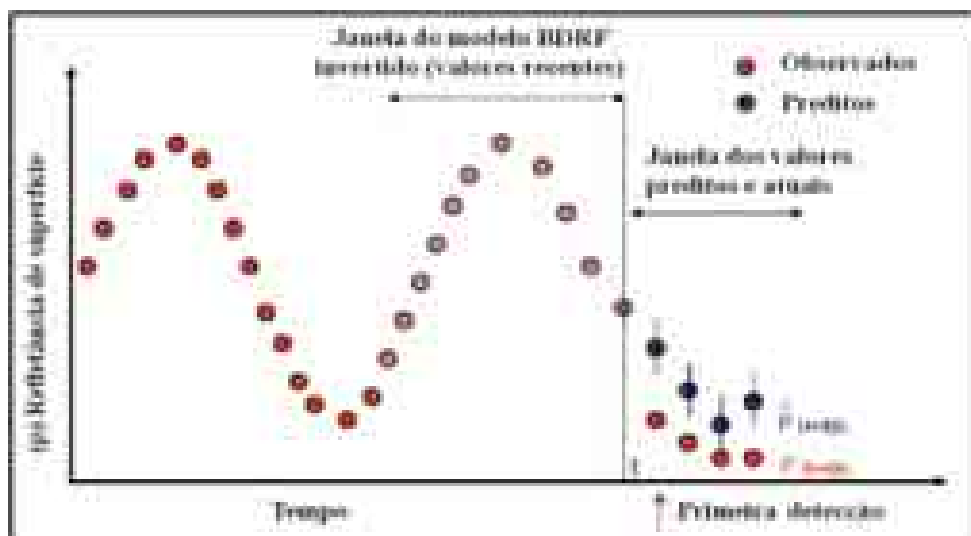


FIGURA 3.6 - Diagrama conceptual da implementação do algoritmo MCD45 para detecção de mudança terrestre, indicativa de possíveis áreas queimadas.

FONTE: Adaptado de Roy et al. (2002).

Posteriormente, medições estatísticas são aplicadas para determinar qualquer discrepância expressiva entre valores preditos e valores atuais observados, as quais podem ser atribuídas a mudanças persistentes na cobertura da terra (indicativas de possíveis ocorrências de queimadas) ou temporárias (e. g. nuvens, sombras e ruídos). Desta forma, poderão ser mapeadas cicatrizes deixadas por fogos recentes, excluindo queimadas precedentes (ROY et al., 2002).

b) Limiares estatísticos

Após a inversão do modelo BRDF emprega-se um *Z-score* como uma medida normalizada, relacionando a magnitude deste valor (Z_i) à possibilidade de que um novo valor observado (atual) não possua a mesma BRDF das observações utilizadas no modelo BRDF invertido (valores recentes $m \geq 7$) (2). Ou seja, o *Z-score* é estimado para testar se realmente existem mudanças nas refletâncias de superfície das observações subseqüentes (valores preditos) (Figura 3.7).

$$Z_i = \frac{\rho_a(\lambda, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda, \Omega, \Omega')}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\sigma_\lambda^2} + e^2 \frac{1}{w}$$

Onde, Z_i é o valor do Z-score; $\rho_a(\lambda, \Omega, \Omega')$ é um novo valor de refletância observado; $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor de refletância predito pelo modelo em um determinado comprimento de onda (λ), estimado mediante a inversão do modelo BRDF em oposição às observações recentes (m) da refletância de superfície (i. e. anteriores às preditas); Ω e Ω' são os ângulos de visada e iluminação, respectivamente, dos novos valores de refletância observados; ε é o erro do modelo BRDF de predição, onde σ_λ é um valor fixo estimado do ruído (desvio padrão) em $\rho_a(\lambda, \Omega, \Omega')$, e é raiz quadrada média dos resíduos do modelo BRDF invertido, e w é o peso de determinação de $\rho_a(\lambda, \Omega, \Omega')$.

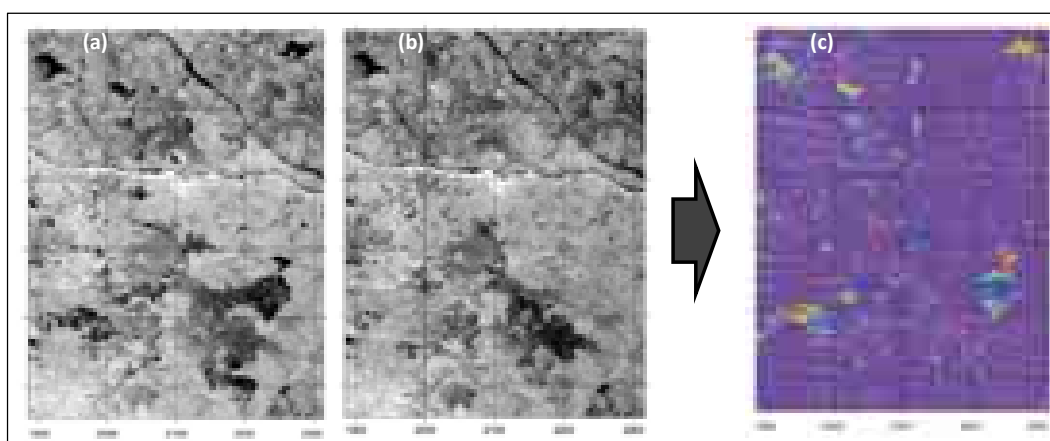


FIGURA 3.7 - Exemplo das refletâncias de superfície da banda 5 do sensor MODIS referente ao dia 01 de outubro de 2000 (dia Juliano 275): (a) refletância observada; (b) refletância predita e (c) resultado do Z-score estimado mostrando as mudanças nas refletâncias em (a) e (b), em escala colorida (mudanças persistentes não incluem branco nem cinza).

FONTE: Adaptado de Roy et al. (2002).

c) Comparações entre bandas

Em seguida, a partir dos resultados do Z-score (Equação 3.2) são detectadas mudanças na superfície terrestre associadas às áreas queimadas (candidatas a queimadas),

utilizando operadores lógicos para testar os resultados obtidos em relação a limiares espectrais definidos pelas características do ruído nas refletâncias observadas e pelas propriedades espectrais da vegetação afetada pelo fogo (Z_{limiar} e $\lambda_{banda\ 7}$).

Portanto, novas observações da refletância (valores atuais) serão consideradas como candidatas a áreas queimadas (detectadas como mudanças na superfície terrestre) se:

$$(Z_{banda2} < (-) Z_{limiar}) \text{ ou } (Z_{banda5} < (-) Z_{limiar}) \quad (3.3)$$

Onde, Z_{banda2} é o Z -score da banda 2 definido na equação 3.2; e Z_{limiar} é um limiar de refletância preestabelecido para um determinado comprimento de onda com a finalidade de detectar somente mudanças nas refletâncias observadas (observações atuais), diferenciando-as das refletâncias esperadas (preditas) que foram modeladas a partir da inversão (BRDF) das observações recentes (Figura 3.6).

Esta condição é ilustrada na Figura 3.7, onde valores acima do limiar estabelecido ($Z_{banda5} > Z_{limiar}$), representados em cor branca, são rejeitados (indicativos de nuvens). Em cinza são representados valores não estimados devido à falta de dados e as demais cores representam valores abaixo do limiar estabelecido ($Z_{banda5} < Z_{limiar}$), indicativos de mudanças terrestres (candidatas a áreas queimadas).

Cabe comentar que quando Z_{λ} for negativa (-), isto é $\rho_a(\lambda, \Omega, \Omega')$ é menor que $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ (equação 3.2), estará indicando que houve uma queda nas refletâncias observadas das bandas 2 ou 5 em relação às refletâncias preditas, após a ocorrência do fogo. Assim, quedas nas refletâncias causadas por queimadas (entre outras mudanças) resultam em valores negativos do Z_{λ} persistentes durante vários dias, enquanto que incrementos nas refletâncias (e.g. presença de nuvens, ruídos entre outros) resultam em valores positivos do Z_{λ} ; portanto, valores do Z_{λ} acima do limiar estabelecido (Z_{limiar}) são rejeitados já que não estão associados com as queimadas.

Isto pode ser verificado na Figura 3.8, onde é apresentada a localização de um *pixel* representativo de uma queimada ocorrida no dia Juliano 275. Note-se que a magnitude da queda (~0,15) na refletância observada (triângulos vazios) em relação à predita

(triângulos cheios), representada por uma ampla variação (negativa) do *Z-score* (-5,57), difere significativamente das pequenas variações nos dias prévios à ocorrência da queimada (não mais do que 0,03), com magnitudes do *Z-score* abaixo de 1,82. Cabe ressaltar que a variação expressiva da refletância observada (triângulo vazio) e o valor equivalente do *Z-score* (positivo) do dia 270 é causado pela presença de nuvens ou ruídos.

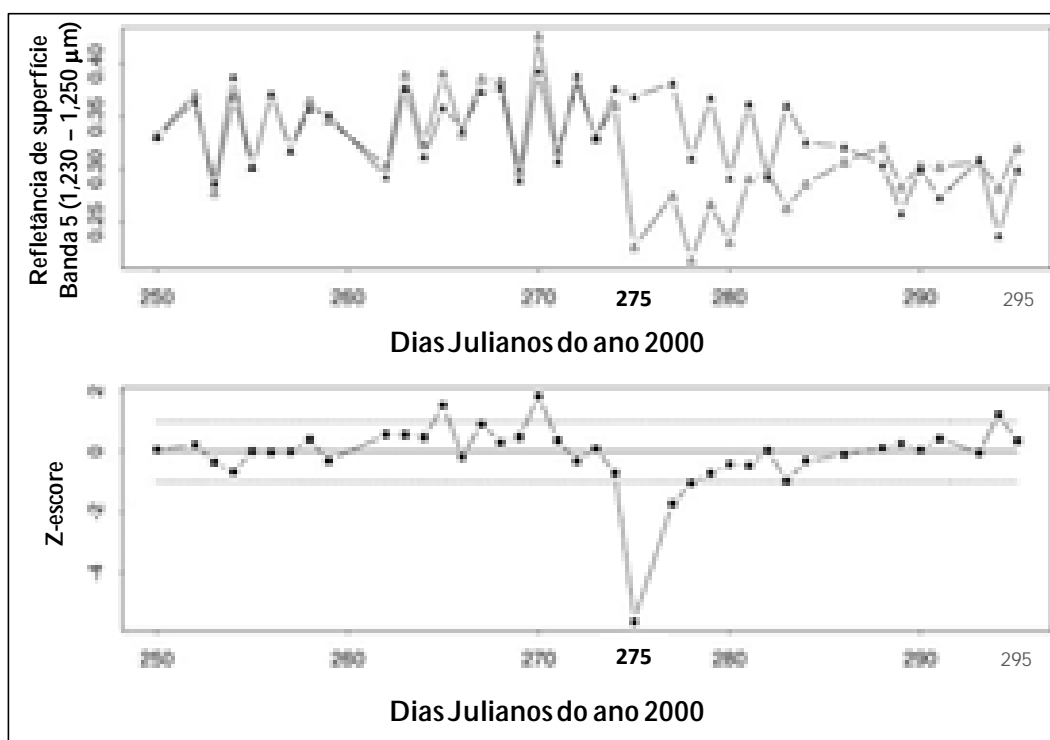


FIGURA 3.8 - Exemplo de uma série temporal de refletâncias de superfície observadas (triângulos vazios) e BRF preditas (triângulos cheios) da banda 5 do sensor MODIS e os correspondentes valores *Z-score* (pontos negros), para um mesmo *pixel* observado em um período de 46 dias (7 dias sem dados), desde 07 de setembro a 22 de outubro de 2000 (dia Juliano 250 a 295). Neste exemplo a ocorrência da queimada corresponde ao dia Juliano 275.

FONTE: Adaptado de Roy et al. (2002).

Também, novas observações da refletância serão consideradas como candidatas a áreas queimadas, se:

$$\rho(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho a(\lambda_{banda5}, \Omega, \Omega') - \rho a(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega'), \text{ e} \quad (3.4)$$

$$\rho(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega') > \rho_a(\lambda_{banda2}, \Omega, \Omega') - \rho_a(\lambda_{banda7}, \Omega, \Omega')$$

Onde, $\rho(\lambda, \Omega, \Omega')$ é o valor da refletância predita estimada a partir da inversão da BRDF frente a um mínimo de sete observações de refletâncias de superfície detectadas ($m \geq 7$).

A condição (3.4) é aplicada levando em conta que a banda 2 contribui na remoção dos *pixels* relativos às mudanças associadas ao incremento do conteúdo de água nas folhas, contrário ao esperado em comprimentos de ondas maiores, como nas bandas 5 e 7, onde esta relação é negativa (FENSHOLT e SANDHOLT, 2003; ZARCO-TEJADA et al., 2003). Por outro lado, as bandas 2 e 5 provêm a maior diferença espectral entre áreas queimadas e não queimadas como resultado da diminuição persistente da refletância durante vários dias, após a ocorrência do fogo (cicatrices do fogo).

Isto pode ser observado na Figura 3.9 para uma região cobrindo parte dos estados Amazonas, Pará e Mato Grosso (ROY et al.; 2005), onde as refletâncias de superfície das cicatrizes do fogo detectadas entre 01 a 31 de agosto de 2002 apresentaram uma redução significativa da refletância nas bandas 2 e 5, em relação às refletâncias das áreas não queimadas representadas graficamente pelo maior valor da distância Bhattacharyya ($\sim 0,12$); porém mudanças desprezíveis da refletância na banda 7 (0,02).

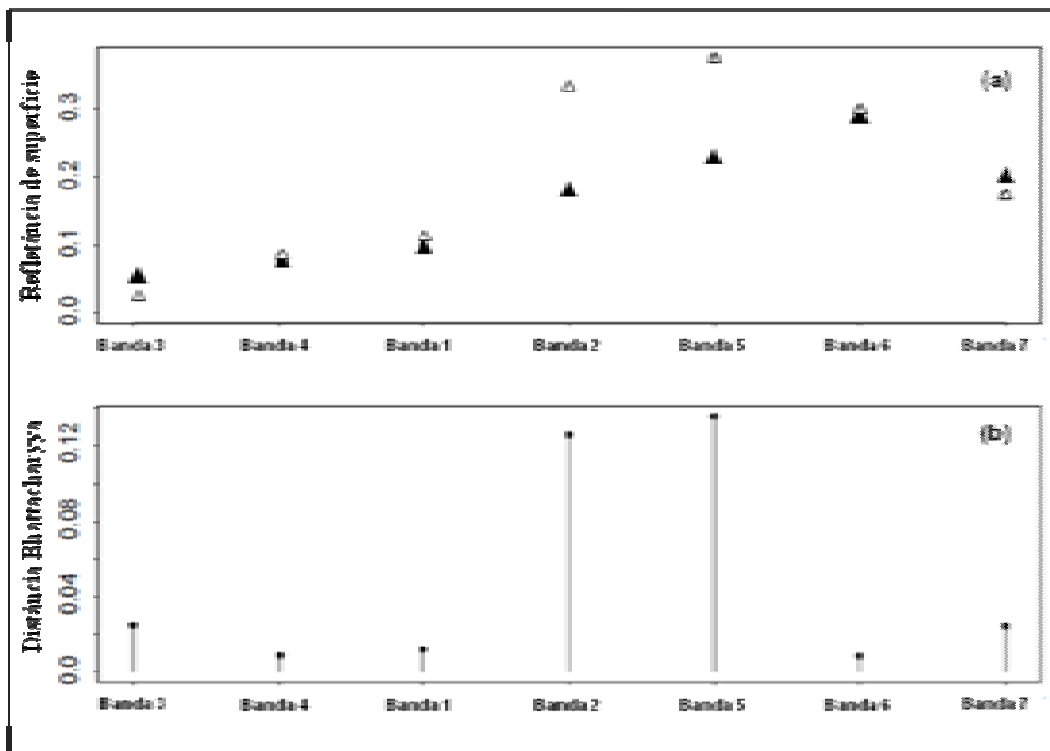


FIGURA 3.9 - (a) Refletâncias de superfície características das áreas queimadas (cicatrices do fogo) (triângulos cheios) e não queimadas (triângulos vazios) observadas nas bandas do visível e do infravermelho próximo do sensor MODIS, detectadas entre os dias 01 e 31 de agosto de 2002; (b) separação (distância Bhattachayya) entre as refletâncias de superfície de áreas queimadas e não queimadas.
 FONTE: Adaptado de Roy et al. (2005).

Assim, novas observações da refletância são consideradas como candidatas a áreas queimadas se as diferenças entre as refletâncias dos valores observados e preditos, obtidos a partir das bandas 2 e 5, experimentam um decréscimo em relação à banda 7 (condições 3.3 e 3.4).

d) Implementação multitemporal do algoritmo

Durante a implementação do algoritmo a equação 3.2 e as condições 3.3 e 3.4 repetem-se de maneira independente para cada *pixel* georreferenciado, dia a dia, ao longo da série temporal de refletâncias, visando detectar mudanças na cobertura da terra. No entanto, alguns ajustes e condições são empregados com a finalidade de diferenciar as mudanças temporárias (alterações temporárias da refletância), que não foram detectadas

na equação 3.2 e as condições 3.3 e 3.4, como: nuvens, sombras, variações na umidade do solo ou ruídos, das áreas afetadas por queimadas que apresentam valores baixos de refletâncias de maneira persistente após a ocorrência do fogo (mudanças persistentes). Nos itens a seguir são definidos os novos ajustes e condições implementados no algoritmo de detecção de mudanças.

d.1) Ajuste das janelas temporais

A falta de dados nas séries temporais de refletâncias observadas (recentes), como aqueles resultantes da cobertura de nuvens ou dados defeituosos, reduzem a frequência temporal da estimativa do *Z-score*, já que diminuem o número de observações disponíveis para prever valores de refletância subseqüentes (valores preditos) e, conseqüentemente, a quantidade de janelas temporais com suficientes observações de refletâncias para a inversão da BRDF.

Visando reduzir a influência desses buracos, a duração da janela temporal ($n=16$ dias) pode ser incrementada de um mínimo de 16 dias para um máximo de $(n + n_{extra})$, até alcançar pelo menos sete observações ($m \geq 7$). Assim, maior número de inversões da BRDF poderiam ser efetuadas na ausência de dados, fornecendo maior número de oportunidades para a detecção de queimadas (Figura 3.10). Caso o número mínimo de observações não seja alcançado, como, por exemplo, devido à presença de nuvens, então não se aplica a inversão da BRDF.

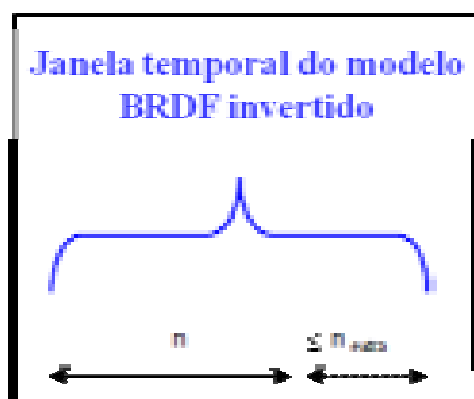


FIGURA 3.10 - Ajustes na duração da janela temporal do modelo BRDF invertido.
FONTE: Modificada de Roy et al. (2005).

d.2) Estimativa multitemporal dos Z -score

Logo, para cada janela temporal contendo ($m \geq 7$) observações utilizam-se os parâmetros da BRDF para estimar os Z -score nos dias seguintes (S_{busca}). Caso um candidato (*pixel*) a queimada seja encontrado nos dias seguintes (S_{busca}), ou seja, cumprem-se os critérios das equações (3.2) e as condições (3.3) e (3.4); então os Z -score continuam sendo estimados por um período de S_{teste} dias posteriores a identificação do primeiro candidato a queimada ($D_{primeiro}$) (Figura 3.11).

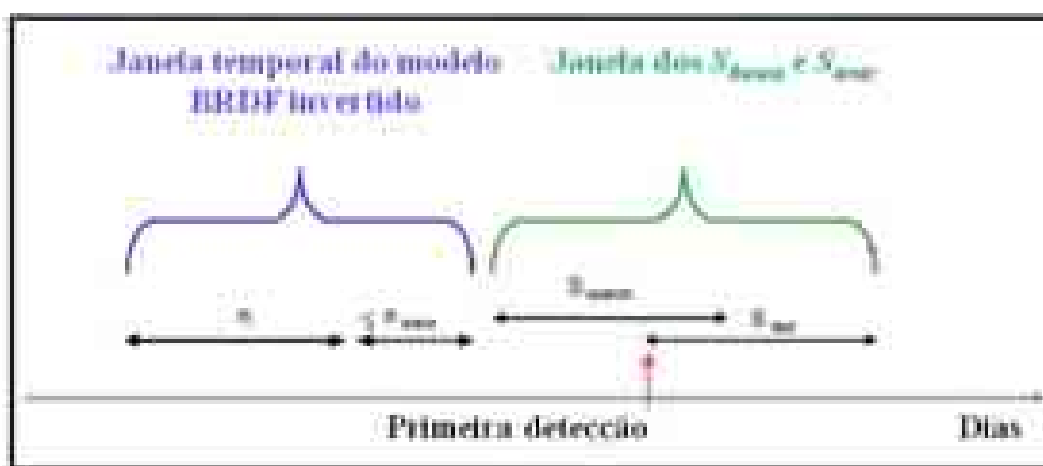


FIGURA 3.11 - Ajustes na duração da janela temporal do modelo BRDF invertido e estimativa multitemporal dos Z -score (janela dos S_{busca} e S_{teste}).
FONTE: Adaptado de Roy et al. (2005).

A identificação do dia aproximado de ocorrência da queima é condicionada ou número de dias consecutivos sem dados (N_{gap}) (ruídos, nuvens entre outros). Para predeterminar a exatidão desta data, cada observação na janela dos S_{busca} e S_{teste} (Figura 3.11) é considerada somente se ocorrerem não mais do que N_{gap} após a primeira observação. Este processo de estimativa multitemporal dos Z -score é repetido deslocando a janela temporal da BRDF invertida e a janela dos S_{busca} e S_{teste} , dia a dia, através da série temporal. Uma estrutura de dados é utilizada para armazenar a seguinte informação: o status de cada refletância de superfície observada (atual) como candidata a área queimada (ou seja, se passaram ou não as condições 3.3 e 3.4), os Z -score máximos e mínimos (positivos e negativos) das bandas 2 e 5 ($Z_{max-min}$ estimados na equação 2) e as observações (recentes) da janela temporal da BRDF invertida.

d.3) Classificação da permanência das cicatrizes do fogo

Em seguida uma nova condição é implementada visando diferenciar mudanças temporárias na cobertura da terra, como: nuvens, sombras, variações na umidade do solo ou ruídos; daquelas persistentes, como as cicatrizes do fogo. Para isto foram escolhidos, a partir das observações de refletância (valores atuais) consideradas como candidatas a áreas queimadas (condições 3.3 e 3.4), os *pixels* que apresentaram as maiores evidências de permanência das cicatrizes do fogo.

Assim, para cada janela temporal da BRDF invertida (Figura 3.11) foram derivados: o dia em que o primeiro candidato a queimada ($D_{primeiro}$) foi detectado, os $Z_{max-min}$ (positivos e negativos) das bandas 2 e 5, o número total de observações que foram utilizadas (N_{usados}) nos S_{teste} dias posteriores à identificação do $D_{primeiro}$ e o número total de observações detectadas como queimadas ($N_{detectados}$). Diferentes candidatos a $D_{primeiro}$ podem ser detectados devido à possibilidade de ajuste na duração das janelas temporal ($n + n_{extra}$) e dos S_{busca} e S_{teste} e à estimativa dos dias sem dados na série temporal; além do fato de que um mesmo pixel georreferenciado pode representar queimadas ocorridas em diferentes momentos.

Os resultados da aplicação das janelas temporais da BRDF invertida são classificados, primeiro, em relação aos $N_{detectados}$ e, depois, aos N_{usados} visando identificar os *pixels* que apresentaram as maiores evidências de permanência das cicatrizes do fogo. Caso os $N_{detectados}$ e N_{usados} possuam valores similares, então aquele com o menor valor do *Z-score* (mínimo negativo) é classificado como o mais persistente.

d.4) Orientação temporal da detecção de mudanças

Por fim, as janelas temporais são aplicadas em ambas orientações da série temporal (“para frente” e “para trás”) visando a detecção dos candidatos a queimada nos dias seguintes (S_{busca}), que precedem ou seguem, a períodos que persistentemente apresentam falta de dados, como, por exemplo, devido a cobertura de nuvens ou dados defeituosos.

A aplicação das janelas em ambas orientações também permite que os candidatos a área queimada possam ser detectados tanto no primeiro, quanto no último dia do S_{busca} . Cabe destacar que durante a busca de observações na série temporal, aplicando a orientação “para trás”, são procurados os incrementos dos valores da refletância de superfície, no lugar da diminuição destes.

Na Figura 3.12 é apresentado um exemplo dos resultados da aplicação das janelas, estimados independentemente para ambas orientações, em uma série temporal de refletâncias observadas de 75 dias (entre 09 de agosto e 23 de outubro de 2002), $Z_{limiar} = 3,0$, $S_{busca} = 16$ dias, $n = 16$ dias, $n_{extra} = 08$ dias. Os valores dos *pixels* representativos das cicatrizes do fogo com a maior permanência foram estimados a partir da classificação dos candidatos a queimadas em relação aos $N_{detectados}$ e N_{usados} . Os resultados da identificação dos $D_{primeiro}$ apresentam-se em escala colorida indicando o dia aproximado da ocorrência da queimada com exatidão de oito dias ($N_{gap} = 08$). Em preto mostram-se as áreas não queimadas e em branco as áreas com número de dados insuficientes para inverter o modelo BRDF (neste caso ocasionado pela presença de um corpo d’água). O número de observações que foram detectadas como queimadas ($N_{detectados}$) e o número total de observações que foram utilizadas (N_{usados}) nos $S_{teste} = 16$ dias posteriores a identificação do $D_{primeiro}$ estão representados em cor roxa (1 a 2 dias), azul (3 dias), verde (4 a 6 dias), amarelo (7 a 9 dias), laranja (10 a 12 dias) e vermelho (13 a 16 dias).

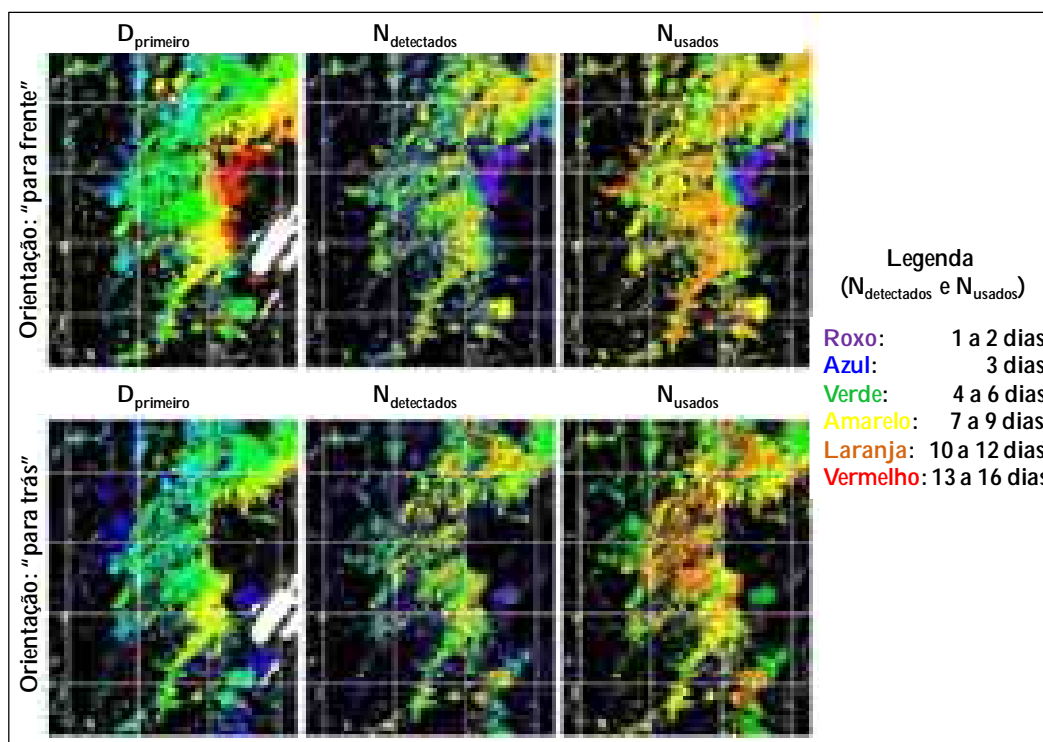


Figura 3.12 - Exemplo da identificação do primeiro candidato a queimada ($D_{primeiro}$), do número total de observações que foram utilizadas (N_{usados}) e as detectadas como queimadas ($N_{detectados}$) para ambas orientações. A escala de cores mostra os dias em que o $D_{primeiro}$ foi detectado (azul= 09 de agosto, vermelho= 23 de outubro, preto as áreas não queimadas e em branco onde houve um número insuficiente de observações para inverter o modelo BRDF). Os $N_{detectados}$ e os N_{usados} nos $S_{teste}= 16$ dias estão definidos na legenda.

FONTE: Adaptado de Roy et al. (2005).

e) Seleção dos candidatos a queimadas

Finalmente, o algoritmo de detecção de mudanças seleciona como *pixels* representativos de queimadas, somente aqueles candidatos a queimadas que mostrem evidências persistentes da ocorrência do fogo (permanência das cicatrizes do fogo), visando reduzir os erros de comissão (i. e. quando áreas não queimadas são classificadas pelo algoritmo como sendo queimadas).

Portanto, nesta última etapa da implementação do algoritmo são aplicadas novas condições e procedimentos iterativos aos candidatos a queimadas, em ambas orientações da série temporal ("para frente" e "para trás"); considerando, primeiro, que

as medições da permanência das queimadas nas séries temporais de refletâncias observadas variam dependendo do número de dias sem dados (N_{gap}); e, segundo, que a identificação do dia aproximado de ocorrência da queima é condicionada à disponibilidade de dados (observações de refletâncias da cobertura da terra).

Em primeiro lugar tem-se que pixels representativos de áreas queimadas são selecionados como sendo o $D_{primeiro}$, se:

$$N_{detectados} \geq 3 \text{ e } (N_{detectados}/N_{usados}) \geq 0,5 \quad (3.5)$$

Desta forma, serão selecionados somente candidatos que possuam nos S_{teste} dias posteriores a identificação do $D_{primeiro}$ pelo menos 3 observações detectadas como queimadas, assim como um número total de observações utilizadas que não exceda o dobro das anteriores. Caso na série temporal sejam encontrados vários candidatos a queimadas em um mesmo pixel georreferenciado, os mesmos serão selecionados em ordem decrescente em relação às evidências da persistência da ocorrência do fogo apresentadas (permanência das cicatrizes do fogo); e, o primeiro em aprovar a condição 3.5 será o selecionado. Por outro lado, se os resultados nas buscas em ambas orientações (“para frente” e “para trás”) possuírem a mesma persistência, então será priorizado o resultado da orientação “para frente”, por ser a mais confiável.

Em segundo lugar, são aplicadas condições menos restritivas e procedimentos iterativos de busca para aqueles candidatos a queimadas que provavelmente queimaram, mas não passaram a condição 3.5, devido ao número insuficiente de observações. É o caso de vários *pixels* representativos de queimadas na Figura 3.12 que possuem $N_{detectados} < 3$ (em cor roxa = 1-2 dias).

O procedimento baseia-se no princípio de que existe maior probabilidade de ocorrência de queimadas em *pixels* vizinhos aos que comprovadamente foram detectados como área queimada (GRAETZ et al.; 2003, ROY et al.; 2002). Neste procedimento de busca iterativo os candidatos a queimadas selecionados em (3.5) consideram-se *pixels* “semente”. Os *pixels* candidatos a queimadas, que não “semente” (i. e. que não

passaram a condição 3.5), serão aceitos como queimadas se possuírem dois ou mais *pixels* vizinhos “semente” adjacentes, e ainda se:

$$|D_{primeiro} - D_{primeiro-semente}| < N_{gap} \text{ e } N_{detectados} \geq 2 \text{ e } (N_{detectados}/N_{usados}) \geq 0,5 \quad (3.6)$$

Onde, $D_{primeiro}$, $N_{detectados}$ e N_{usados} são os valores dos candidatos a queimadas que não passaram a condição 3.5 e $D_{primeiro-semente}$ é a media dos valores do $D_{primeiro}$ relativos aos *pixels* “semente” adjacentes (entre dois e oito). A condição N_{gap} garante que somente candidatos a queimadas que ocorrem temporalmente, assim como espacialmente próximos aos *pixels* vizinhos “semente” sejam considerados.

Este procedimento é repetido exaustivamente de forma iterativa com os *pixels* que passaram a condição 3.6 que se consideram “semente” na próxima interação, até que mais nenhum candidato a queimada que passou a condição 3.6 possa ser incluído. Da mesma forma que na condição 3.5, se na série temporal são encontrados vários candidatos a queimadas em um mesmo pixel georreferenciado, os mesmos serão selecionados em ordem decrescente em relação às evidências da persistência da ocorrência do fogo apresentadas; até que a condição 3.6 seja cumprida. De novo, se os resultados nas buscas em ambas orientações possuírem a mesma persistência, então será priorizado o resultado da orientação “para frente”, por ser a mais confiável.

Nesta segunda parte da aplicação do algoritmo, aqueles candidatos a queimadas que não cumpriram com as condições anteriores também poderão ser selecionados como *pixels* representativos de queimadas, se: pelo menos três dos seus *pixels* vizinhos têm sido selecionados. Ainda, é estimado o dia médio da ocorrência das queimadas nos *pixels* vizinhos, e o *pixel* só será selecionado se, em ambas orientações, o dia da ocorrência da queima mais próximo ao dia médio é menor do que o número de dias consecutivos sem dados (N_{gap}). Este último procedimento não é iterativo, nem são utilizados outros limiares.

Por fim, os *pixels* representando áreas sem observações suficientes para inverter o modelo BRDF na série temporal são rotulados em uma classe aparte, para não serem

confundidos com áreas não queimadas (e. g. *pixels* apontados em cor branca na Figura 3.7, representativos de nuvens ou ruídos).

f) Aquisição do produto MCD45

As áreas queimadas mapeadas a partir do algoritmo de detecção de mudanças (MCD45) foram obtidas na página web: <https://wist.echo.nasa.gov>. Este produto é disponibilizado para cada "tile" MODIS em arquivos mensais armazenados em formato HDF (formato de transferência) e nível de quantização de 16 *bits* (65.536 níveis de cinza). Cada arquivo contém diferentes planos de informação relativos a: o dia aproximado de ocorrência da queimada ("*Burndate*"), o grau de confiança da detecção das queimadas ("*BA pixel QA*"), a orientação ("para frente" ou "para trás") na qual foram detectadas as queimadas ("*Direction*"), o número de dias consecutivos sem dados ("*Gap Range*"), o número total de observações que foram utilizadas ("*Number Used*") e o número total de observações detectadas como queimadas ("*Number Passes*") (Figura 3.13).

Para este estudo foram adquiridos somente os "tiles" MODIS abrangendo a área de estudo (Tabela 3.1) e selecionado o plano de informação referente ao dia aproximado de ocorrência da queimada ("*Burndate*"). A informação contida neste último dado é representada por uma matriz de dados espaciais com diferentes tipos de coberturas da terra: a) área queimada, b) neve, c) corpos d'água, e d) áreas sem dados suficientes para inverter o modelo BRDF. No entanto, é importante destacar que para o momento da elaboração deste trabalho, os planos de informação disponibilizados pela NASA (online_a) correspondem a uma versão temporária visando a avaliação deste produto. Assim, o refinamento do algoritmo e melhoras na qualidade do produto encontram-se em desenvolvimento.

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados no processamento dos dados MCD45.

f.1) Conversão dos dados originais

Os arquivos mensais referentes aos dados de área queimadas ("*Burndate*") foram convertidos do formato HDF e projeção Sinusoidal/SAD69 para o formato Geotiff e projeção Policônica/WGS84 e, posteriormente, gerados mosaicos mensais compreendendo a área de estudo, utilizando o aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT). Em seguida, o nível de quantização de 16 *bits* dos mosaicos mensais foi convertido para 8 *bits* empregando a equação 3.7.

$$ND_{8bits} = \frac{ND_{16bits} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \times 255 \quad (3.7)$$

Onde, ND_{8bits} é a nova resolução radiométrica para cada *pixel* (8 bits); ND_{16bits} é a resolução radiométrica original do *pixel* (16 bits); V_{min} é o valor digital mínimo (representado em níveis de cinza) do *pixel* em 16 bits; V_{max} é o valor digital máximo (representado em níveis de cinza) do *pixel* em 16 bits; e o valor 255 refere-se ao valor digital máximo correspondente ao novo nível de quantização (8 bits). A Figura 3.13 mostra o resultado da conversão dos dados originais em 256 níveis de cinza (entre 0 e 255).

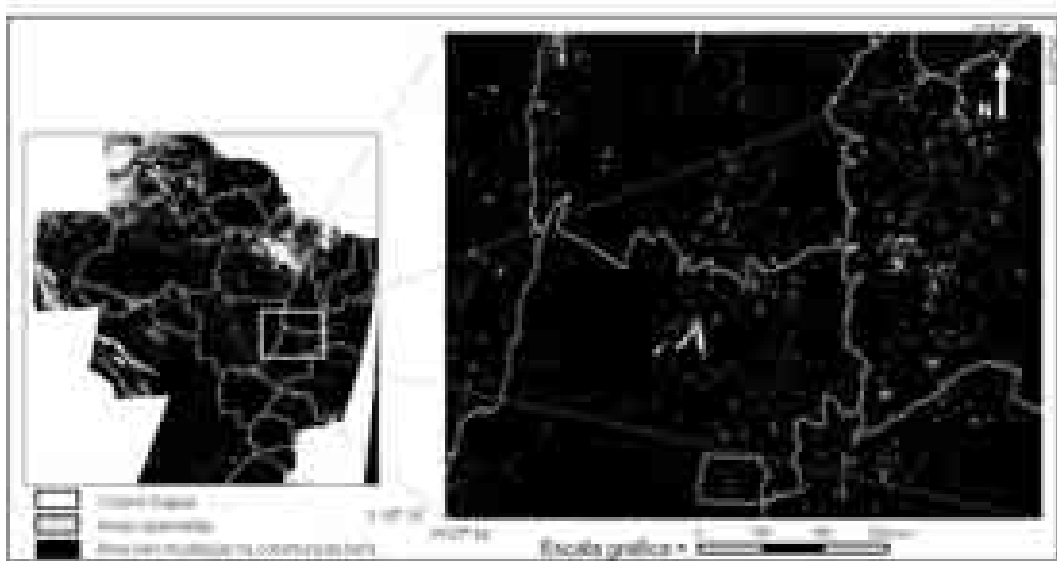


FIGURA 3.13 - Mosaico de imagens MODIS convertidas para 8 *bits* referente aos dias de ocorrência das queimadas ("*Burndate*") para o mês de outubro de 2005. As classes das coberturas da terra estão representadas em diferentes níveis de cinza: áreas queimadas, neve, corpos d'água, e *pixels* sem dados suficientes para inverter o modelo BRDF.

f.2) Classificação das imagens "*Burndate*"

Após a geração dos mosaicos mensais com os diferentes tipos de coberturas da terra, cada uma delas representadas por um valor digital (entre 0 e 255 níveis de cinza), foi necessária a classificação das imagens "*Burndate*" para extrair as áreas queimadas; uma vez que o produto MCD45 é gerado como uma matriz de dados espaciais sem atributos de classes, ou seja, representando cada classe apenas com o valor digital.

Este procedimento consistiu na transformação das imagens "*Burndate*" em composições coloridas, designando a cada cobertura da terra (*pixels*) um novo valor entre 0 e 255 (Figura 3.14), mediante o cálculo de coeficientes de mistura na representação de cores RGB. Para isto foi utilizado o aplicativo ENVI, por meio de códigos de programação na linguagem IDL.

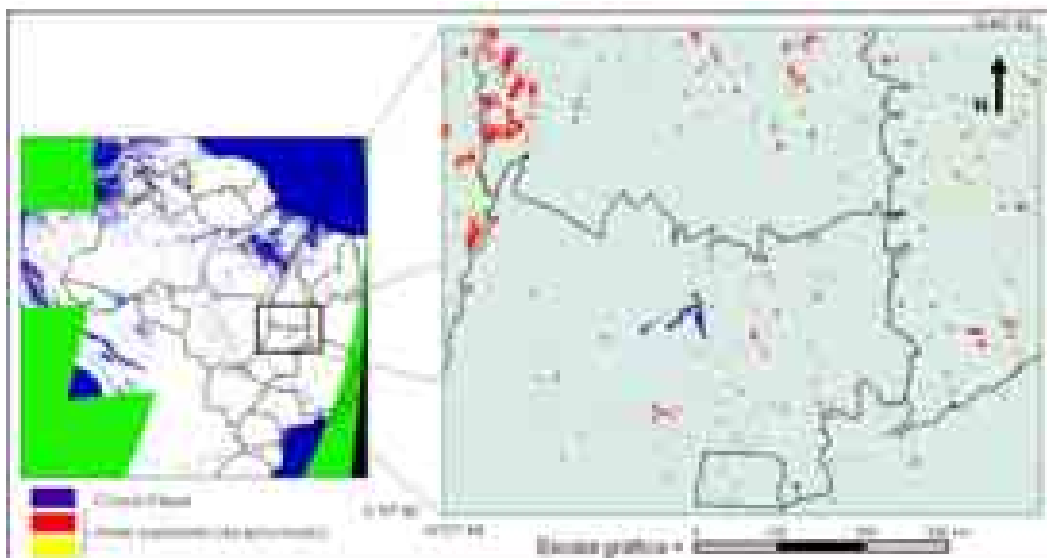


FIGURA 3.14 - Mosaico colorido (RGB) do mês de outubro de 2005. Em azul escuro estão representados os corpos d'água e em vermelho e amarelo o dia aproximado de ocorrência das queimadas.

Em seguida, foram separadas as classes representativas das áreas queimadas utilizando o aplicativo SPRING, por meio de um programa desenvolvido em "LEGAL" (Linguagem Espaço-Geográfica Baseada em Álgebra). Assim, criou-se um mapa temático (mosaico) para cada mês do período de estudo contendo as áreas afetadas pela ocorrência de queimadas. Finalmente, a área total queimada do período de estudo foi obtida por meio da interseção, mês a mês, dos *pixels* representativos de áreas queimadas e especializadas em um novo plano de informação (Figura 3.15).

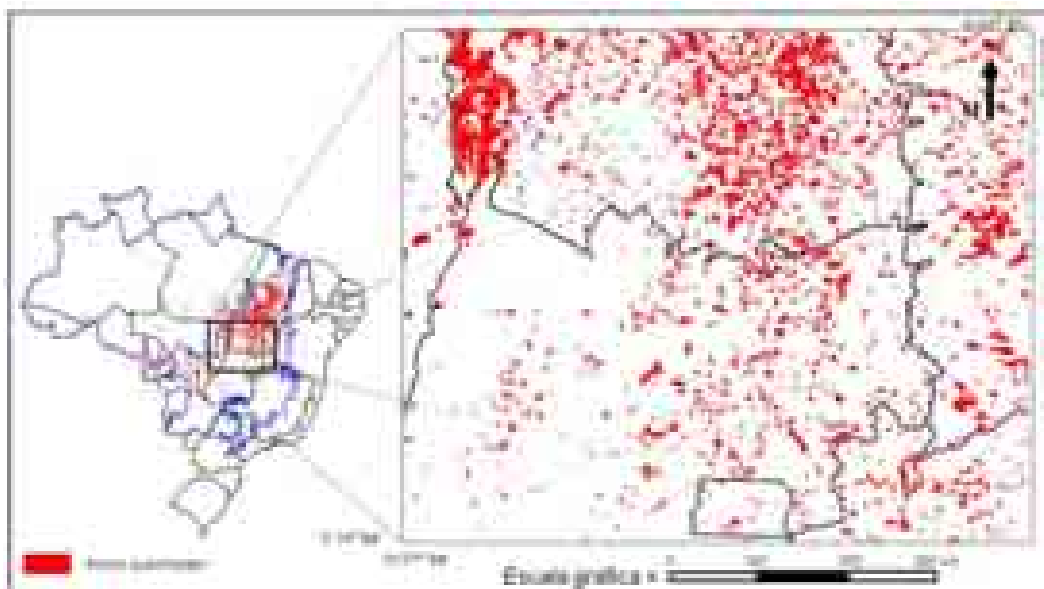


Figura 3.15 - Área total queimada do produto MCD45 na Amazônia e no Cerrado para o ano 2005.

3.3.2.3 Algoritmo de Áreas Queimadas

O Algoritmo de Áreas Queimadas (*Detecção de Áreas Queimadas*), desenvolvido por Setzer et al. (2007), é um procedimento automático para a quantificação de áreas queimadas baseado no trabalho de França (2001) para imagens AVHRR do satélite NOAA-14. Este algoritmo utiliza diferentes limiares para a detecção de áreas queimadas propostos em França (2001), adaptados aos valores de radiância espectral ($W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$), para o cálculo do IVDN e de um IVDN de referência (máximo), nas bandas 1 e 2 do sensor MODIS/Aqua, e da temperatura de brilho ($^{\circ}C$) das bandas 20 e 21 do mesmo sensor (INPE/CPTEC, *on-line*).

Estes produtos assim como os compostos quinzenais de área queimada que foram utilizados neste trabalho para estimar as áreas queimadas dos biomas Amazônia e Cerrado, estão disponíveis na página web: <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/areasimg.php>. No entanto, cabe ressaltar que a versão do algoritmo empregado por Setzer et al. (2007) para gerar os compostos quinzenais de área queimada corresponde a uma versão preliminar em fase de desenvolvimento. Uma nova versão do algoritmo está sendo implementada no momento

da elaboração deste estudo, e deverá incluir os focos ativos de queimadas detectados pelos vários satélites usados no monitoramento do INPE; com esta alteração, espera-se um aumento significativo nas estimativas de área queimada do Cerrado.

Na geração do algoritmo de detecção de áreas queimadas utilizaram-se os seguintes procedimentos:

a) Recuperação e pré-processamento dos dados

Nesta primeira etapa são recuperados os dados CADU (*Channel Acces Data Units*) recebidos pelo sistema *SeaSpace TeraScan Systems* na Estação Terrena de Cuiabá (ETC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Campus Cuiabá, MT. Os dados CADU consistem em imagens MODIS/Aqua brutas (Nível 0) gravadas pela ETC, durante uma passagem do satélite, que não foram sujeitas a nenhum tipo de processamento, como correções radiométricas ou geométricas.

Posteriormente, aplicam-se correções radiométricas, geométricas e do efeito "*bow-tie*" presente nas imagens MODIS de Nível 0, utilizando o aplicativo IMAPP (*International MODIS and AIRS Processing Package*), desenvolvido pelo *Cooperation Institute for Meteorological Satellite Studies* (CIMSS) da Universidade de Wisconsin-Madison (CIMSS, 2008).

O IMAPP é um aplicativo que transforma as imagens MODIS de Nível 0, em Nível 1B. O processo de implementação do aplicativo envolve a execução de um *script* sobre as imagens de Nível 0, corrigindo o efeito "*bow-tie*" e a radiometria das imagens, georreferenciado-as com as respectivas coordenadas (latitude-longitude) e data/hora de aquisição (Figura 3.16).

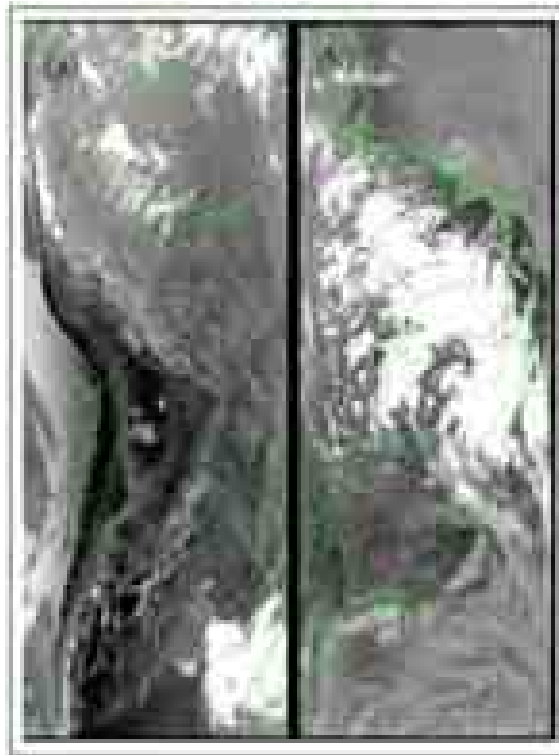


FIGURA 3.16 - Exemplo de imagens diárias MODIS/Aqua nível 1B correspondentes à banda 20: (a) horário de passagem (GMT) às 18:08:17 e (b) às 16:31:17.

O efeito "*bow-tie*" é produto da oscilação do espelho no sistema de varredura através da linha de imageamento ou "*cross-track*" no sensor MODIS, o qual conduz a uma repetição de padrões a cada 40 linhas durante o imageamento para ângulos de varredura acima de 25°, a partir do qual se intensifica o efeito (Figura 3.17).

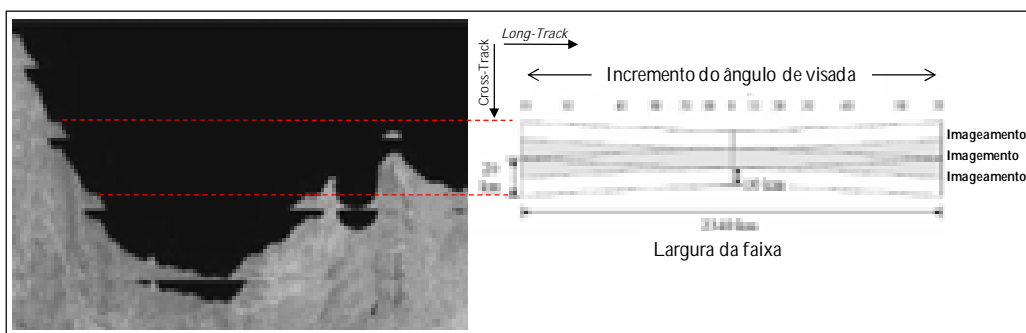


FIGURA 3.17 - Exemplo do Efeito "*bow-tie*" nas imagens MODIS.
Adaptada de Wolfe et al.; 2002.

b) Processamento das imagens

Nesta segunda etapa são convertidos os valores de radiância da banda 20 (3,660 a 3,840 μm) e da banda 21 (3,929 a 3,989 μm) para temperatura de brilho, a partir de curvas de calibração atualizadas para cada banda. Após a conversão dos valores de radiância é feita a reamostragem da banda 1 (0,620 a 0,670 μm) e da banda 2 (0,841 a 0,876 μm), de sua resolução espacial nominal de 250 m para 1 km, com o propósito de possibilitar o cruzamento destas bandas com as bandas 20 e 21, quando aplicado o Algoritmo de Áreas Queimadas (alínea d). Durante este processamento verifica-se a precisão geométrica de todas as imagens diárias de cada passagem do satélite Aqua, caso alguma imagem tenha apresentado deslocamento relativo à correção geométrica, aplica-se uma correção complementar. Persistindo o deslocamento, opta-se por desconsiderar a imagem (Figura 3.18).

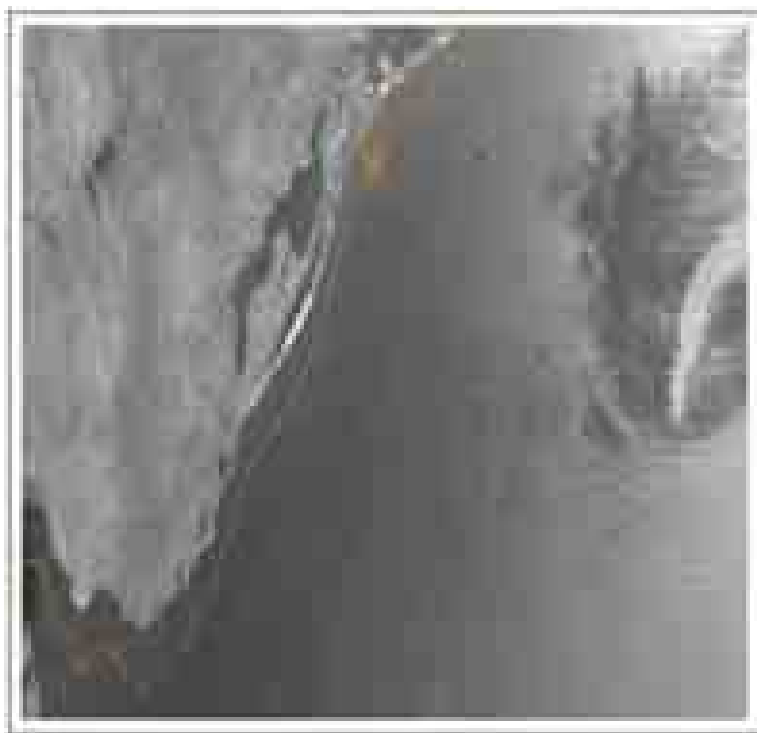


FIGURA 3.18 - Exemplo do deslocamento em uma imagem MODIS/Aqua relativo à correção geométrica.

Posteriormente, recortam-se todas as imagens diárias para ângulos de varredura acima de 45° visando diminuir os erros de superestimativas das áreas queimadas, devido ao incremento do tamanho do *pixel* nas bordas das imagens como consequência da curvatura da terra (Figura 3.19). O tamanho dos *pixels* aumenta com um fator de 2 vezes na direção ao longo da linha de imageamento (*long-track*) e de um fator de 5 vezes na direção da linha de imageamento (*cross-track*) (JUSTICE et al.; 2002b) (Figura 3.20). Nas estimativas de áreas queimadas utilizando este algoritmo foi reportado um incremento do tamanho do *pixel* original nas bordas das imagens com um fator de até 4 vezes ao longo da linha de imageamento (SETZER et al., 2007).

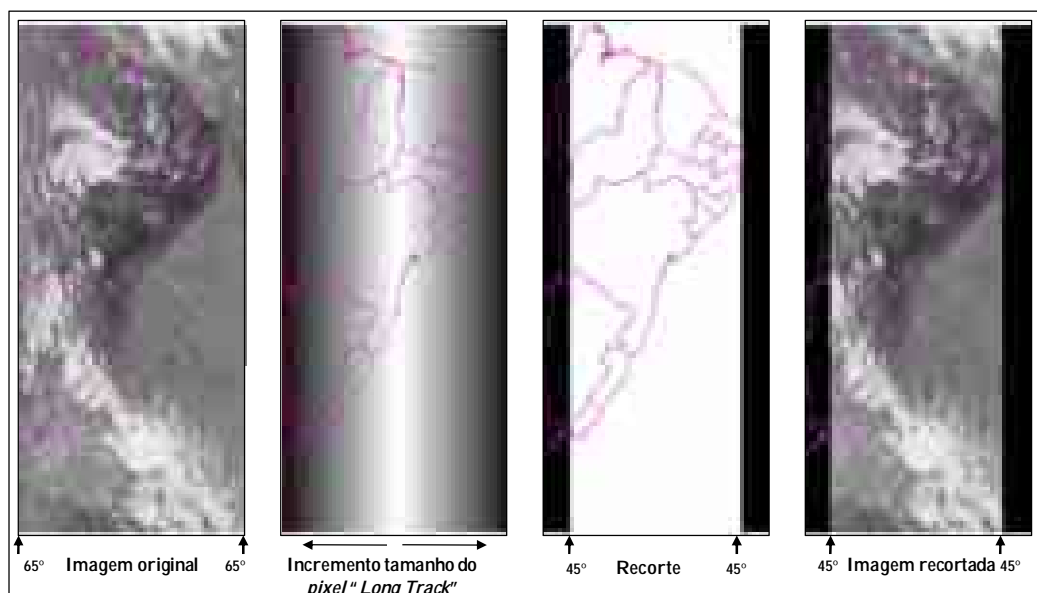


FIGURA 3.19 - Exemplo de imagens diárias MODIS/Aqua da banda 20 recortadas a 45°.

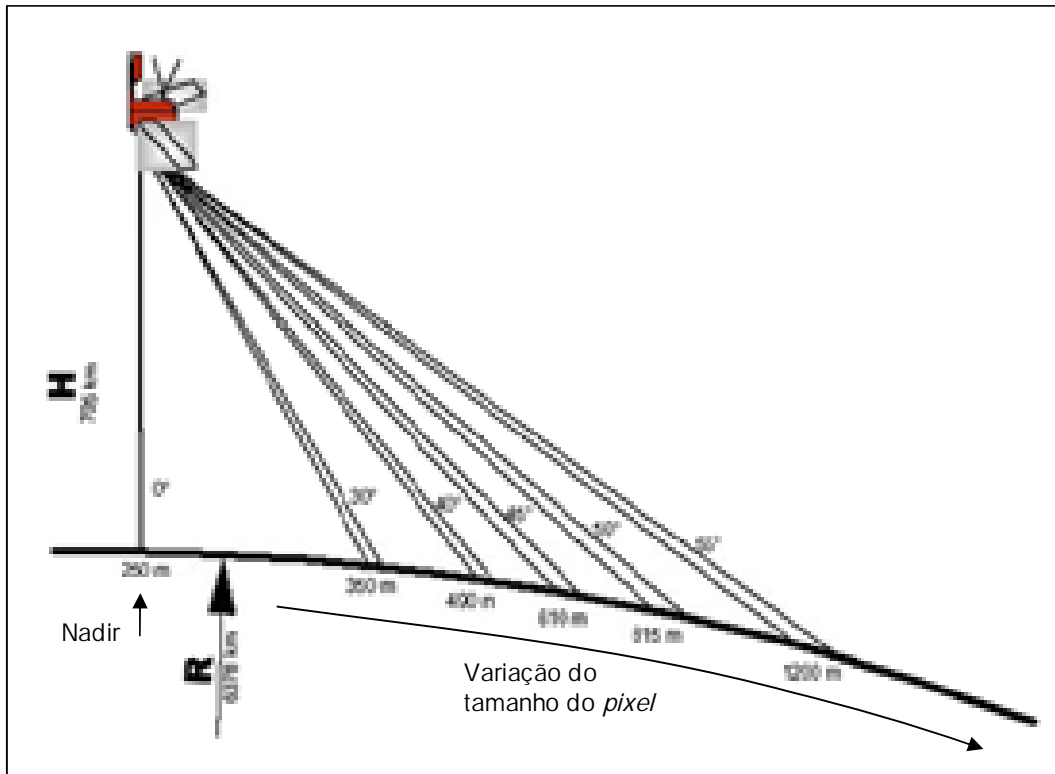


FIGURA 3.20 - Aumento do tamanho do *pixel* nas imagens MODIS, em relação ao ângulo de visada do satélite. Onde, H é a altitude do satélite e R o raio da Terra.

Em seguida, eliminam-se aqueles *pixels* da banda 20 com valores de radiância nos *pixels* correspondentes acima de 180 ($W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$) na banda 1, representativos de superfícies refletivas que não correspondiam a queimadas, saturados pela alta emissividade dos alvos terrestres para alguns ângulos de reflexão solar (Figura 3.21). Por outro lado, os *pixels* da banda 20 que inicialmente foram classificados pelo sistema (*TeraScan*) como *pixels* sem informação são reclassificados com base às temperaturas de brilho da banda 21, a qual apresenta um limiar de saturação maior (~500 K) em relação à banda 20 (~300 K). Os *pixels* reclassificados recebem um novo valor de temperatura de brilho correspondente ao máximo valor de temperatura encontrado na banda 21 (77° C). Caso sejam identificados ruídos nos *pixels* da banda 21, estes são rejeitados mantendo-se o valor do *pixel* original (sem informação).

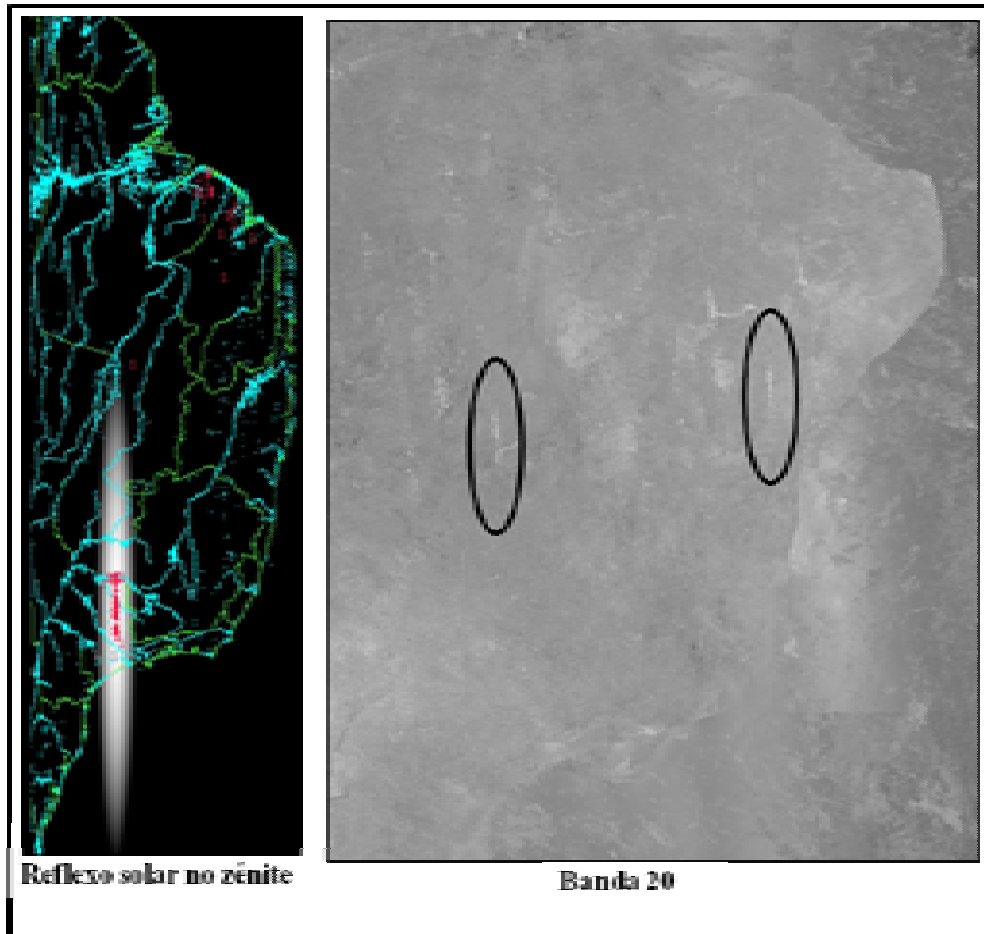


FIGURA 3.21 - Exemplo de *pixels* saturados pela alta emissividade dos alvos terrestres na banda 20 do sensor MODIS devido à alta reflexão solar no zênite.

c) Geração de imagens-mosaicos

A partir das imagens diárias (banda 20) geradas no procedimento anterior (alínea b) são obtidas as imagens-mosaico de Máxima Temperatura ($^{\circ}$ C) (Figura 3.22). Cabe destacar que essas imagens-mosaico correspondem às últimas quinze passagens disponíveis do satélite, anteriores à data da imagem (banda 20) utilizada para a iniciação do Algoritmo de Áreas Queimadas (cena atual).

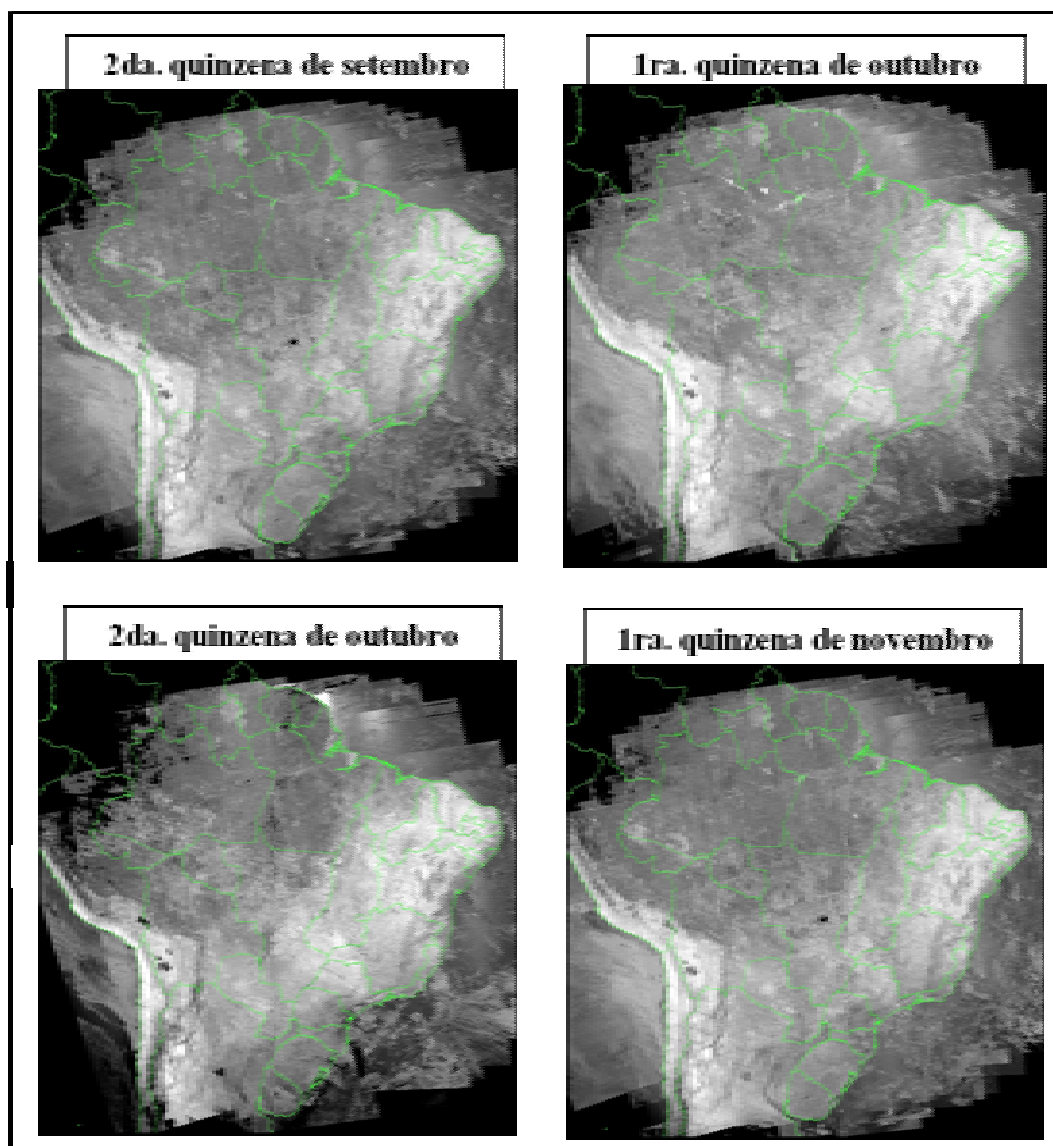


FIGURA 3.22 - Exemplo de imagens-mosaicos quinzenais (Máxima Temperatura em ° C) correspondentes à banda 20 do sensor MODIS/Aqua, para o ano 2005.

FONTE: (INPE/CPTEC, *on-line*).

Geram-se, ainda, a imagem-mosaico de referência anual (equação 3.8) (Figura 3.23) selecionando em todas as imagens disponíveis para um mesmo ano (2005) os *pixels* de valor mais alto das bandas 1 e 2, e a imagem-mosaico do IVDN para cada data disponível (IVDN da cena atual) (equação 3.9). Desta forma, a comparação entre as imagens-mosaico do IVDN da cena atual com as de referência permitiria detectar qualquer alteração na cobertura vegetal decorrentes de queimadas, a partir da mudança das características espectrais em imagens obtidas antes e depois da ocorrência da

queima. Por outro lado, permitirá eliminar a presença de nuvens nas imagens-mosaico do IVDN de referência, já que as mesmas apresentam valores de IVDN baixos e, ao mesmo tempo, selecionar apenas aqueles *pixels* relacionados com a presença de fitomassa fotossinteticamente ativa, os quais apresentam IVDN com valores superiores ao do solo exposto e da vegetação senescente ou seca.

$$IVDN(referência) = \frac{IVP(max) - Vermelho(max)}{IVP(max) + Vermelho(max)} \quad (3.8)$$

$$IVDN(atual) = \frac{IVP - Vermelho}{IVP + Vermelho} \quad (3.9)$$

Onde, o *IVDN (referência)* é o valor do IVDN para um determinado ano, gerado a partir dos valores máximos de radiância nas bandas 1 e 2 do sensor MODIS/Aqua; *IVDN(atual)* é o valor do IVDN estimado diariamente; *IVP* e *IVP(max)* são os valores de radiância e de radiância máxima, respectivamente para a região do IVP do espectro eletromagnético; e *Vermelho* e *Vermelho(max)* são os valores de radiância e de radiância máxima, respectivamente para a região do vermelho.

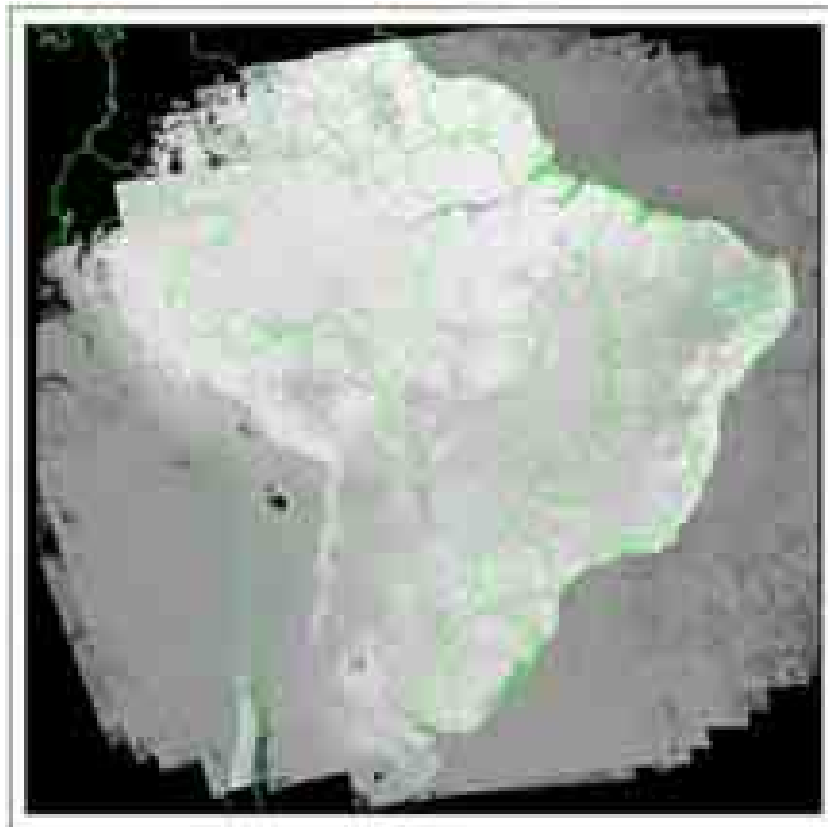


FIGURA 3.23 - Imagem-mosaico do IVDN de referência anual estimado para o ano 2005.

FONTE: (INPE/CPTEC, *on-line*).

d) Aplicação do Algoritmo

Segundo Setzer et al. (2007), o Algoritmo de Áreas Queimadas detecta *pixels* de queimadas nas imagens diárias da banda 20 (cena atual), contrastando-os com seus homólogos nas imagens-mosaico quinzenal de Máxima Temperatura (banda 20), do IVDN da cena atual e do IVDN de referência (anual). A detecção das áreas queimadas é feita a partir das imagens individuais e uma vez detectado um *pixel* como sendo área queimada, esta informação é transferida para um mosaico quinzenal onde são totalizados para o período correspondente (quinzena). Assim cada pixel detectado corresponde a 1 km² de área queimada e os mosaicos quinzenais representam todas as queimadas ocorridas nas imagens individuais desse período.

Os critérios de aceitação de um *pixel* como sendo área queimada (Figura 3.24) obedecem às seguintes propriedades:

- Temperaturas de brilho na cena atual da banda 20 maiores que $54,7^{\circ}\text{C}$
- IVDN da cena atual maior que $+0,15$ e o correspondente *pixel* IVDN de referência (anual) maior que $-0,15$.
- Diferença das temperaturas de brilho maior que 25°C entre a cena atual (banda 20) e o *pixel* correspondente nas imagens-mosaico de Máxima Temperatura (das últimas 15 passagens disponíveis) da mesma banda.
- Finalmente, são eliminados os pixels sujeitos a alta reflexão solar (como corpos d'água) para ângulos solares com co-seno menores a $0,994$.

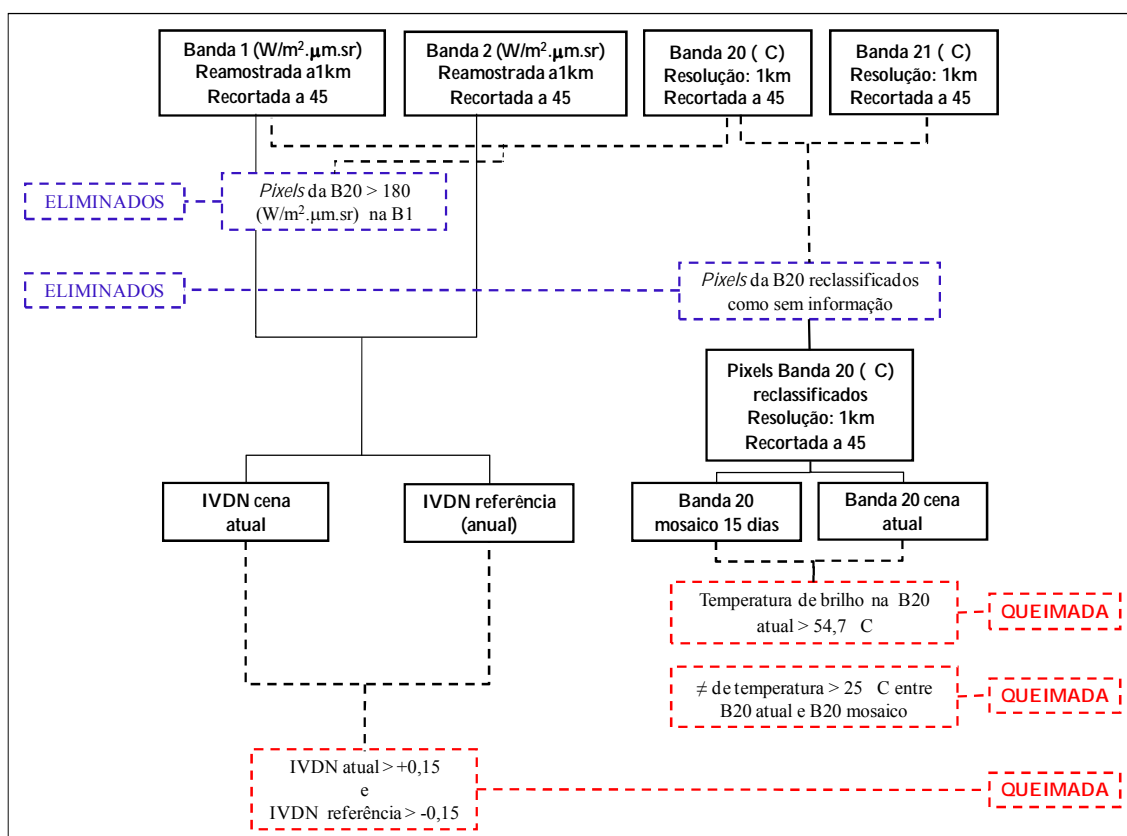


FIGURA 3.24 - Fluxograma da aplicação do Algoritmo de Áreas Queimadas.

Cabe destacar que os limiares utilizados por Setzer et al. (2007) nos critérios de aceitação de um *pixel* como sendo área queimada, foram fixados empiricamente após a análise dos resultados do processamento de todas as 524 imagens MODIS do satélite Aqua existentes para o ano 2004; e refeito cinco (05) vezes até eliminar falsas detecções de áreas queimadas.

3.3.2.4 Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas

Este procedimento está baseado na metodologia aplicada no Projeto Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES digital) (SHIMABUKURO et al.; 1998) e consiste na identificação de cicatrizes deixadas pelo fogo, visando a quantificação da área queimada a partir da informação obtida em séries temporais de imagens de refletância de superfície do sensor MODIS/Terra (Produto MOD09/TERRA, nível de processamento L2G), bandas 1 (0,620 – 0,670 μ m), 2 (0,841-0,876 μ m) e 6 (1,628 - 1,652 μ m), com resolução espacial nominal de 250 m (bandas 2 e 2) e 500 m (banda 6) (NASA, *on-line_b*).

A identificação e a classificação das cicatrizes do fogo foram feitas mediante a aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) nas bandas 1, 2 e 6 do MODIS visando a geração de imagens fração (vegetação, solo e sombra). A imagem fração sombra foi segmentada realçando aqueles alvos que apresentam baixa refletância, indicativos de cicatrizes deixadas pelo fogo após a ocorrência da queima; em seguida, é classificada e editada por meio de interpretação visual diretamente na tela do computador.

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados na geração do produto Mapeamento das Cicatrizes de Queimadas, segundo Lima et al. (2009).

a) Seleção das imagens

As imagens utilizadas no mapeamento das cicatrizes de queimada foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de imagens no acervo do *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) (NASA, *online_b*), através da *Warehouse Inventory*

Search Tool (WIST) (NASA, *online_a*). Este produto é disponibilizado para cada "tiles" MODIS em arquivos quase diários armazenados em formato HDF (formato de transferência) e nível de quantização de 16 bits (65.536 níveis de cinza). Para este estudo foram adquiridos somente os "tiles" MODIS abrangendo a área de estudo (Tabela 3.1).

Do total de imagens disponíveis no acervo, selecionaram-se as datas com menor cobertura de nuvens para cada Estado compreendido na área de estudo. Para isto, foram avaliados visualmente um total de 182 "Quick Look" (NASA, *online_c*) (Figura 3.25), relativos ao ano 2005, com o intuito de alcançar uma série temporal de dados livres de nuvens com o maior número de revisitas do satélite. Este procedimento é adotado na tentativa de diminuir a quantidade de dados que devem ser armazenados, assim como o tempo de processamento e de interpretação visual dos mesmos. No entanto, esta estratégia poderia ocasionar a omissão daquelas cicatrizes do fogo presentes nas imagens descartadas.

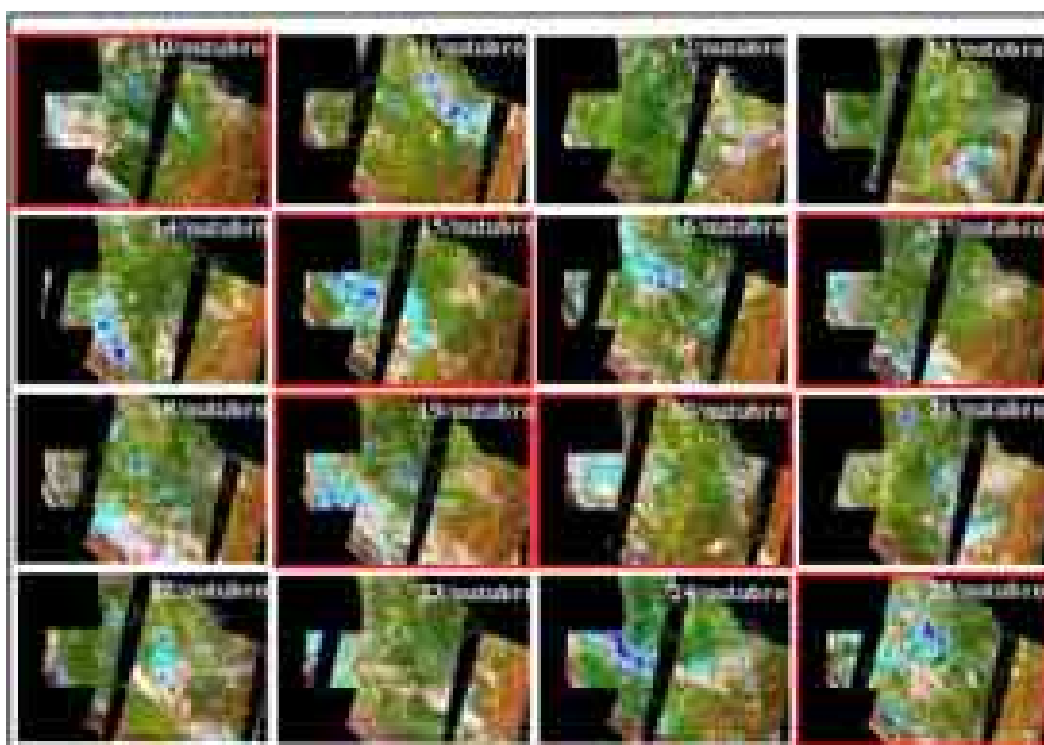


FIGURA 3.25 - Exemplo de seleção de datas após a verificação da cobertura de nuvens existentes nas imagens. Bordas em vermelho correspondem às imagens selecionadas.

b) Conversão dos dados originais

Os arquivos diários selecionados no item anterior, referentes ao Produto MOD09/TERRA, nível de processamento L2G (bandas 1, 2 e 6), foram convertidos do formato HDF e projeção Sinusoidal/SAD69 para o formato Geotiff e projeção Policônica/SAD69 e, posteriormente, gerados mosaicos diários compreendendo as datas selecionadas da área de estudo, utilizando o aplicativo *MODIS Reprojection Tool* (MRT). Em seguida, o nível de quantização de 16 *bits* dos mosaicos diários selecionados foi convertido para 8 *bits* conforme indicado no item 3.3.2.2 (*MCD45*).

c) Geração das imagens fração

O Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) está baseado na premissa de que, em uma determinada imagem, como consequência da resolução espacial do sensor, um *pixel* está representado pela mistura de diferentes elementos que compõem a superfície terrestre (corpos d'água, formações vegetais, solo exposto entre outros), com propriedades espectrais relativamente constantes. Se a maior parte da variabilidade espectral em uma imagem é consequência da variação nas proporções em que aparecem misturados esses elementos; então, uma determinada combinação dessas propriedades espectrais (resposta espectral) pode modelar a variabilidade espectral observada pelo sensor (KESHAVA e MUSTARD, 2002).

Na aplicação do modelo, uma relação linear é utilizada para representar a mistura espectral dos alvos terrestres, contidos em cada *pixel* da imagem. Assim, a resposta espectral de cada *pixel* em qualquer banda espectral pode ser definida como uma combinação linear das respostas de cada componente da superfície terrestre que conformam essa mistura. Ou seja, cada *pixel* da imagem apresenta a informação sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Desta forma, se a resposta espectral de cada banda do sensor MODIS utilizada no modelo é conhecida, então as proporções de cada um dos seus componentes podem ser estimadas.

No presente estudo foi aplicado o MLME ao conjunto de bandas espectrais 1, 2 e 6 com a finalidade de gerar valores de proporção das diferentes componentes (imagens fração vegetação, solo e sombra) representados em cada mosaico de imagens selecionadas. Este procedimento permitiu realçar os alvos de baixa refletância nas imagens fração sombra (i.e. as cicatrizes do fogo, corpos d'água e sombras entre outros) diferenciando-os dos demais alvos contidos nas imagens (fração vegetação e solo), como uma forma de reduzir a dimensionalidade dos dados que estão sendo analisados e realçar as informações de interesse (Figura 3.26).

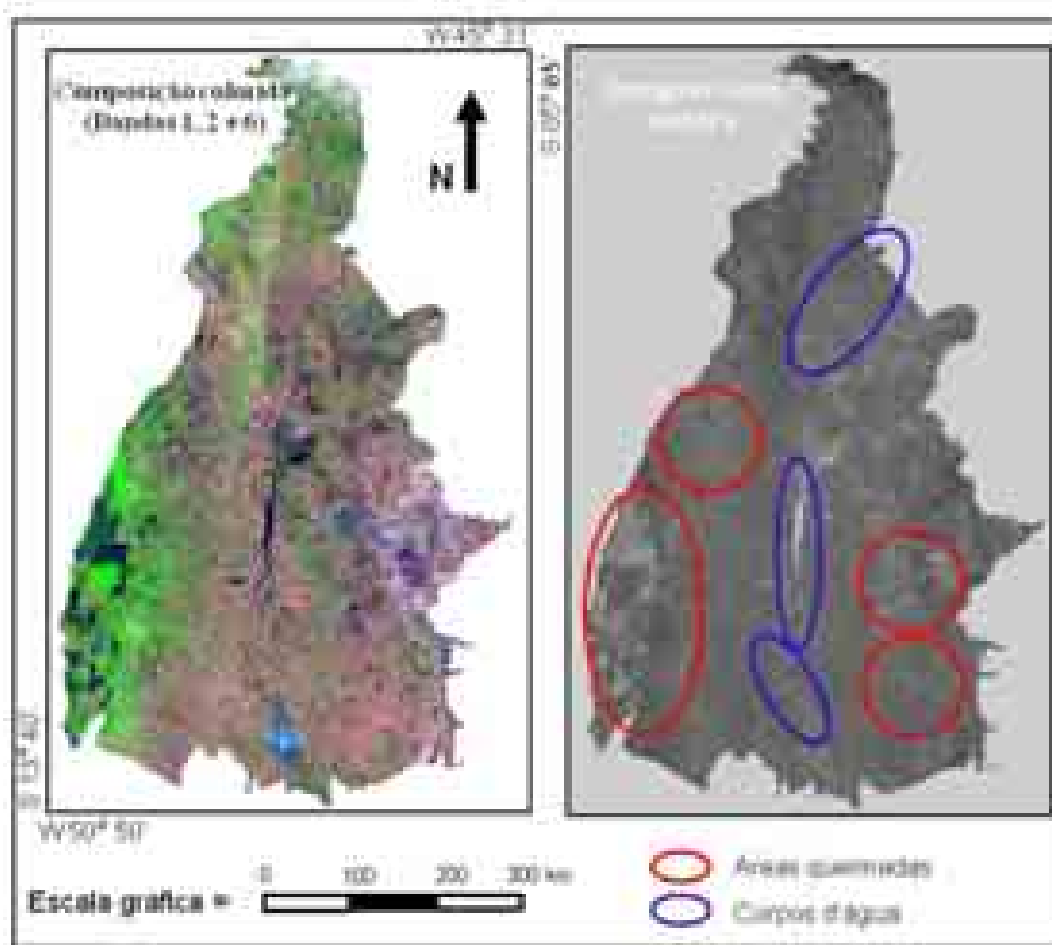


FIGURA 3.26 - Exemplo da imagem fração sombra correspondente ao dia 19/09/2005, gerada a partir da aplicação do MLME para o Estado de Tocantins. Em círculos vermelhos as áreas queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.

d) Classificação das imagens fração

A aplicação do MLME nos mosaicos de imagens selecionadas resultou em um conjunto de *pixels* realçados nas imagens fração sombra que compreendem tanto as áreas queimadas, como também outros alvos com propriedades espectrais semelhantes a essas áreas (corpos d'água, áreas alagadas e sombras de nuvens e de relevos). Essa restrição é sobrelevada diferenciando entre si os alvos espectralmente semelhantes por meio da classificação da imagem fração sombra.

A classificação é feita aplicando o algoritmo não supervisionado "ISOSEG", o qual, por se tratar de um classificador por regiões, requer da segmentação previa da imagem fração sombra e a extração de regiões previa à classificação. A segmentação é realizada por meio do método de crescimento por regiões, implementado no aplicativo SPRING, a fim de gerar unidades espectralmente homogêneas considerando algumas características intrínsecas como, por exemplo, o nível de cinza dos pixels, a textura e o contraste das cicatrizes do fogo.

O método de crescimento por regiões é uma técnica que agrupa regiões espacialmente adjacentes que são de interesse da aplicação rotulando cada *pixel* como uma região distinta valendo-se de um limiar de similaridade, definido como o limiar mínimo abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em um único polígono e o do limiar de área, referido ao tamanho mínimo de área (em números de *pixels*) para o estabelecimento de uma região segmentada.

No procedimento de Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas tanto Lima et al. (2009), como o autor (para a região do bioma Amazônia e do Cerrado, respectivamente), optaram por um limiar de similaridade igual a 8 (i.e. pixels com valores de similaridade inferior a 8 são agrupados) e um limiar de área igual a 4 (i.e. tamanho mínimo das áreas agrupadas). Os limiares foram estipulados com base na complexidade de forma, de dimensão e pelos desvios das médias dos valores apresentados pelos *pixels* representativos de cicatrizes de queimadas (Figura 3.27).

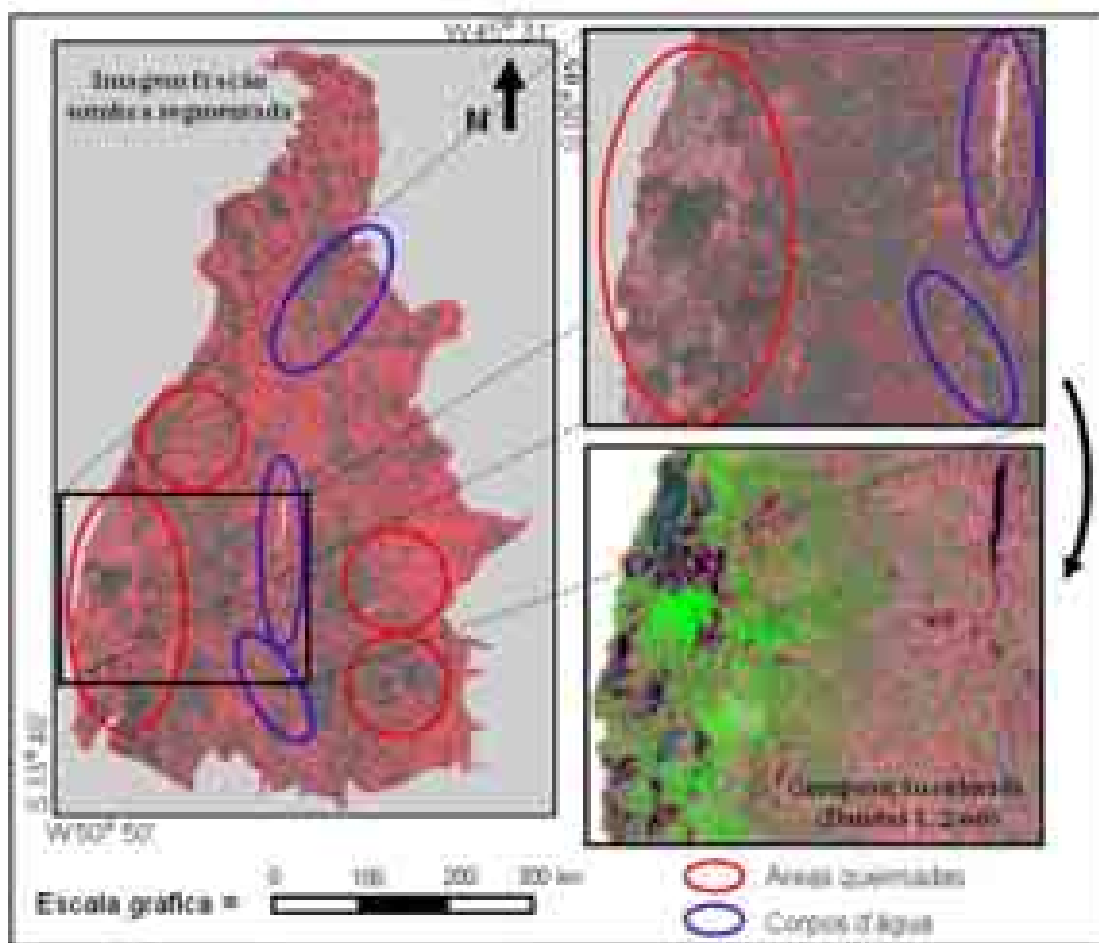


FIGURA 3.27 - Exemplo de segmentação da imagem fração sombra correspondente ao dia 19/09/2005 para o Estado de Tocantins, aplicando o método de crescimento por regiões. Em círculos vermelhos as áreas segmentadas representativas das queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.

Uma vez segmentada a imagem fração sombra criou-se no aplicativo SPRING um arquivo de contexto onde é armazenado o classificador utilizado, as bandas utilizadas e a imagem segmentada. Em seguida, procedeu-se com a extração dos atributos estatísticos (médias e matrizes de covariância) do conjunto de regiões definidas na segmentação e aplicou-se o algoritmo de classificação não supervisionado ISOSEG com limiar de aceitação de 75% (Figura 3.28).

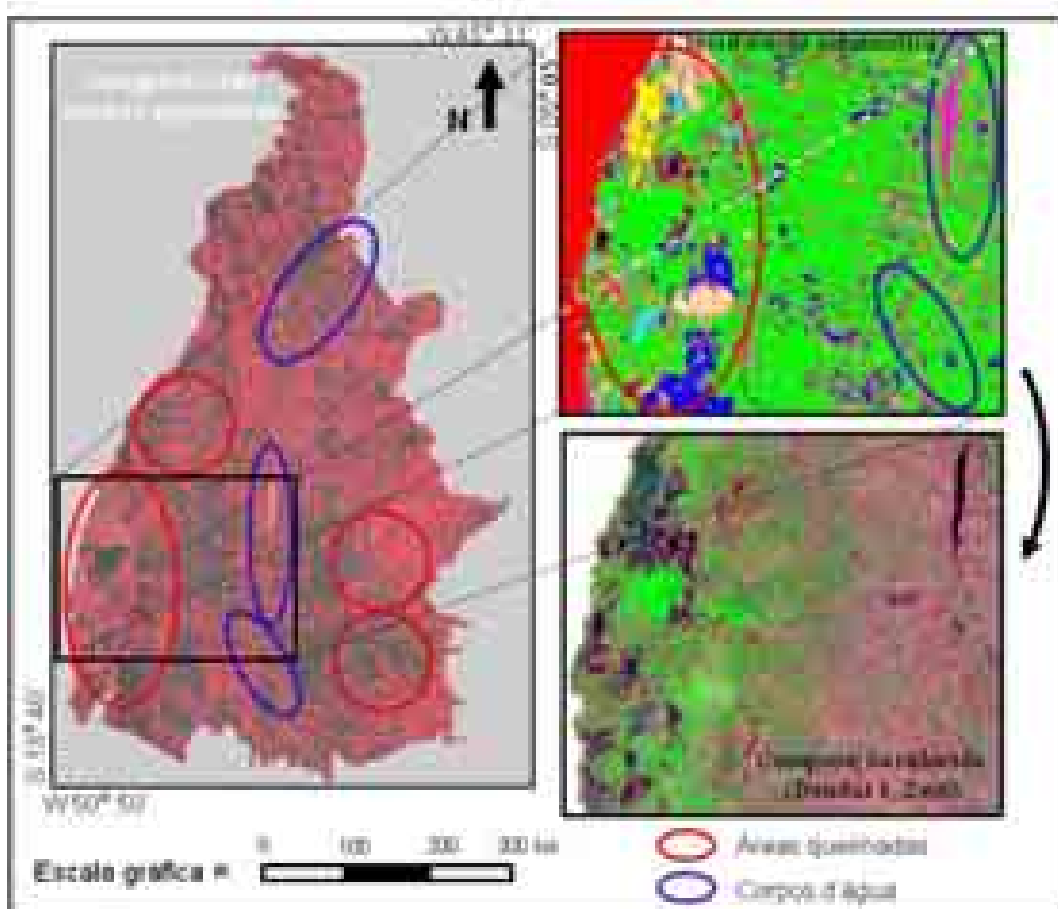


FIGURA 3.28 - Exemplo da classificação automática da imagem segmentada correspondente ao dia 19/09/2005 para o Estado de Tocantins, aplicando o algoritmo de classificação não supervisionado ISOSEG. Em círculos vermelhos as áreas classificadas como queimadas e em círculos azuis os corpos d'água.

Após a classificação da imagem segmentada é feito o mapeamento dos *pixels* homogêneos agrupados (regiões) que constituem áreas afetadas pela queima de biomassa, mediante a rotulação dessas áreas como sendo cicatrizes do fogo. Estas cicatrizes são definidas no banco de dados com a classe temática: Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas.

Finalmente, a classe: Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas gerado automaticamente foi sobreposta às respectivas imagens de refletância de superfície (MOD09) visando ajustar os erros de omissão e as falsas detecções de queimadas inerentes à classificação automática. O ajuste foi feito com o auxílio da interpretação visual diretamente na tela

do computador, mediante a edição dos polígonos classificados como sendo ou não cicatrizes do fogo (Figura 3.29).

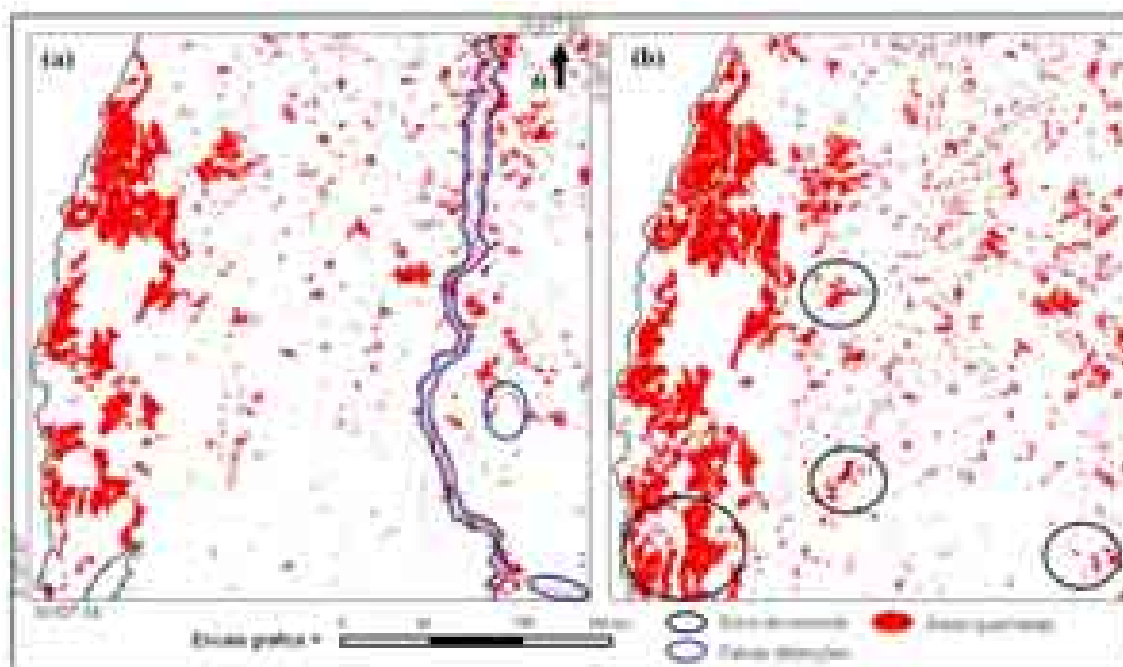


FIGURA 3.29 - Área total queimada em um setor do Estado de Tocantins: a) resultado do mapeamento gerado automaticamente e b) resultado da edição visual dos erros da classificação automática. Polígonos em azul representam falsas detecções e polígonos negros os erros de omissão.

3.3.3 Estimativa das emissões atmosféricas a partir da quantidade de biomassa queimada

No presente estudo as estimativas de emissões atmosféricas brutas foram realizadas a partir da integração de parâmetros que relacionam a quantidade da biomassa afetada pelo processo de queima, contida nas diferentes fisionomias vegetais da área de estudo, com a massa total de uma espécie química determinada (CO_2) emitida para atmosfera durante a queimada.

A estimativa da quantidade de biomassa fundamentou-se em dados de biomassa levantados no inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL (1981), conforme a metodologia aplicada no I Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2006), elaborado pela Fundação para a Ciência Aeroespacial,

Aplicações e Tecnologias (FUNCATE), transferidas a um mapa de vegetação e áreas antropizadas atualizado para o ano 2002.

O estoque de carbono utilizado nas estimativas de emissões atmosféricas brutas feitas no presente estudo foi estimado pela FUNCATE para o II Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, *no prelo*), empregando o modelo proposto por Higuchi (2004), a partir dos dados de biomassa constantes no inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL (1981). Cabe destacar que para o presente estudo foi contabilizado somente o carbono contido na biomassa aérea, como referido nos objetivos deste trabalho.

As emissões atmosféricas brutas do CO₂ (como gás de referência) foram estimativas para as diferentes fisionomias da área de estudo valendo-se do modelo proposto por Seiler e Crutzen (1980), como apresentado na equação 3.10. A estimativa de emissões é o produto de cinco parâmetros que relacionam a quantidade da biomassa queimada com os fluxos de emissões. Para isto, foi estimada, inicialmente, a quantidade de biomassa queimada (M).

$$M = A \times B \times E \quad (\text{peso da matéria seca}) \quad (3.10)$$

Sendo, A a área total queimada (ha); B a densidade da biomassa (t/ha); e E a eficiência da queima (adimensional).

Após a estimativa da quantidade de biomassa consumida pelo fogo (Equação 3.10), a massa total de CO₂ emitida durante a queimada é relacionada com M (Equação 3.11).

$$M(CO_2) = C \times M \quad (3.11)$$

Em que, $M(CO_2)$ é a massa total de CO₂ emitida (t); e C é o conteúdo de CO₂ na biomassa queimada (adimensional).

Posteriormente, a massa total de CO₂ emitida durante a queimada [$M(CO_2)$] foi relacionada com a eficiência da combustão (EC) (adimensional), utilizando a seguinte Equação:

$$M(\text{CO}_2) = C \times M \times EC \quad (3.12)$$

Onde, *EC* corresponde à fração de carbono emitido como CO₂.

A seguir são explicados os diferentes parâmetros utilizados para a estimativa de emissões globais brutas de CO₂ nos biomas Amazônia e Cerrado. Cabe destacar que a os parâmetros: eficiência da queima e eficiência da combustão utilizados neste estudo foram obtidos a partir de dados da literatura relativos aos biomas Amazônia e Cerrado.

a) Área total queimada

A área total queimada em ambos biomas estudados foi estimada a partir de diferentes produtos de áreas queimadas conforme descrito em 3.3.2, resultantes da aplicação de algoritmos automáticos, do modelo de mistura espectral e de procedimentos de interpretação e edição visual de imagens do sensor MODIS.

b) Estimativa da densidade da biomassa e do conteúdo de CO₂ para cada fisionomia da área de estudo

As estimativas da densidade da biomassa e do CO₂ no bioma Amazônia foram geradas para cada tipo fisionômico considerado no Projeto RADAMBRASIL (1981), baseadas em dados coletados em 2.042 sítios (unidades amostrais), para um total de 122.096 indivíduos amostrados. Esses dados apresentam medidas da circunferência à altura do peito (CAP) e da altura para cada árvore amostrada, agrupadas por unidade amostral, com as respectivas coordenadas geodésicas e indicação das folhas em escala 1:1.000.000 (Figura 3.30).

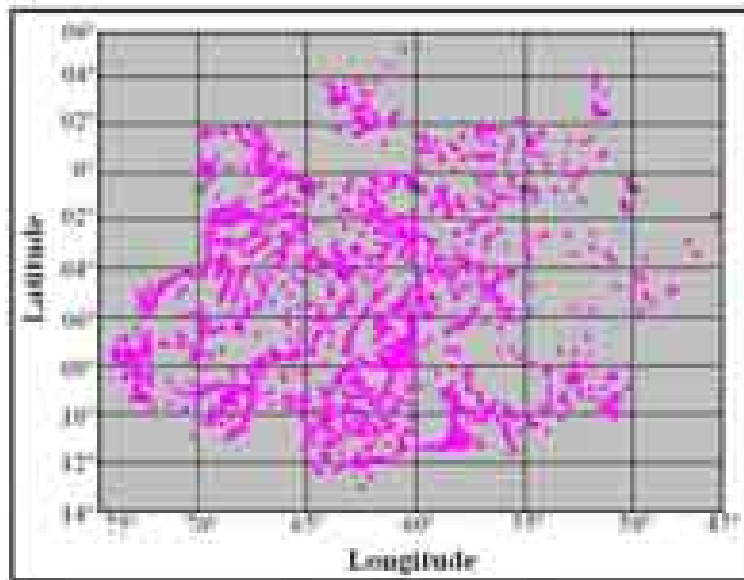


FIGURA 3.30 - Distribuição das unidades amostrais do Projeto RADAMBRASIL.
 FONTE: MCT (2006).

As unidades amostrais utilizadas compreenderam uma área de um hectare (20 m x 500 m). As medidas foram tomadas para os indivíduos com valor do CAP ≥ 100 cm (diâmetro à altura do peito - DAP - $\geq 31,83$ cm).

A estimativa da quantidade de biomassa e do carbono (CO₂) para cada indivíduo das unidades amostrais foi feita a partir do valor do DAP (≥ 20 cm), empregando o modelo proposto por Higuchi et al. (1998), adotado por MCT (2006), como apresentado na equação (3.11).

$$\ln P = -0,151 + 2,170 \ln D \quad (3.11)$$

$$D = \frac{\text{Circunferência}}{\pi}$$

$$P = e^{\ln P}$$

e

$$C = 0,2859 P$$

Onde, P é a biomassa aérea da árvore (kg); D é o diâmetro à altura do peito da árvore (cm); $e^{\ln P}$ é o inverso do logaritmo neperiano de P ; e C é o carbono (CO_2) contido na parte aérea de cada indivíduo (kg).

Em seguida, para cada unidade amostral (um hectare) foi estimada a densidade do carbono (CO_2) contido na biomassa área, mediante o somatório do carbono contido em cada indivíduo amostrado.

Para o bioma Cerrado foi estimada a densidade média da biomassa para cada tipo fisionômico de vegetação primária e sem perturbação significativa considerado no Projeto RADAMBRASIL (1981), com base aos dados disponíveis na literatura referentes a esse bioma (GOODLAND, 1971; DELITTI, 1984; CESAR et al., 1988; DELITTI e MEGURO, 1997). Por outro lado, a densidade do CO_2 foi estimada multiplicando-se a densidade de biomassa seca por um fator constante igual a 0,48 (CARVALHO et al., 1995). Cabe salientar que o Projeto RADAMBRASIL compreende parte do bioma Cerrado.

c) Caracterização do tipo de fisionomia vegetal afetada pelo processo de queima de biomassa.

A quantificação da biomassa e do conteúdo de carbono (parâmetros BC da equação 3.10) foi estimada por meio de mapas de vegetação atualizados para cada um dos biomas estudados. Para isto, as densidades da biomassa e do CO_2 do bioma Amazônia estimadas para cada tipo fisionômico de vegetação, a partir das unidades amostrais do Projeto RADAMBRASIL (1981), foram extrapoladas para mapas de vegetação atualizados para os anos de 1994 (MCT, 2006) e de 2002 (MCT, *no prelo*).

Os mapas de vegetação atualizados foram elaborados na escala de 1:250.000 a partir das informações contidas nos seguintes projetos: a) mapa de Vegetação do Projeto RADAMBRASIL (1981), na escala de 1: 1.000.000; b) mapa de Biomas Brasileiros e de Vegetação (IBGE, 2004), na escala de 1: 5.000.000; c) mapas do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO) para o bioma Amazônia (MMA, 2007); d) mapa de Vegetação do sistema de Vigilância

da Amazônia (SIVAM, 2006), ambos na escala de 1: 250.000; e e) estimativas anuais das taxas de desmatamento da Amazônia Legal brasileira obtidas do banco de dados do Projeto PRODES (INPE, 2008) ocorridas até o ano 2003, na escala de 1:250.000.

Além das informações temáticas e dos dados cartográficos provenientes dos projetos anteriormente indicados, na elaboração dos mapas de vegetação atualizados para o ano 1994 e 2002 foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM. O levantamento incluiu o mapeamento tanto de áreas naturais quanto de áreas antropizadas como: florestas (natural, plantada ou secundária), áreas agrícolas, pastagens, solo exposto, áreas urbanas, corpos d'água, nuvens e as respectivas sombras.

Para o mapeamento da vegetação e das áreas antropizadas do ano 2002 (ano base) foram selecionadas imagens Landsat/TM compreendidas no período de 10/03/2001 a 03/11/2004. No mapeamento feito para o ano 1994 (ano base) empregaram-se imagens Landsat/TM compreendidas no período de 24/05/1993 a 04/11/95. No total foram empregadas 213 cenas Landsat/TM para ambos anos bases (1994 e 2002). Cabe salientar que foi necessário selecionar cenas Landsat/TM para um período superior ao correspondente a cada ano base, visando reunir um conjunto de cenas de boa qualidade e com a menor cobertura de nuvens possíveis.

As imagens Landsat/TM selecionadas referentes ao ano base de 1994 foram georreferenciadas na escala de 1:250.000, de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (BRASIL, 1984), utilizando o mosaico ortorretificado *Geocover* de imagens Landsat/TM-5 (Nasa, *online_d*) com resolução espacial de 30 m. Posteriormente, o registro das imagens Landsat/TM referentes ao ano base de 2002, foi realizado com base nas imagens do ano base de 1994, mantendo as mesmas características e padrões cartográficos dessas últimas (MCT, *no prelo*).

A atualização do mapa de vegetação do ano 1994 (MCT, 2006) foi feita tomando como base os seguintes projetos: a) mapa de Vegetação do Projeto RADAMBRASIL (1981), a partir do qual foram agrupadas as classes de vegetação originais (em nível de subclasses) para o nível de subformações vegetais; b) Projeto PRODES (INPE, 2008) (Figura 3.31); e c) as cenas Landsat/TM.

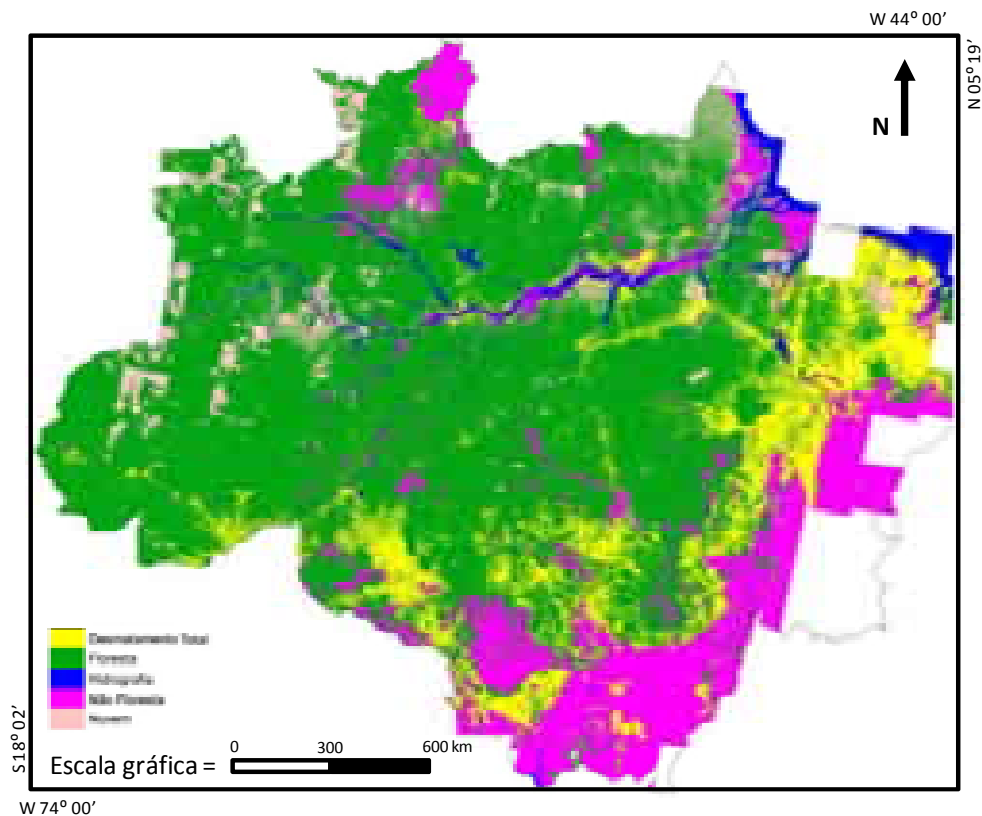


FIGURA 3.31 - Desmatamento no bioma Amazônia até o ano 2004.
 FONTE: INPE (2008).

A atualização do mapa de vegetação do ano 2002 (MCT, *no prelo*) (Figura 3.32) foi feita a partir do mapa de vegetação do ano 1994, tomando como base o mapa do Projeto PROBIO para o bioma Amazônia (MMA, 2007). No entanto, devido à falta de padronização na legenda dos mapas utilizados para a atualização das coberturas vegetais, as classes de vegetação do Projeto PROBIO para a Amazônia (MMA, 2007) foram associadas e adaptadas às classes agrupadas do mapa de vegetação do ano 1994 (MCT, 2006), mantendo a legenda definida pelo IBGE (2004).

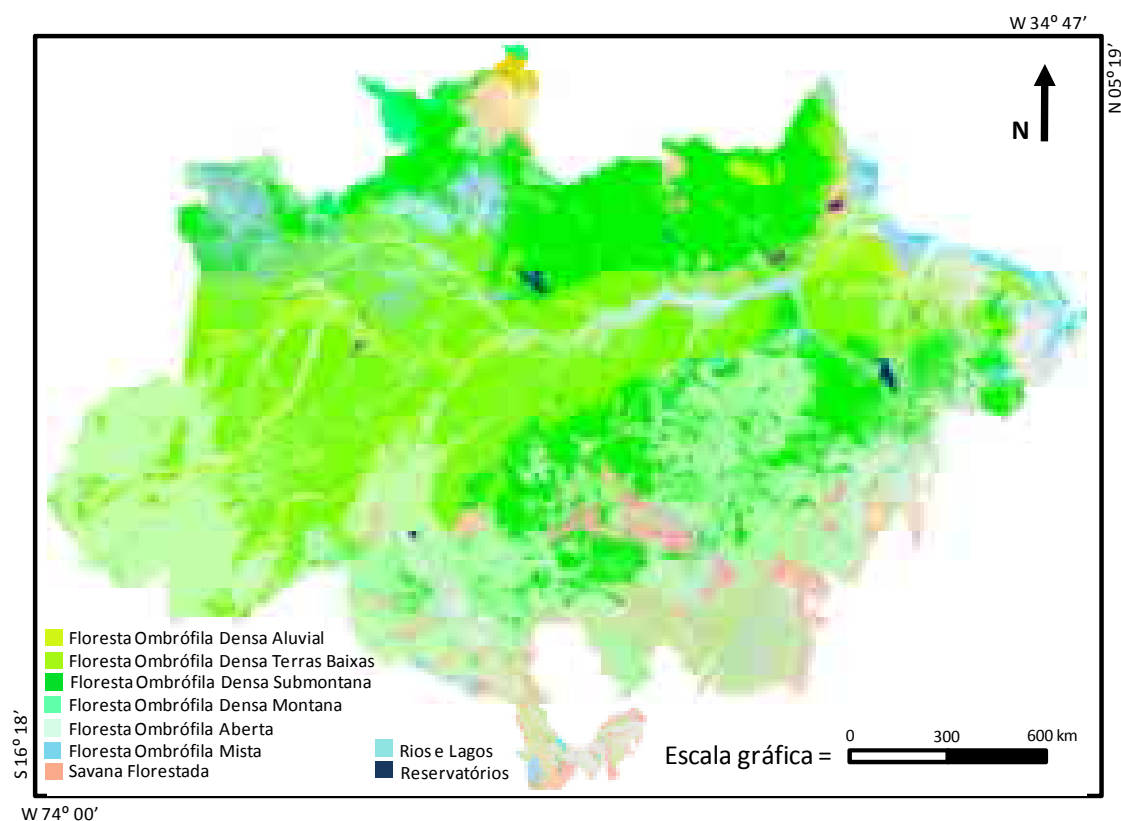


FIGURA 3.32 - Mapa de vegetação atualizado para o ano 2002 (Bioma Amazônia).
 FONTE: MCT (*no prelo*).

Em seguida, obteve-se a média de carbono na biomassa aérea, para cada tipo de vegetação considerado e em cada mapa de vegetação em escala 1:1.000.000, de acordo com as regras descritas a seguir, modificadas em relação ao I Inventário, aplicada em seqüência:

- 1) havendo amostras da classe agrupada no mapa, utilizou-se o valor médio da densidade de carbono das amostras da classe agrupada no mapa;
- 2) não havendo amostras da classe agrupada no mapa, utilizou-se a média da densidade de carbono da biomassa aérea da vegetação da mesma classe agrupada nos mapas vizinhos (no mínimo um e no máximo oito mapas);
- 3) Não havendo amostras da classe agrupada nos mapas vizinhos, utilizou-se a média das médias, estimadas na regra 2, da densidade de carbono da biomassa aérea da vegetação da mesma classe agrupada nos mapas vizinhos;

- 4) não havendo dados para essa classe agrupada nos mapas vizinhos, utilizou-se a média de carbono da biomassa aérea da vegetação dessa classe agrupada em todos os mapas; e
- 5) não havendo dados dessa classe agrupada em nenhum mapa, utilizou-se a média de carbono da biomassa aérea da vegetação em todos os mapas de uma classe agrupada que se assemelhe a essa. O critério de semelhança obedeceu à seguinte seqüência:
 - 5.1) uma subclasse sem dados é semelhante à subclasse inferior da mesma classe, quando disponível;
 - 5.2) não havendo dados em uma subclasse inferior da mesma classe, esta é semelhante à subclasse mais próxima disponível;
 - 5.3) nas regiões de contato, uma classe sem dados é semelhante à subclasse da fisionomia predominante;

No bioma Cerrado as densidades da biomassa e do CO₂, estimadas para cada tipo fisionômico de vegetação a partir das unidades amostrais do Projeto RADAMBRASIL (1981) e ajustadas com dados da literatura (MCT, 2006), foram transferidas para o mapa de vegetação do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira para o bioma Cerrado (PROBIO) (MMA, 2004).

O mapa PROBIO para o bioma Cerrado (MMA, 2004) (Figura 3.33) foi gerado na escala de 1:250.000 a partir da interpretação de 114 cenas Landsat/TM+ correspondentes à estação seca do ano 2002 (ano base). O mapeamento das diferentes unidades de vegetação e a diferenciação das áreas de pastagem natural das áreas de pastagem cultivadas contou com o auxílio da verificação em campo, do Censo Agropecuário do IBGE (1998) e das iniciativas mais importantes de mapeamento de uso e cobertura vegetal disponíveis para o bioma Cerrado, como: a) mapa de Vegetação do Projeto RADAMBRASIL (1981), na escala de 1:1.000.000, atualizado com imagens Landsat/ETM+ para o ano 2002; b) mapeamento da cobertura vegetal do estado de Goiás, na escala de 1:250.000, atualizado com imagens Landsat/ETM+ para o ano 2002; c) mapeamento de desmatamento do estado de Mato Grosso, elaborado pelo governo do

estado de Mato Grosso, na escala de 1:250.000; e d) cartas de serviço na escala de 1:250.000 do Projeto RADAMBRASIL, correspondentes ao material de campo utilizado por técnicos do projeto para a elaboração dos mapas fitoecológicos, divulgados na escala de 1:1.000.000.

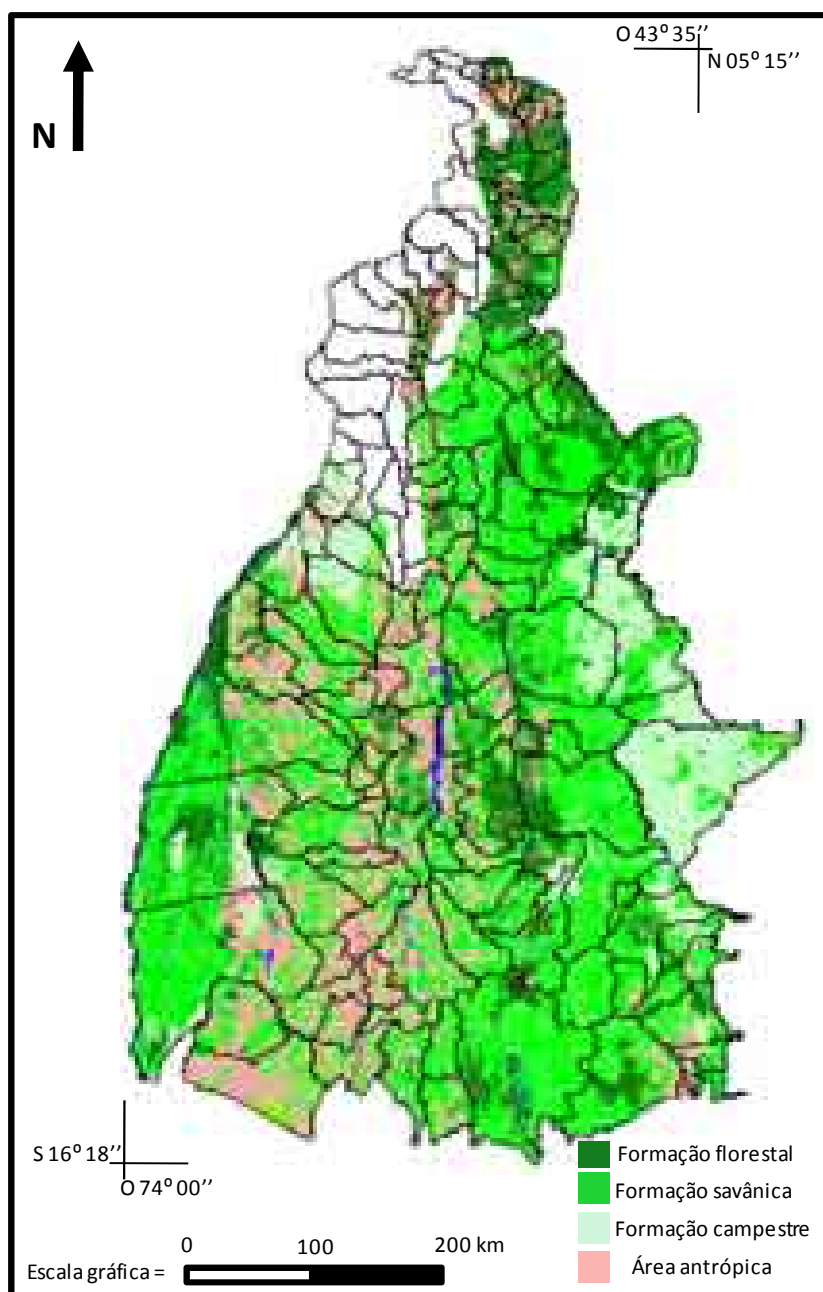


FIGURA 3.33 - Mapa do Projeto PROBIO para o bioma Cerrado, correspondente ao estado Tocantins.
FONTE: MMA (2004).

O mapeamento da cobertura vegetal natural do projeto PROBIO para o bioma Cerrado fundamentou-se no Sistema de Classificação da Vegetação Brasileira proposta pelo IBGE (1992), até o nível de subformação. Em relação à cobertura vegetal antropizada, foram mapeadas as seguintes classes: cultura agrícola, pastagens cultivadas, reflorestamento, áreas urbanas e áreas degradadas por mineração.

3.3.4 Avaliação das estimativas de área queimada

A exatidão dos diferentes produtos utilizados no presente estudo para as estimativas das áreas queimadas (*Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, *MCD45*, e *Deteção de Área Queimada*) foi avaliada a partir da interpretação das cicatrizes do fogo detectadas com imagens do sensor TM/Landsat, relativas a duas áreas pilotos localizadas nos estados Acre e Rondônia, doravante denominadas classificação de referência (Figura 3.34).



FIGURA 3.34 - Localização das áreas pilotos utilizadas na validação dos produtos de áreas queimadas.

A identificação das cicatrizes do fogo na classificação de referência foi feita mediante interpretação visual das bandas 3 (0,63-0,69 μm), 4 (0,76-0,90 μm) e 5 (1,55-1,75 μm) do sensor TM/Landsat-5 e +ETM/Landsat-7, com resolução espacial nominal de 30 m. Para o estado do Acre foram utilizadas imagens de órbita/ponto 02/067, correspondentes ao período entre julho e outubro de 2005; e em Rondônia as imagens de órbita/ponto 231/067, entre junho e outubro de 2005 (Tabela 3.2).

TABELA 3.2 - Imagens TM/Landsat utilizadas na validação dos produtos de área queimada.

Setores	Datas (ano 2005)				
Acre	-	09/julho	10/agosto	11/setembro	13/outubro
Rondônia	11/junho	13/julho	14/agosto	15/setembro	01/outubro

A avaliação das estimativas de áreas queimadas fundamentou-se na determinação do grau de concordância entre os produtos de áreas queimadas e a verdade terrestre ou classificação de referência, por meio da matriz de erros ou matriz de confusão. Para cada produto de áreas queimadas foi gerada uma matriz de erros e calculados os índices estatísticos de exatidão para classificações e as respectivas variâncias: Global e Tau, de acordo com as relações específicas para cada índice (MA e REDMOND, 1995).

O índice de exatidão Global (G) e sua variância (σ_G^2) foram determinados pelas seguintes relações:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad (3.12)$$

$$\sigma_G^2 = \frac{P_0(1 - P_0)}{N} \quad (3.13)$$

Em que, n_{ii} são os elementos da diagonal da matriz de erros; N é o número total de *pixels* contemplados na matriz de erros; M é o número de classes; e P_0 representa a proporção de unidades que concordam.

O índice índice Tau (\mathcal{T}) e sua variância ($\sigma_{\mathcal{T}}^2$) foram determinados por:

Para o índice Tau (T), tem-se

$$T = \frac{P_0 - 1/M}{1 - 1/M} \quad (3.14)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{P_0(1 - P_0)}{N(1 - 1/M)^2} \quad (3.15)$$

As relações para P_0 podem ser explicitadas por:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad (3.16)$$

Em seguida, visando comparar os resultados das classificações e os respectivos índices de exatidão (C_1 e C_2), foi testada a significância entre os índices aplicando o teste estatístico Z , no nível de 95% de probabilidade (equação 3.17).

$$Z = \frac{C_1 - C_2}{\sqrt{\sigma_{K_1}^2 + \sigma_{K_2}^2}} \quad (3.17)$$

A Tabela 3.3 é um exemplo da matriz de erros, onde os elementos da diagonal representam os *pixels* corretamente classificados (áreas queimadas) e os elementos fora da diagonal os erros na classificação (CONGALTON, 1991). A partir da matriz de erros é possível obter dois tipos de índices, os erros de comissão (EC) e os erros de omissão (EO). Para a classe A os erros de comissão e omissão são calculados adotando as equações:

$$EC = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.18)$$

$$EO = \frac{P_{21}}{P_{11} + P_{21}} \quad (3.19)$$

TABELA 3.3 - Exemplo da matriz de erros.

Classificação de Controle (Linhas)	Classificação de Referência (Colunas)		$\sum X_{i+}$
	Classe A (Queimadas)	Classe B (Não Queimadas)	
Classe A (Queimadas)	P_{11}	P_{12}	$P_{11}+P_{12}$
Classe B (Não Queimadas)	P_{21}	P_{22}	$P_{21}+P_{22}$
$\sum X_{+i}$	$P_{11}+P_{21}$	$P_{12}+P_{22}$	N

Os erros de comissão da classe A (Equação 3.18) é a porcentagem de *pixels* desta classe classificados como queimadas na classificação de controle, mas que correspondem a áreas não queimadas na classificação de referência. Enquanto que os erros de omissão (Equação 3.19) referem-se à porcentagem de *pixels* classificados como áreas não queimadas na classificação de controle, porém correspondem a áreas queimadas na classificação de referência.

A avaliação das estimativas de áreas queimadas contou também com uma análise de regressão entre a classificação de referência e os produtos de áreas queimadas. Para isto, foram divididas empiricamente as áreas pilotos em células de 5 x 5 (km²). Por outro lado, a avaliação quantitativa dos produtos de áreas queimadas foi complementada mediante análise visual dos resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos de quantificação de áreas queimadas, visando a compreensão dos processos de queima da biomassa em toda área de estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estimativas da área queimada

No presente estudo foi avaliado o desempenho de três produtos para estimar a extensão de áreas queimadas gerados a partir de dados do sensor MODIS/Aqua e Terra de diferentes resoluções espaciais (250, 500 e 1000 m) relativos aos biomas Amazônia (Figuras 4.1 a 4.3) e Cerrado (Figuras 4.4 a 4.5). A estimativa da área queimada estimada com esses produtos foi uma das variáveis de entrada no método para estimar as emissões dos principais GEE associados à queima de biomassa nos biomas Amazônia e Cerrado. Avaliou-se, também, um quarto produto para a detecção de anomalias termais (indicativas de possíveis queimadas), baseado em um algoritmo de detecção automática de queimadas ativas (Figuras 4.7 e 4.8).

O produto de detecção de anomalias termais foi utilizado no presente estudo com a finalidade de avaliar o seu desempenho para estimar emissões atmosféricas brutas, relativas aos produtos de quantificação de áreas queimadas. Isto, considerando que algoritmos de detecção de focos de calor têm sido amplamente utilizados pela comunidade científica como parâmetro de quantificação da biomassa queimada nas estimativas de emissões dos principais GEE, na ausência de dados de área queimada. É o caso dos trabalhos publicados por: Meyer et al. (2008); Jain (2007); Duncan, et al. (2003); Justice et al. (2002a); Potter et al. (2002); Potter et al. (2001) entre outros.

4.1.1 Estimativa da área queimada para cada produto de áreas queimadas

Os produtos utilizados neste estudo para estimar a extensão de áreas queimadas nos biomas Amazônia e Cerrado foram desenvolvidos a partir de algoritmos de detecção automática e de técnicas de classificação empírica (item 3.3.2), aplicando critérios diferenciados para a detecção das queimadas. As estimativas são apresentadas na Tabela 4.1 e de forma gráfica na Figura 4.9.

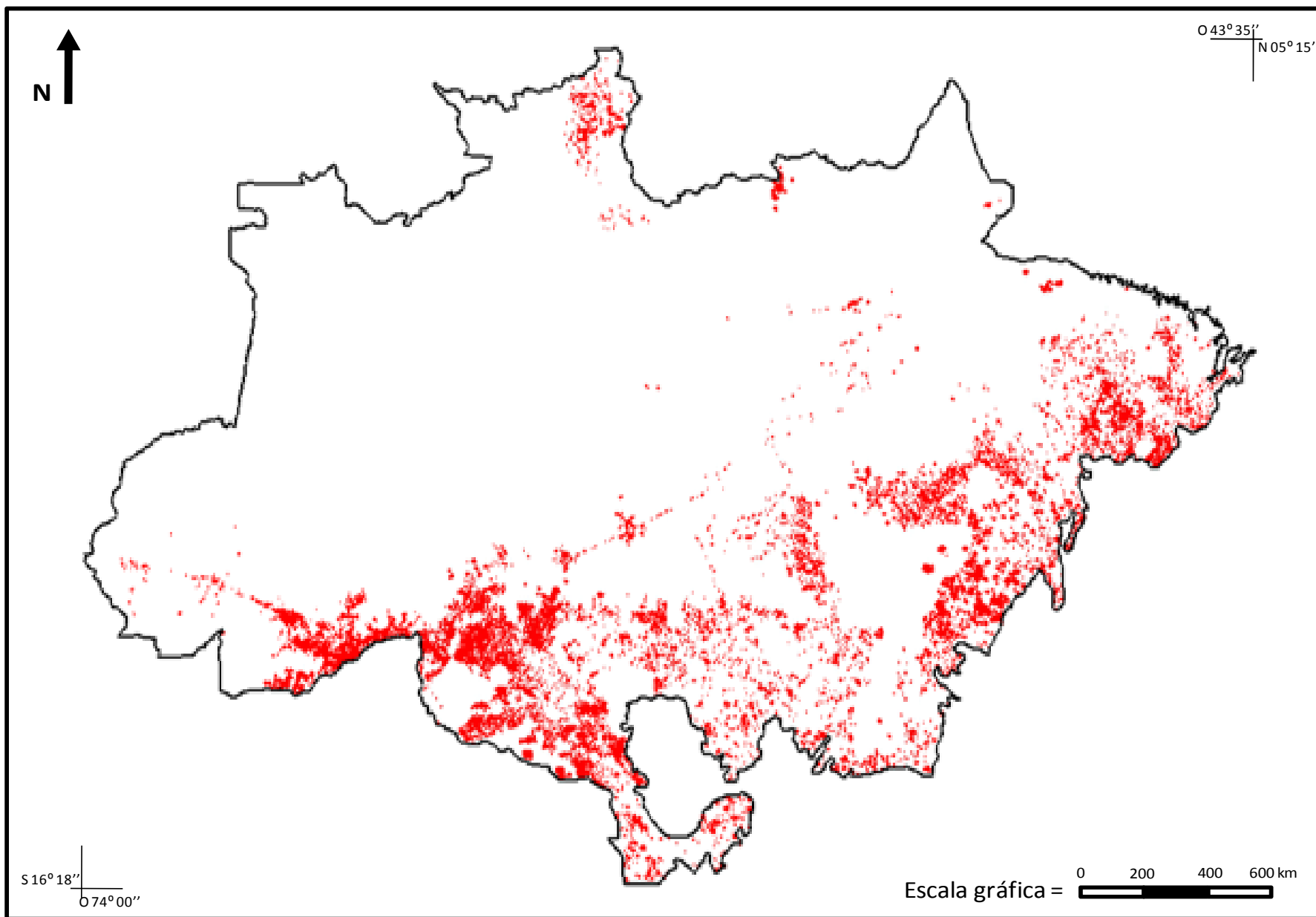


FIGURA 4.1 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* no bioma Amazônia

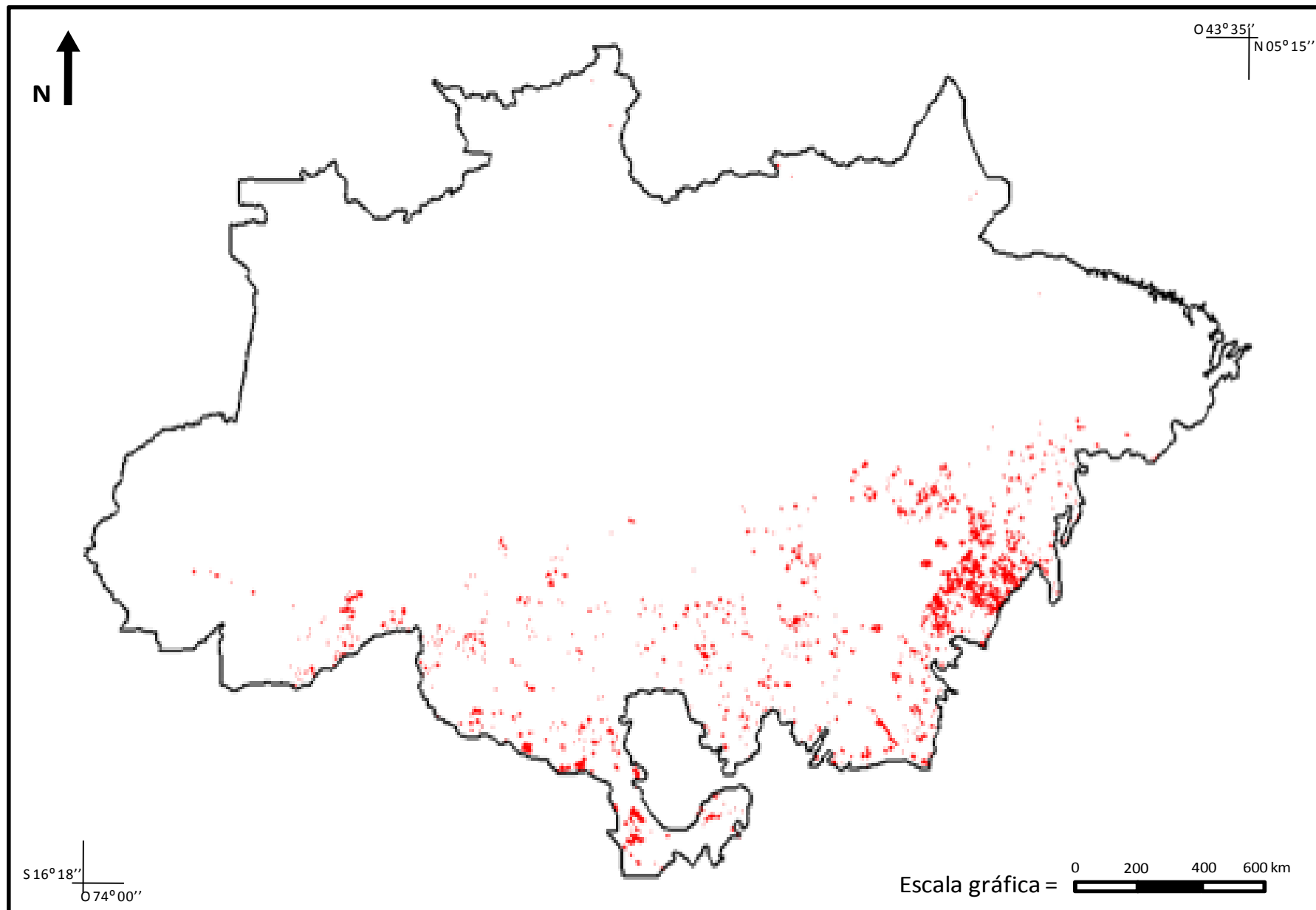


FIGURA 4.2 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *MCD45* no bioma Amazônia

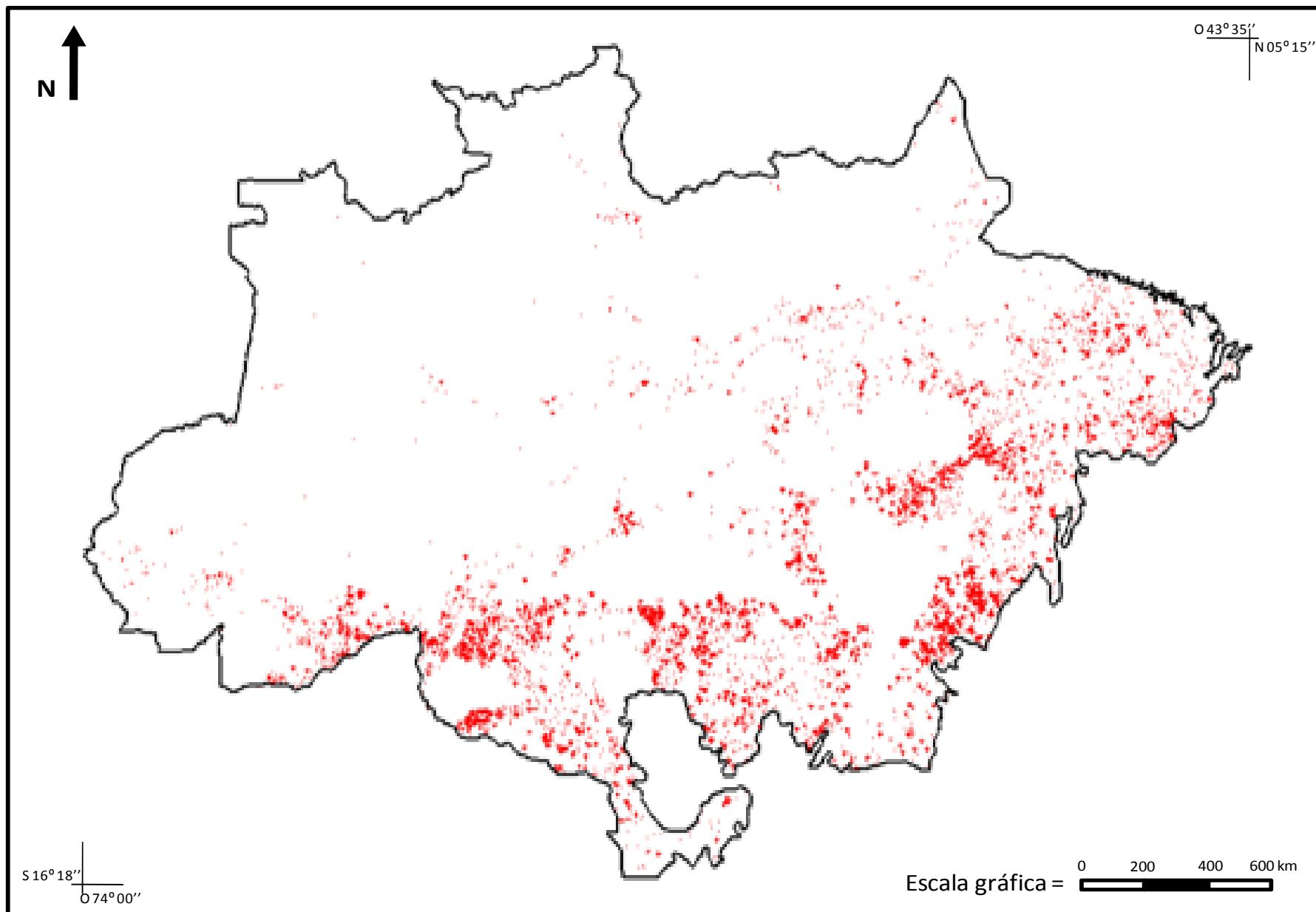


FIGURA 4.3 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Deteção de Área Queimada* no bioma Amazônia

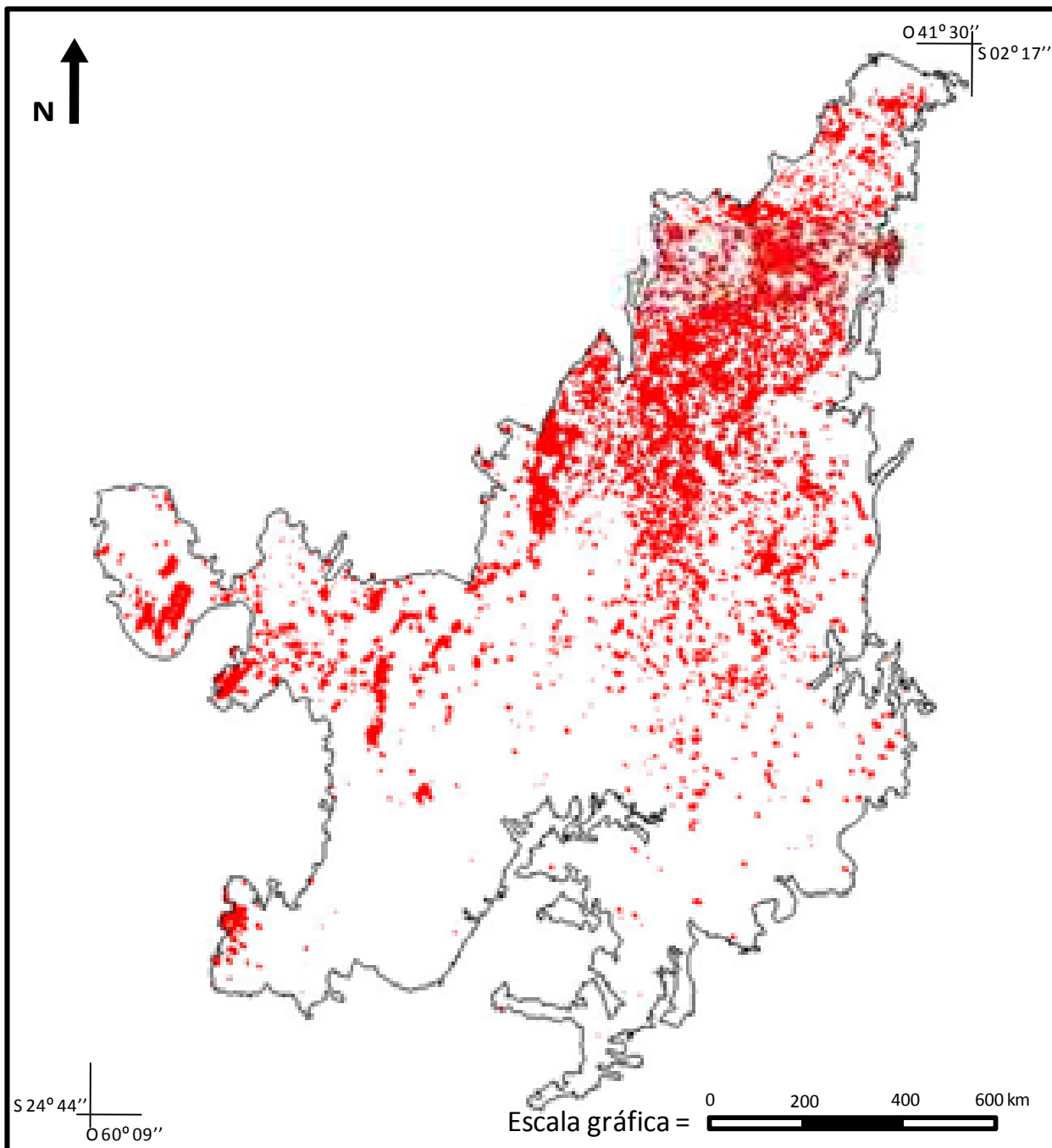


FIGURA 4.4 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* no bioma Cerrado.

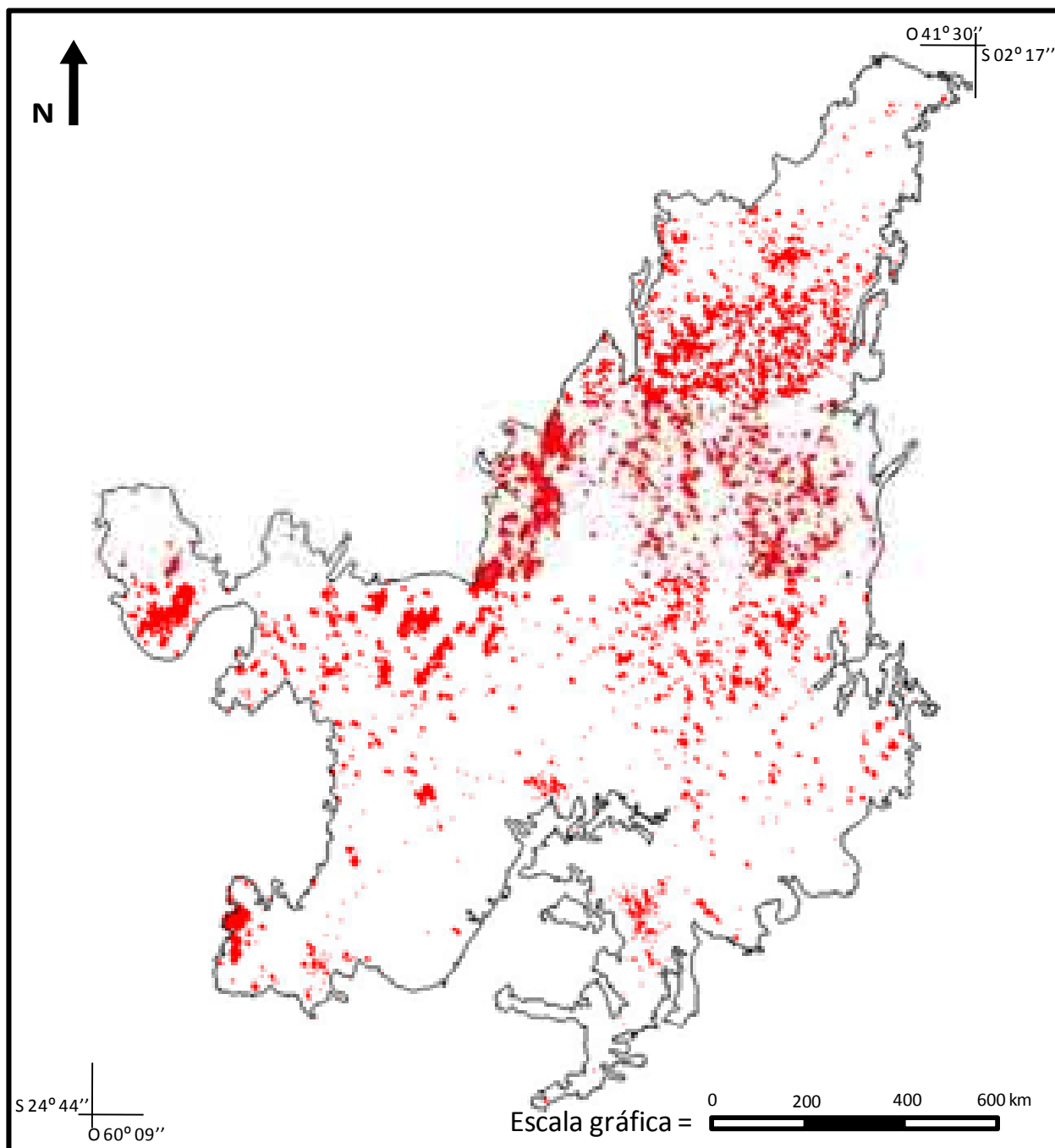


FIGURA 4.5 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *MCD45* no bioma Cerrado.

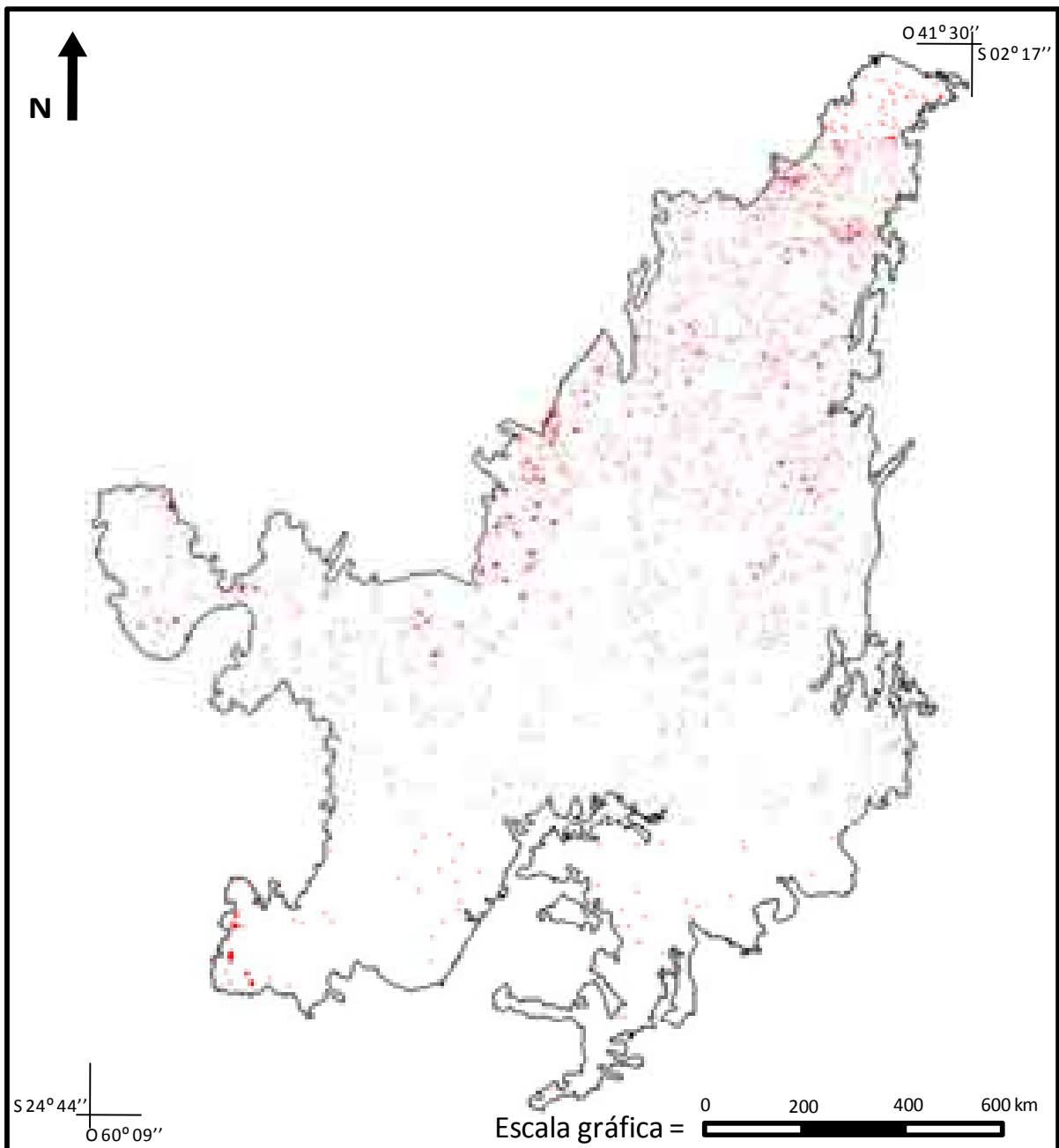


FIGURA 4.6 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Deteccção de Área Queimada* no bioma Cerrado.

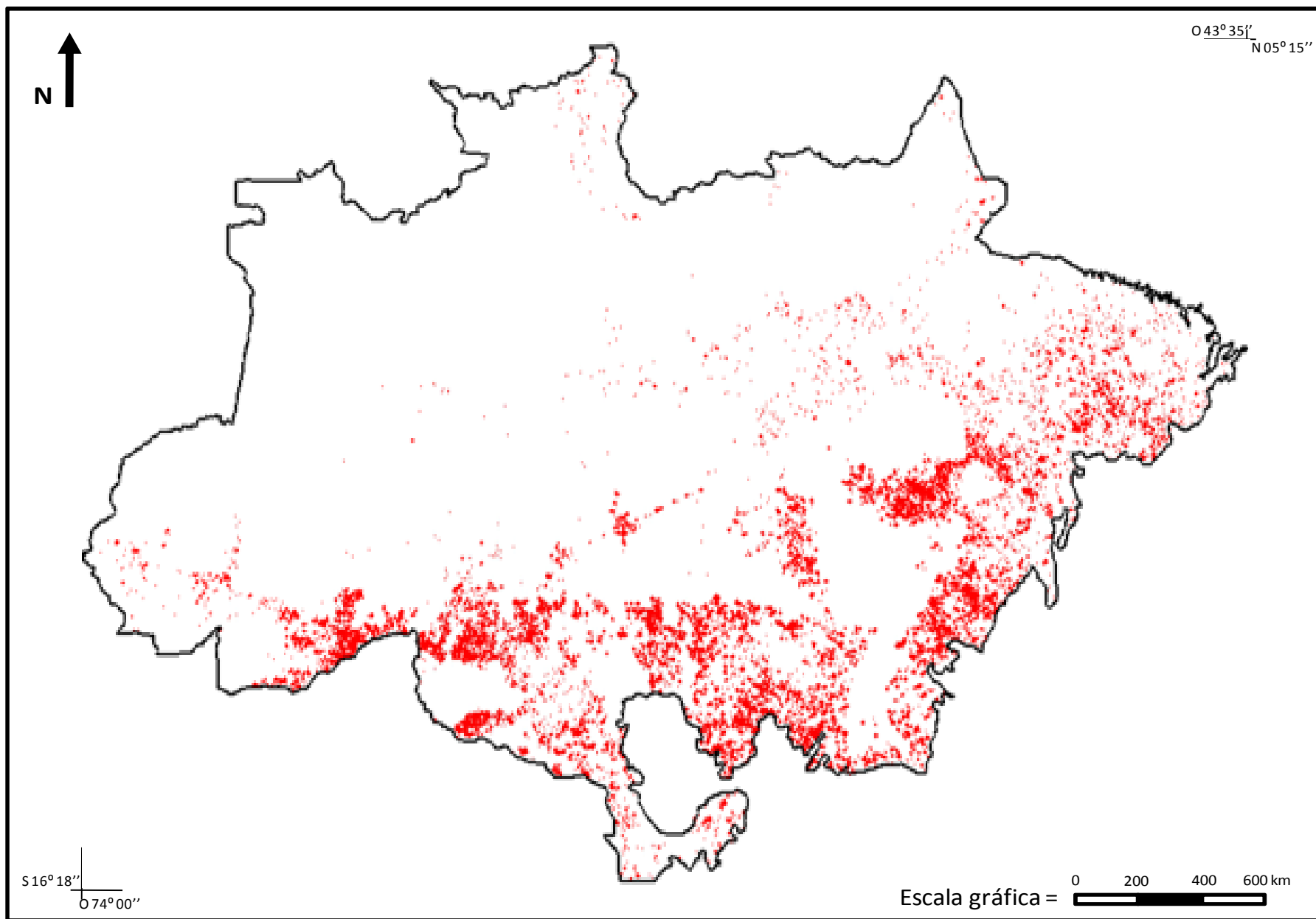


FIGURA 4.7 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Anomalia Termal* no bioma Amazônia.

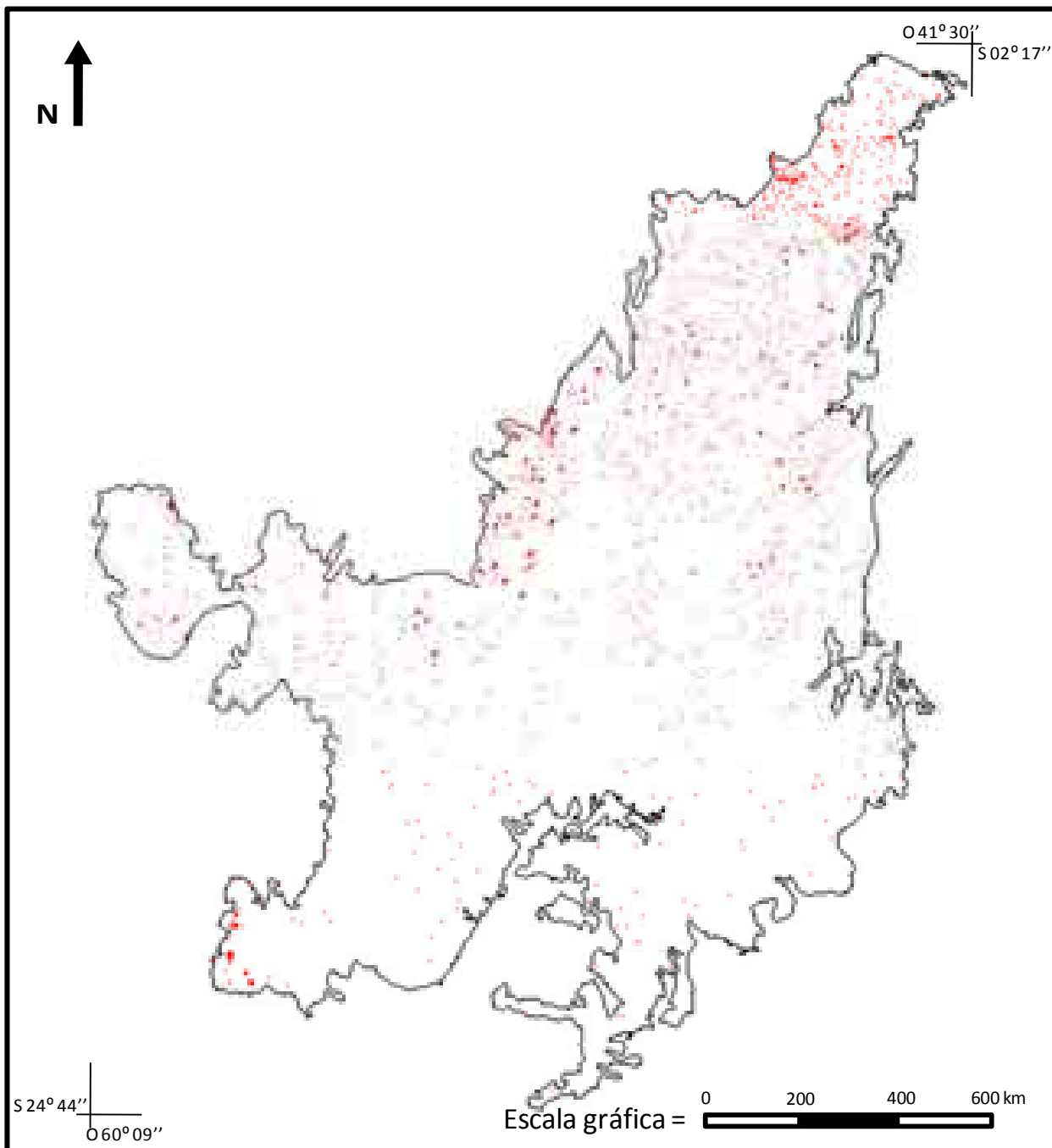


FIGURA 4.8 - Área queimada (2005) estimada pelo produto *Anomalia Termal* no bioma Cerrado.

TABELA 4.1 - Estimativa da área queimada nos bioma Amazônia (AM) e Cerrado (CE) utilizando diferentes algoritmos.

PRODUTOS DE AREAS QUEIMADAS (km ²)				
	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Anomalia Termal
Bioma AM	70.500	20.900	64.100	149.200
Bioma CE	115.700	77.400	26.000	80.400
TOTAL	186.200	98.300	90.100	229.600

Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (250 m de resolução espacial)

Produto 2= Detecção de Mudanças ou MCD45 (500 m de resolução espacial)

Produto 3= Detecção de Área Queimada (1000 m de resolução espacial)

Anomalia Termal= Detecção de Anomalias Termais ou MCD14, em km² (1000 m de resolução espacial)

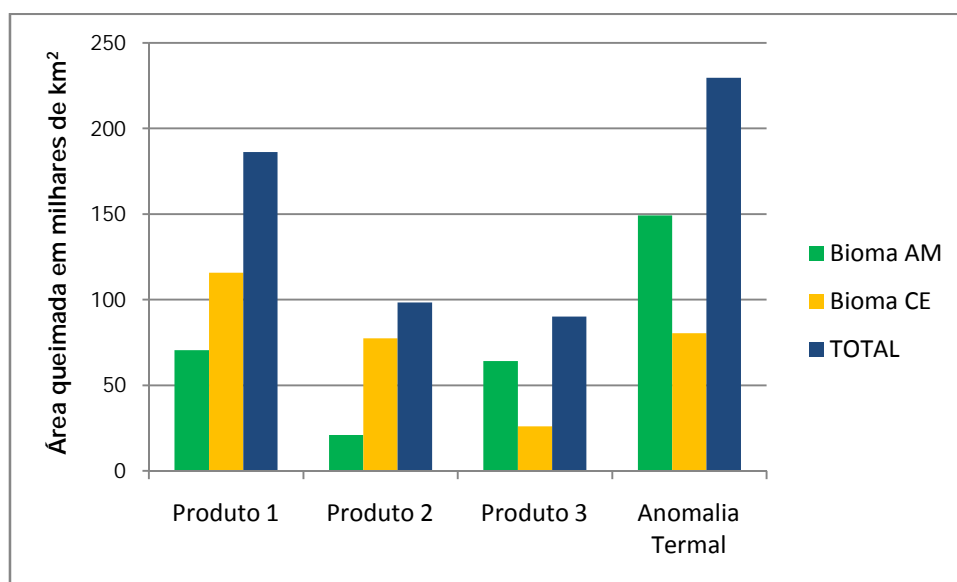


FIGURA 4.9 - Diagrama de barras indicando as estimativas de área queimada nos biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE) geradas a partir dos seguintes produtos: a) Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (Produto 1), b) MCD45 (Produto 2), c) Detecção de Área Queimada (Produto 3), e d) MCD14 (Anomalia Termal).

Os resultados para o bioma Amazônia indicam diferenças não significativas entre as estimativas da extensão da área queimada utilizando os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (250 m de resolução espacial) e *Detecção de Área Queimada* (1000 m de resolução espacial). A diferença entre as estimativas geradas por esses dois produtos foi de 6.410 km²; o primeiro produto gerando uma estimativa 9% maior para a extensão de área queimada do que o segundo produto. No entanto, a área queimada

estimada por esses produtos difere significativamente daquela gerada pelos produtos *MCD45* (500 m de resolução espacial) e *MOD14* (500 m de resolução espacial), verificando-se uma diferença com um fator de cerca de três (3) vezes para menos e de duas (2) vezes para mais, respectivamente.

No bioma Cerrado, os resultados apontam para diferenças não significativas entre o produto *MCD45* e *MOD14*; ou seja, uma diferença de 3.000 km² ou de apenas 3% maior para este último produto. Contudo, a avaliação do desempenho dos três produtos de áreas queimadas aponta para diferenças significativas nas estimativas de área queimada geradas pelos mesmos. Ao comparar os resultados, observa-se que o produto *MCD45* gerou uma estimativa 66% maior do que a gerada pelo produto *Detecção de Área Queimada*; e o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* 33% maior do que a gerada pelo produto *MCD45*. Isto significa uma diferença de 77% entre o maior e o menor valor estimado para a área queimada no bioma Cerrado, ou de um fator de mais de quatro vezes.

Como pode ser observado na Tabela 4.1 e na Figura 4.9, os resultados apresentados apontam para discrepâncias expressivas nas estimativas obtidas a partir dos produtos de queimadas para um mesmo bioma, a exceção das consistências observadas entre os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *Detecção de Área Queimada* para o bioma Amazônia; e entre os produtos *MCD45* e *MOD14* para o bioma Cerrado.

Dentre as causas que podem explicar os valores menores para as estimativas de área queimada utilizando os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*, respectivamente, para os biomas Amazônia e Cerrado, pode-se citar como primeira aproximação, a influência exercida pelos critérios de identificação de áreas queimadas definidos nos algoritmos de detecção automática, através dos quais é modelado o comportamento do fogo.

A tarefa de modelar o comportamento do fogo é atualmente complexa, pois requer sintetizar através de um algoritmo, em uma seqüência lógica de operadores numéricos (e.g. estimativa do IVDN, refletâncias de superfície, temperatura de brilho) ou booleanos (e.g. maior, menor, igual) todas as variantes possíveis para identificar áreas queimadas ao longo de séries temporais, como, por exemplo, a detecção de mudanças

na cobertura da terra associadas à ocorrência de queimadas ou diferenciar essas de alvos espectralmente similares (e.g. sombras de nuvens ou relevos e corpos d'água).

Neste sentido, a identificação correta das áreas queimadas valendo-se de algoritmos de detecção automática aplicados em escalas regionais ou globais, é determinada por seqüências lógicas que podem apresentar um desempenho adequado para um ecossistema determinado, mas não para uma diversidade de ecossistemas. Isto é, o produto *Detecção de Área Queimada* pode ser adequado para gerar estimativas de área queimada para o bioma Amazônia, mas não ser adequado para outro tipo de bioma, como o Cerrado, por exemplo.

Uma forma de minimizar essas incertezas é ajustar os limiares estatísticos e espectrais associados às mudanças na cobertura da terra, indicativas de possíveis ocorrências de queimadas, para regiões específicas do Brasil. No caso do produto *MCD45*, ajustes poderiam estar relacionados aos seguintes:

- a) limiares estatísticos utilizados para determinar as discrepâncias entre os valores de refletância de superfície preditos e observados, os quais podem ser atribuídos a mudanças persistentes na cobertura da terra (possíveis queimadas) ou temporárias (e. g. nuvens, sombras e ruídos);
- b) parâmetros que determinam o erro do modelo BRDF de predição (e.g. o valor predeterminado do ruído ou dos resíduos do modelo BRDF invertido) utilizados para testar se existem, de fato, mudanças nas refletâncias de superfície dos valores preditos; e
- c) condições e procedimentos iterativos implementados por este algoritmo (operadores booleanos) para decidir se um candidato a queimada (*pixel*) pode ser selecionado como área queimada, e à possibilidade de que algum candidato a queimada, que tenha sido rejeitado em uma iteração, possa ser selecionado como *pixel* representativo de queimadas em sucessivas iterações, aplicando novas condições.

No caso do produto *Detecção de Área Queimada* os ajustes estariam relacionados à flexibilização tanto dos limiares espectrais de detecção de mudanças (IVDN), quanto das diferenças entre as temperaturas de brilho entre a banda 20 e a imagem-mosaico de

Máxima Temperatura, deste modo, o algoritmo se tornaria menos rigoroso em relação aos critérios definidos que visam evitar os erros de superestimativa de queimadas. (Figura 4.10)

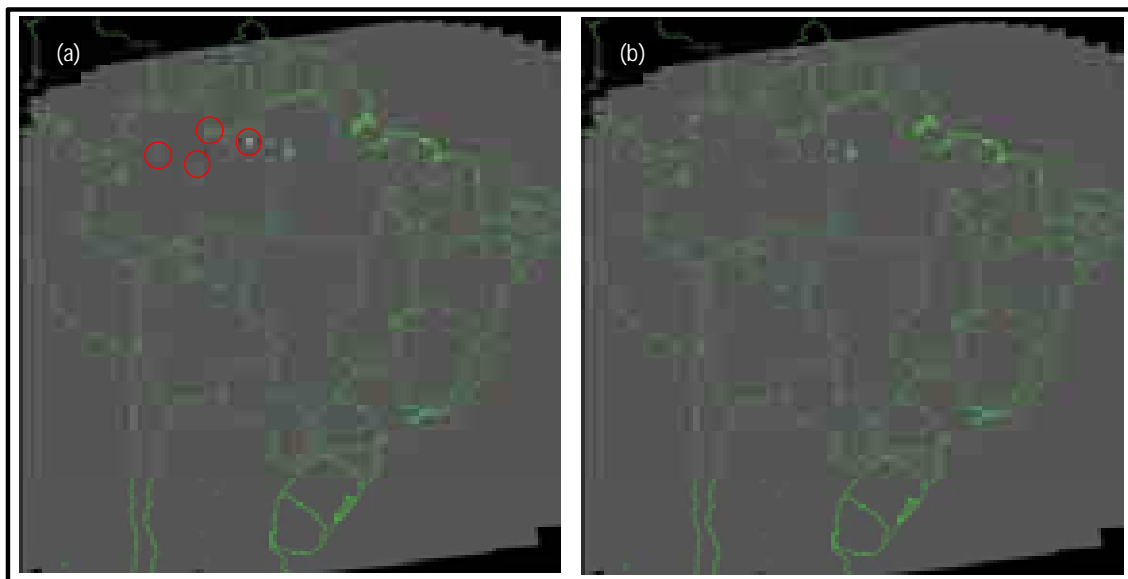


FIGURA 4.10 - Exemplo de ajuste do algoritmo *Deteção de Área Queimada* correspondente à primeira quinzena de outubro de 2004, para uma versão preliminar deste algoritmo. (a) em círculos vermelhos são indicadas as áreas com valores de radiância saturados por reflexos em corpos d'água; e (b) eliminação dos *pixels* saturados por reflexos, após o ajuste do algoritmo. FONTE: Setzer et al. (2007).

Adicionalmente, qualquer ajuste nos limiares estatísticos ou nos índices espectrais definidos nos algoritmos automáticos para quantificação global de áreas queimadas, deveria estar de acordo com os seguintes:

- a) as características naturais dos ecossistemas;
- b) as propriedades espectrais, biofísicas e biológicas da vegetação afetada pelo fogo;
- c) as condições ambientais locais, como o comportamento e regime do fogo, o tipo de solo, o tipo de cobertura vegetal ou a ocupação da terra; e
- d) as características orbitais das plataformas satelitais, como as variações na refletância observada devidas às variações do ângulo de visada e iluminação do

sensor; ou às resoluções espectral, radiométrica, espacial e temporal dos sensores.

Isto, no entanto, acarreta em dificuldades adicionais para este tipo de algoritmos, já que à atual complexidade para se modelar o comportamento do fogo, deveria-se incluir variáveis ambientais, nem sempre facilmente disponíveis.

Finalmente, cabe salientar que essas incertezas derivadas dos limiares estabelecidos empiricamente nos algoritmos automáticos para a estimativa regional e global de áreas queimadas, estão ausentes quando utilizadas técnicas de classificação visual, onde, a distinção das mudanças na cobertura da terra devidas à queima de biomassa ou à presença de sombras de nuvens e relevos ou corpos d'água, é feita pelo intérprete mediante visualização direta das imagens orbitais. No entanto, outras limitações nas estimativas de áreas queimadas estão presentes quando utilizadas técnicas de classificação visual, as quais serão discutidas no decorrer da análise dos resultados e da avaliação das classificações.

A segunda causa que pode explicar a diferença das estimativas de área queimada geradas pelos produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*, respectivamente para os biomas Amazônia e Cerrado, refere-se às limitações dos sensores de moderada a baixa resolução espacial, como o MODIS, para observar mudanças na cobertura da terra menores do que a resolução espacial do sensor. É o caso dos fogos que ocorrem no sub-bosque, por exemplo, onde a resposta espectral recebida pelo sensor (contida em um *pixel*) equivale à mistura da resposta espectral tanto das queimadas, quanto do dossel da vegetação.

A Figura 4.11 apresenta um exemplo da ocorrência de queimadas no estrato inferior de formações arbóreas que não foram detectadas pelos produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*. Neste caso, a análise visual feita diretamente na cena TM/Landsat indicou que a ocorrência de queimadas afetou particularmente o estrato inferior desta fisionomia, preservando o dossel da ação do fogo. Desta forma, o sensor (MODIS) estaria detectando a resposta espectral predominante contida em cada *pixel*, após a integração do material carbonizado na camada superior do solo, atenuando os valores de radiância (baixos) característicos das cicatrizes do fogo. Assim cicatrizes do fogo

menores do que à resolução do *pixel* são atenuadas, dificultando sua correta detecção (omissão).

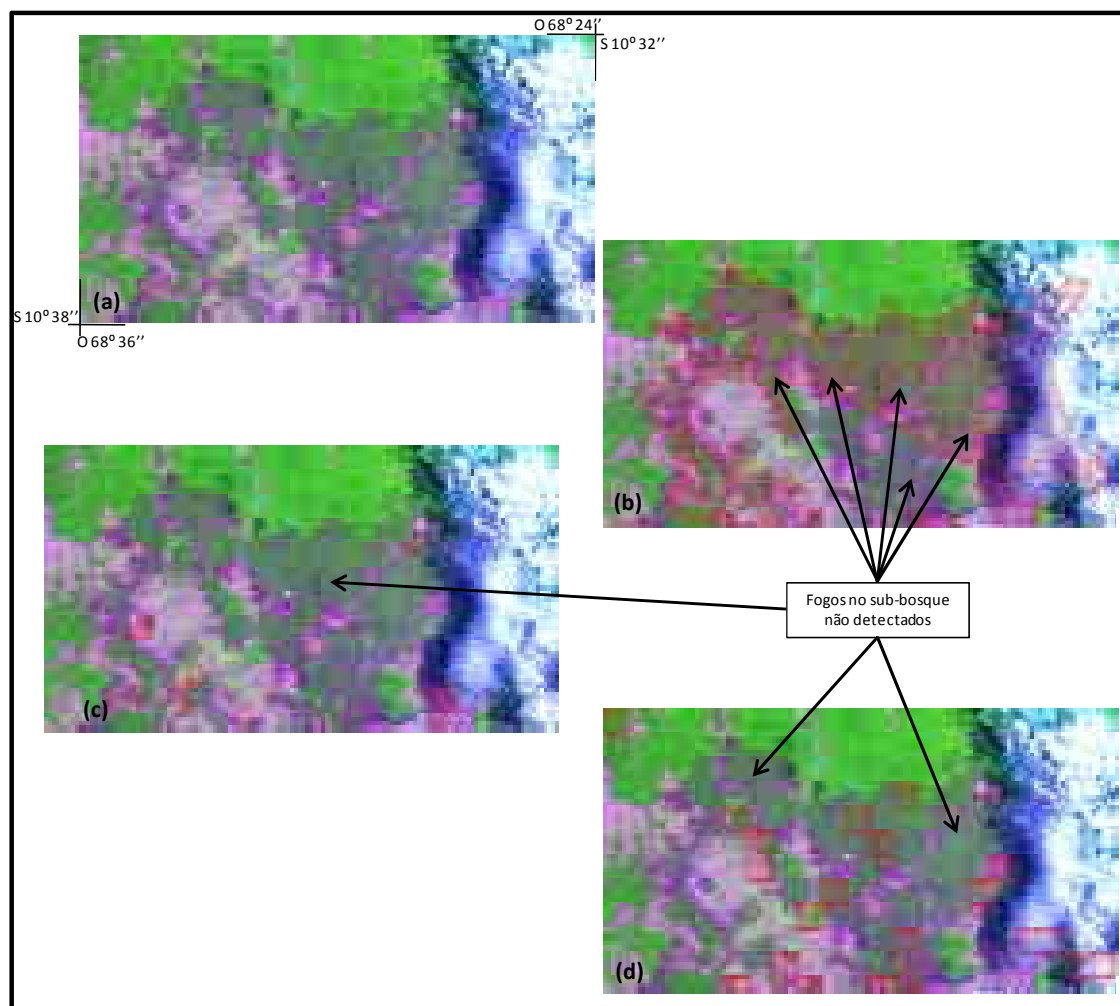


FIGURA 4.11 - Exemplo de ocorrências de queimadas no sub-bosque para o Setor Acre: a) localização das áreas queimadas na imagem TM/Landsat do dia 13 de outubro de 2005, (b) áreas queimadas detectadas pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, c) áreas queimadas detectadas pelo produto *MCD45*, e d) áreas queimadas detectadas pelo produto *Detecção de Área Queimada*.

Cabe ressaltar que esta limitação afeta todos os produtos de áreas queimadas avaliados neste estudo. Entretanto, esta limitação é menos significativa no produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* devido ao fato do intérprete comparar visualmente a resposta espectral das queimadas com a resposta espectral da vegetação no seu entorno,

mesmo que atenuada como consequência da variação nas proporções em que aparecem misturados os elementos representados no *pixel*.

Essa comparação visual referida ao produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* é feita pelo intérprete durante a edição visual do mapeamento das cicatrizes de queimadas que foram geradas automaticamente (item 3.3.2.4, alínea d), com base nas imagens de refletância de superfície (MOD09), bandas 1, 2 e 6 do sensor MODIS. No entanto, é importante mencionar que este procedimento pode, também, ocasionar incertezas nas estimativas de áreas queimadas, ao considerar a totalidade de um *pixel* como sendo a área afetada pela ocorrência de uma queimada, quando, na realidade, a vegetação representada neste *pixel* foi apenas parcialmente queimada.

Finalmente, a detecção de áreas queimadas baseadas no mapeamento automático dos fogos ativos (produto MCD45) ou da observação combinada dos processos refletivos e emissivos dos alvos terrestres (produto *Deteção de Área Queimada*) apresenta certas vantagens para modelar o comportamento do fogo em florestas tropicais densas, onde as queimadas que freqüentemente ocorrem no sub-bosque só podem ser corretamente detectados mediante o fluxo de energia emitida, mas não pela refletância das cicatrizes deixadas pelo fogo sob o dossel.

Uma terceira causa estaria relacionada a incêndios não registrados, ocorridos entre duas ou mais passagens do satélite em um mesmo lugar (revisita). Esta situação acontece, principalmente, nas pastagens e ecossistemas de savana e campos, onde a permanência das queimadas e a duração dos fogos ativos são menores, em relação às fisionomias arbóreo-arbustivas.

No caso dos fogos ativos (*Anomalias Termiais*) a omissão na detecção das queimadas corresponde à rápida combustão deste tipo de vegetação, de apenas poucas horas. No caso das cicatrizes deixadas pelo fogo (*Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *MCD45*) a omissão está relacionada à regeneração da vegetação afetada pelo fogo, que pode ocorrer em poucos dias; portanto, causando mudanças nas propriedades espectrais da vegetação queimada (dissipação da cicatriz do fogo), que são despercebidas pelo sensor.

Em ambos casos a omissão na detecção das queimadas depende da resolução temporal das plataformas orbitais (incluindo as limitações devidas à alta incidência de nuvens e à disponibilidade de imagens) e do tempo em que as queimadas continuam sendo visíveis nas imagens. Ou seja, fogos ativos ou cicatrizes do fogo de duração e permanência menor à resolução espacial ou temporal do sensor, respectivamente, não são detectados pelos sistemas sensores. (Figura 4.12)

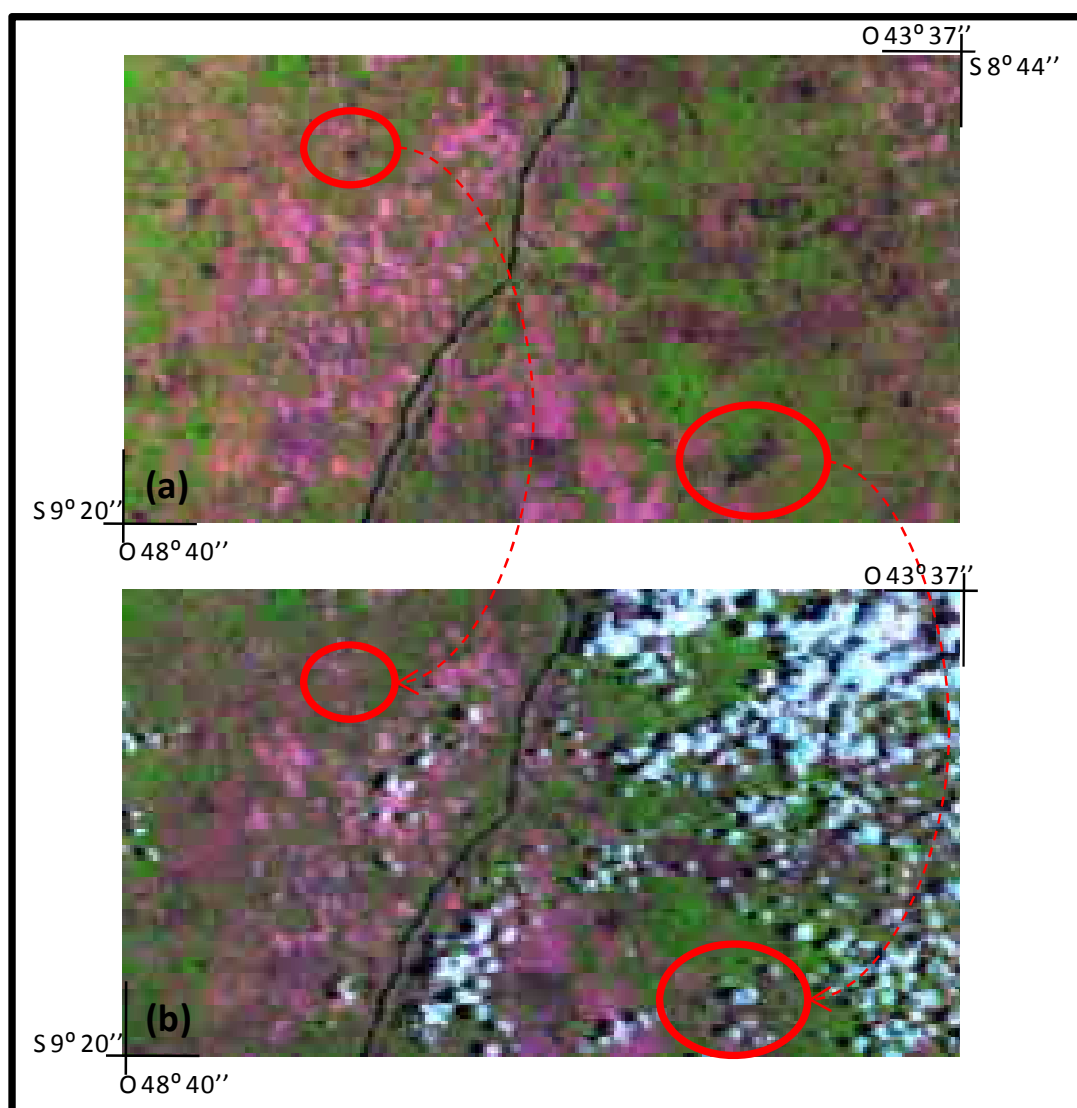


FIGURA 4.12 - Exemplo de permanência de cicatrizes do fogo de apenas 5 dias devido à regeneração da vegetação. Queimadas seriam despercebidas pelo sensor em revisitas do satélite (MODIS) acima do tempo de permanência destas queimadas: a) Imagem MODIS do dia 10 de outubro de 2005 localizada no estado de Tocantins e b) Imagem MODIS do dia 15 de outubro de 2005.

Também devem ser incluídos nos casos de omissão as ocorrências de queimadas despercebidas pelo sensor, produto da diminuição da frequência de revisita das plataformas satelitais, ocasionada pelo recorte das imagens diárias para ângulos de varredura acima de 45° nos produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*. Este recorte visa evitar uma superestimativa das áreas queimadas, devidos às variações da BRDF (item 3.3.2.2, alínea a) e ao incremento do tamanho do *pixel* nas bordas das imagens como consequência da curvatura da terra (item 3.3.2.3, alínea b). No entanto, a aplicação desta medida provoca a omissão de queimadas que possam ter acontecido em lugares onde foi diminuído o campo de visada do sensor.

Em relação à superestimativa de áreas queimadas é importante distinguir entre a detecção de áreas queimadas baseada em algoritmos de detecção das cicatrizes do fogo daquelas que se fundamentam na detecção automática dos fogos ativos. Neste último caso, a ocorrência do fogo corresponde a uma pequena fração deste evento (0,01 – 0.1%), com fogos de proporções menores à resolução espacial nominal do sensor (e.g. 1 km² para as bandas 20 e 21 do sensor MODIS); gerando superestimativas das áreas queimadas, devidas à saturação do *pixel*.

Não obstante, pode-se afirmar que sempre que o produto *Detecção de Área Queimada* indicar um *pixel* como sendo de alta temperatura, em condições ambientais conhecidas (e.g. localização de fontes de calor próximas ao limiar de saturação do sensor ou reflexos em corpos d'água e solos expostos); esse *pixel* estará representando uma medida diária da atividade do fogo na superfície terrestre, livre de nuvens, a qual pode não ter sido observada pelos produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* ou *MCD45*.

A Figura 4.13 apresenta um exemplo da correta detecção de *pixels* representativos de queimadas em áreas com alta incidência de nuvens, utilizando o produto *Detecção de Área Queimada*; assim como as respectivas omissões ao utilizar os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* ou *MCD45*. Para este último produto, essas omissões provêm do número reduzido de imagens para aplicar o algoritmo devido à presença de nuvens, e do número insuficiente de dados para inverter o modelo BRDF, de pelo menos sete observações ($m \geq 7$), respectivamente.

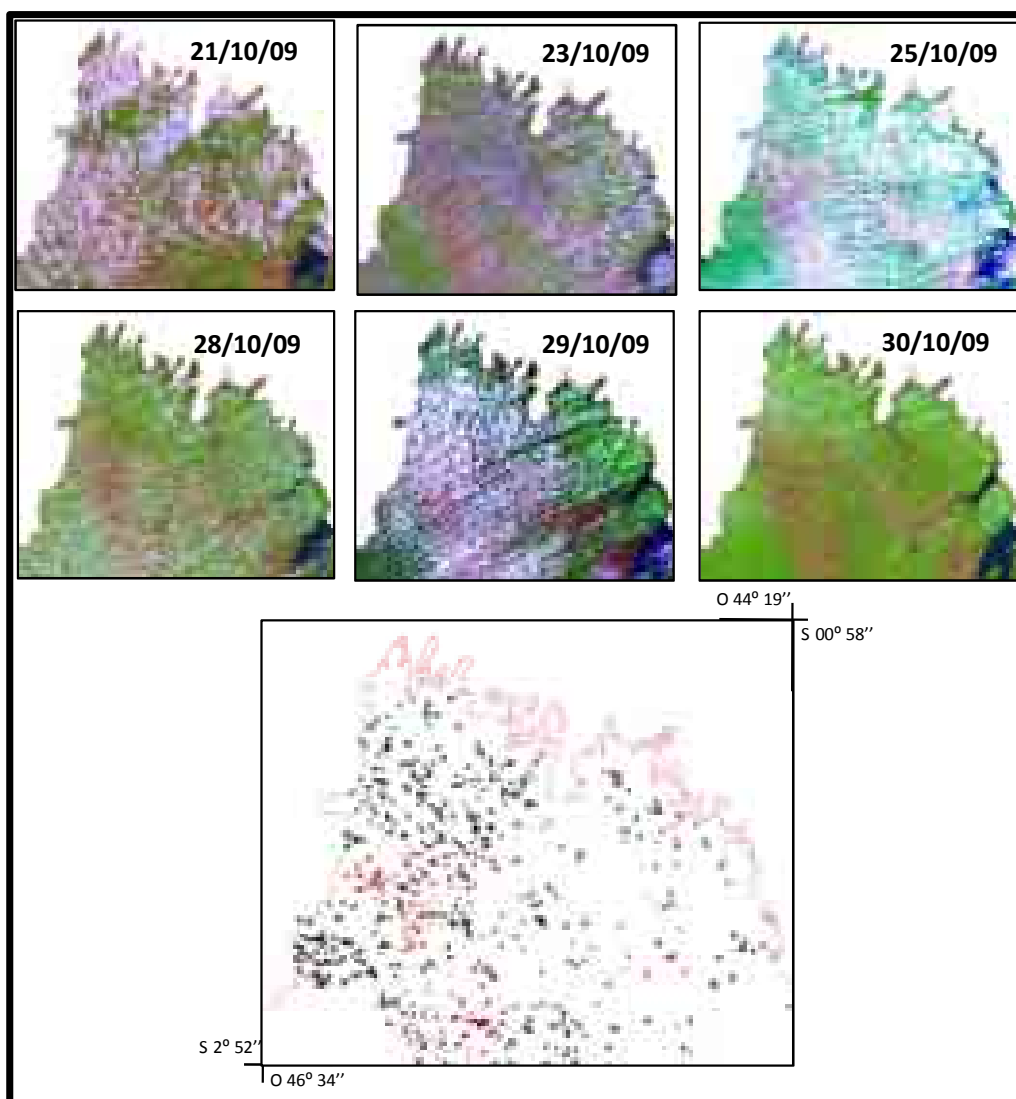


FIGURA 4.13 - Exemplo de ocorrências de queimadas detectadas pelo produto *Detecção de Área Queimada* (polígonos em negro), em uma série temporal quase diária (imagens MODIS), onde foram omitidas as detecções pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (em vermelho), devido à alta cobertura de nuvens.

Em relação às omissões atribuídas ao produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* decorrentes da cobertura de nuvens, é importante salientar que durante a comparação visual dos resultados obtidos pelos diferentes produtos, foi detectada uma quantidade significativa de áreas queimadas que não foram detectadas inicialmente com o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, mas que tinham sido corretamente identificadas com o produto *Detecção de Área Queimada*. A extensão das áreas

queimadas omitidas corresponde a cerca de 8.960 km², ou 13% da área total estimada após a correção das omissões (70.500 km²).

Estas omissões estavam localizadas, em sua maioria, nos estados de Roraima, Pará, Maranhão e, em menor proporção, nos estados Amazonas e Mato Grosso (Figura 4.14). Portanto, procedeu-se a reinterpretar um novo conjunto de imagens MODIS correspondentes às datas que tinham sido descartadas inicialmente, dos estados anteriormente mencionados, tendo como referência as áreas queimadas detectadas com o produto *Detecção de Área Queimada*.

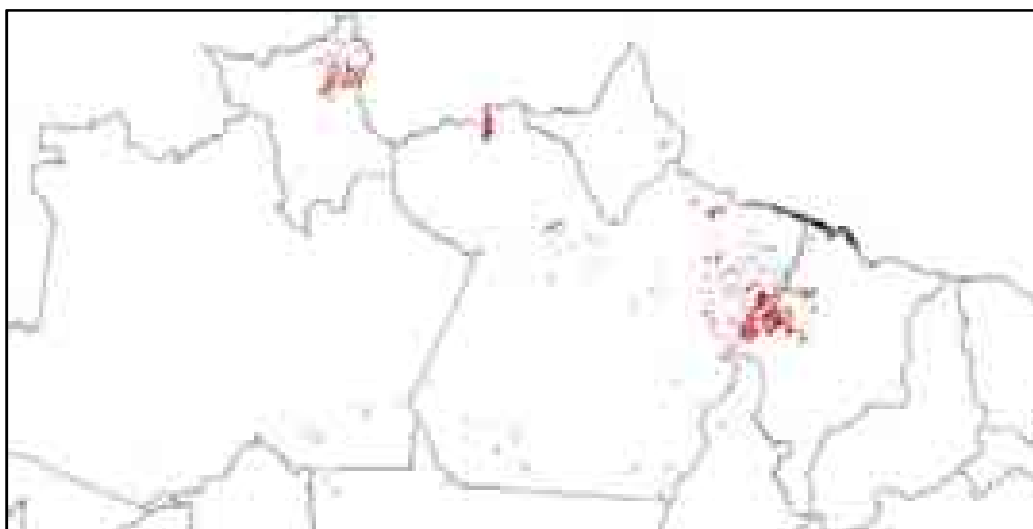


FIGURA 4.14 - Áreas queimadas omitidas inicialmente pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimadas*, identificadas após a comparação com as estimativas do produto *Detecção de Área Queimada*.

Essa situação inicial, onde as áreas queimadas estimadas com o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* indicaram omissões da extensão da área queimada de 13% para menos, em relação ao estimado após a reinterpretação das novas datas, teria ocasionado uma diferença entre as estimativas geradas por esses dois produtos de 2.550 km²; o produto *Detecção de Área Queimada* gerando uma estimativa 4% maior para a extensão de área queimada do que a estimativa preliminar gerada pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*. Certamente, essa diferença, para menos, na extensão da área queimada estimada com esse produto, teria ocasionado uma subestimativa nas estimativas de emissões atmosféricas brutas.

No caso dos procedimentos baseados na detecção das cicatrizes do fogo (produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *MCD45*), superestimativas devidas à resolução espacial do *pixel* também estão presentes. A radiância recebida pelo sensor, representando a informação contida em um *pixel*, principalmente naqueles de baixa ou moderada resolução espacial, corresponde, na realidade, à radiância predominante nesse *pixel* e não apenas à resposta espectral de uma queimada. Ou seja, um pixel de 250 ou 500 m de resolução espacial pode ter sido classificado como queimada, sendo que apenas 50% da área coberta pelo *pixel* foi efetivamente queimada.

4.2 Avaliação da exatidão das estimativas de área queimada

4.2.1 Índices de concordância

No presente estudo foram utilizados os índices estatísticos Global e Tau para determinar o grau de concordância entre os diferentes produtos de áreas queimadas (classificações de controle) e a classificação de referência, visando avaliar a consistência nas estimativas obtidas (Tabelas 4.2 e 4.3, e Figuras 4.15 e 4.16). Os índices foram estimados a partir da matriz de erros, considerando duas áreas de validação localizadas nos estados do Acre e Rondônia (Setor Acre e Setor Rondônia, respectivamente).

TABELA 4.2 - Índices de concordância obtidos para os diferentes produtos de áreas queimadas (Setor Acre).

	Global	Tau	Erros Comissão (%)	Erros Omissão (%)
Produto 1	0,91	0,81	37	35
Produto 2	0,88	0,75	12	89
Produto 3	0,87	0,61	59	89

Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (250 m de resolução espacial)

Produto 2= Detecção de Mudanças ou MCD45 (500 m de resolução espacial)

Produto 3= Detecção de Área Queimada (1000 m de resolução espacial)

Qualidade da classificação associada aos valores dos índices de concordância:

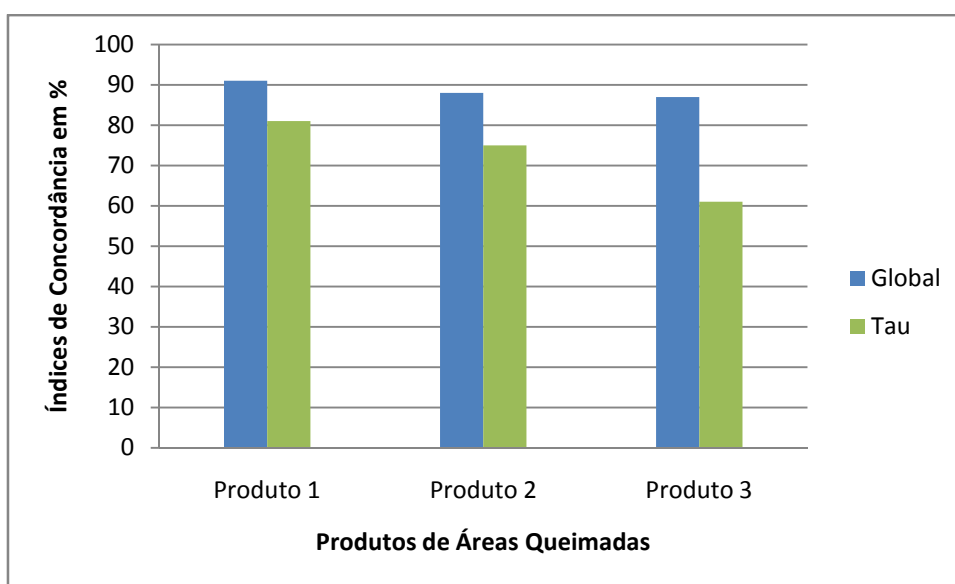


FIGURA 4.15 - Índices de concordância em % (Setor Acre) para cada um dos produtos de áreas queimadas: *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (Produto 1), *MCD45* (Produto 2) e *Deteccção de Área Queimada* (Produto 3).

TABELA 4.3 - Índices de concordância obtidos para os diferentes produtos de áreas queimadas (Setor Rondônia).

	Global	Tau	Erros Comissão (%)	Erros Omissão (%)
Produto 1	0,93	0,85	50	57
Produto 2	0,94	0,88	31	94
Produto 3	0,92	0,83	75	84

Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (250 m de resolução espacial)

Produto 2= Deteccção de Mudanças ou MCD45 (500 m de resolução espacial)

Produto 3= Deteccção de Área Queimada (1000 m de resolução espacial)

Qualidade da classificação associada aos valores dos índices de concordância:

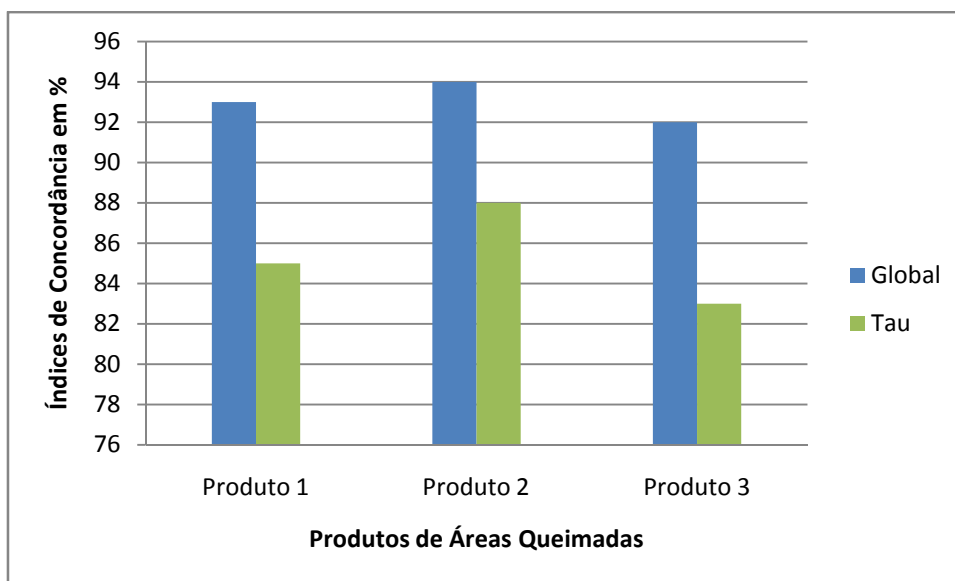


FIGURA 4.16 - Índices de concordância em % (Setor Rondônia) para cada um dos produtos de áreas queimadas: *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (Produto 1), *MCD45* (Produto 2) e *Detecção de Área Queimada* (Produto 3).

É importante ressaltar que o índice Kappa não foi utilizado como procedimento para avaliar o desempenho de produtos temáticos gerados a partir de dados de baixa resolução espacial, já que é considerado por alguns autores como inadequado para representar os níveis de concordância entre conjuntos de dados que não possuam a mesma resolução espacial (AGRESTI, 1989; PONTIUS, 2000; BOSCHETTI et al., 2004; MA e REDMOND, 2005). Por outro lado, Foody (1992) afirma que este índice pode superestimar o grau de concordância por chance pelo fato de incluir, além de concordância por chance, a concordância real; portanto, a magnitude de Kappa não estaria refletindo a concordância real presente na classificação.

A análise dos índices de concordância apresentados para o Setor Acre indica que os valores do índice Global encontram-se acima do patamar de concordância estabelecido por Jansen (1986) de 85%. Contudo, é importante salientar que esse índice tende a superestimar a exatidão do mapeamento devido ao fato de considerar apenas a diagonal principal da matriz de erros.

Em relação ao índice Tau, a qualidade da classificação associada à concordância entre os produtos de áreas queimadas e a classificação de referência no Setor Acre resultou em um desempenho bom para o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e razoável para os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada* (75 e 61% de concordância entre as classificações, respectivamente). Na formulação deste índice, o valor da concordância casual é estabelecido *a priori* e as classes presentes na classificação também são consideradas, evitando, portanto as questões de super e subestimativa de concordância que afetam os índices de Global e Kappa.

Outro procedimento utilizado para avaliar a qualidade das classificações dos produtos de áreas queimadas consistiu na análise dos erros de comissão e de omissão gerados a partir da matriz de erros. Os resultados destes índices observados nas Tabelas 4.2 e 4.3 indicam que o produto *MCD45* foi o que menos superestimou a extensão das áreas queimadas. No entanto, este produto foi responsável pelos maiores índices de omissão de áreas queimadas, seguido do produto *Detecção de Área Queimada*.

É importante destacar que este resultado, onde os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada* apresentam um alto índice de omissão de *pixels* de áreas queimadas, está vinculado com os critérios de identificação das áreas queimadas definidos nos algoritmos de detecção automática. Nesses critérios são estabelecidas prioridades para evitar falsas detecções de queimadas inerentes à classificação automática, selecionando somente aqueles candidatos a queimadas que mostraram claras evidências da ocorrência do fogo, como, por exemplo, a verificação da permanência das cicatrizes do fogo ou a verificação de mudanças na cobertura da terra resultantes da queima de biomassa. Esta estratégia, entretanto, pode repercutir na omissão de áreas queimadas.

Outra questão que influencia a omissão de *pixels* de áreas queimadas refere-se às próprias limitações das imagens MODIS para identificar áreas queimadas menores do que a resolução espacial do *pixel*, dificultando a detecção de áreas queimadas de pequeno porte, que são corretamente detectadas com o uso das imagens TM/Landsat (classificação de referência). Kaufman et al. (1998) reportaram que os incêndios típicos no Brasil são comumente de tamanho pequeno (e.g., 0,005 km²) com uma distribuição da área queimada entre 0,2 e 1 km².

Por outro lado, os erros de comissão presentes em todos os produtos de áreas queimadas estão relacionados, em primeiro lugar, com a diferença marcante que existe entre as resoluções espaciais da classificação de referência (30m) e das classificações de controle (250, 500 e 1000 m) e, em segundo lugar, com as omissões na detecção de queimadas na classificação de referência, ocorrida durante amplos intervalos de revisita do satélite TM/Landsat (de pelo menos 16 dias), em relação ao sensor MODIS. Em ambas situações as diferenças entre as resoluções espacial e temporal propiciam a superestimativa dos *pixels* rotulados erroneamente como queimadas nas classificações de controle (produtos de áreas queimadas).

Finalmente, o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* foi o que apresentou o menor índice de *pixels* omitidos de áreas queimadas, assim como valores intermediários da porcentagem de *pixels* que foram classificados erroneamente como queimadas. Isto mostra uma compensação entre os erros de comissão e de omissão apresentados por este produto, que pode ser explicada pela participação do intérprete durante a edição visual do mapeamento das cicatrizes de queimadas (item 3.3.2.4, alínea d).

Este procedimento visual permite ao intérprete compensar os erros originados na classificação automática do algoritmo, adicionando ou removendo *pixels* de áreas queimadas que foram omitidos ou incluídos respectivamente, durante essa etapa. Ou seja, diferente dos produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*, no produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* os erros de comissão e omissão resultantes da detecção automática são ajustados com técnicas de interpretação visual (Figura 4.17). No entanto, a participação do intérprete na fase de edição visual é tida como uma limitante quando há necessidade em se conhecer de forma regular e sistemática a biomassa realmente queimada, em nível global ou regional.

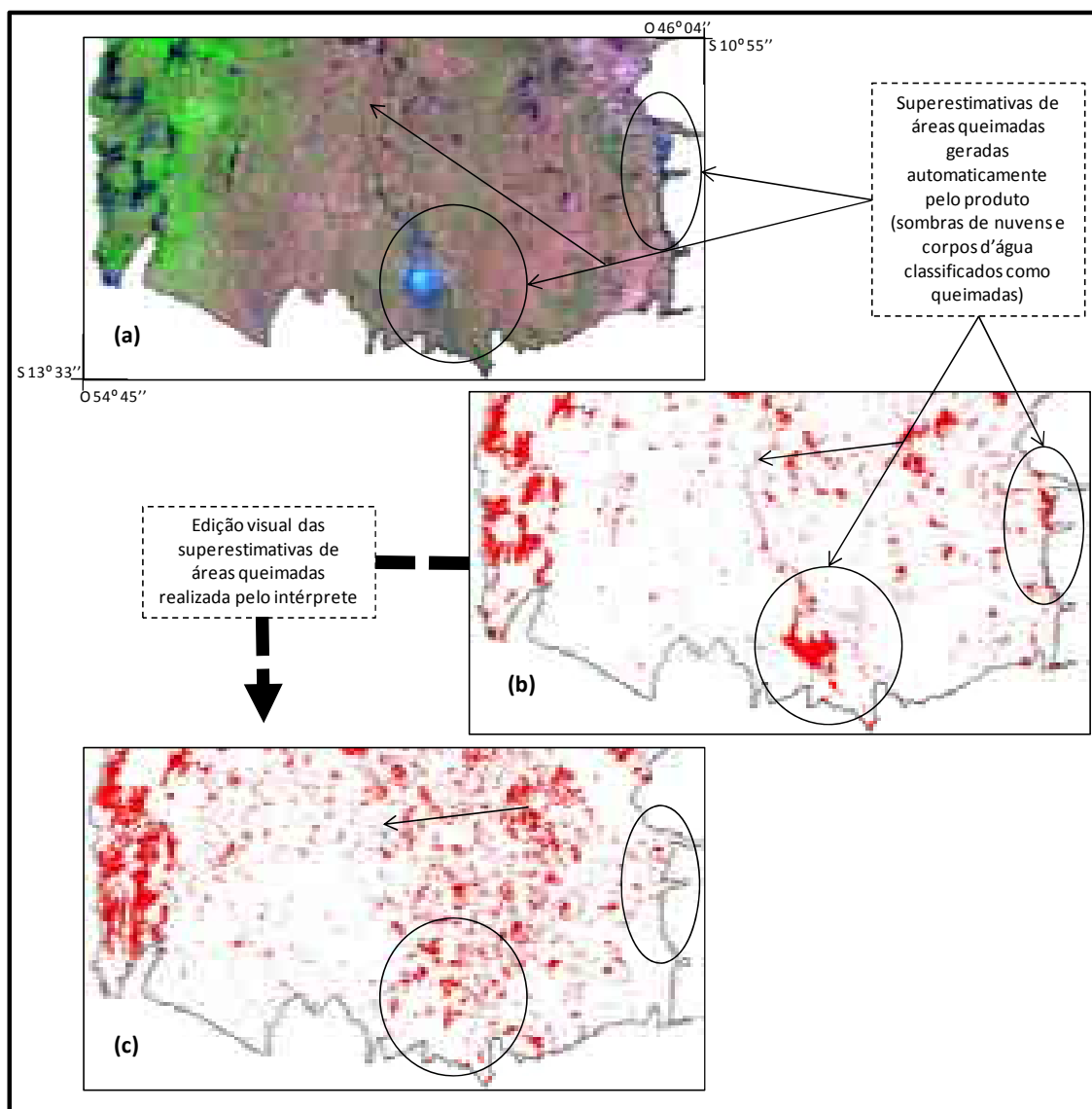


FIGURA 4.17 - Exemplo de superestimativas de áreas queimadas geradas automaticamente pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, corrigidas na fase de edição visual (região sul do estado de Tocantins): (a) imagem MODIS/Terra correspondente ao dia 10 de setembro de 2005, (b) resultado da classificação automática gerada pelo produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, e (c) resultado do ajuste da classificação automática realizado pelo intérprete.

No que se refere aos índices e erros de concordância estimados para o Setor Rondônia, desprende-se da análise visual das Tabelas 4.2 e 4.3 e das Figuras 4.15 e 4.16 que a qualidade da classificação associada a esses índices foram semelhantes aos observados para o Setor Acre. Uma melhora foi observada nos resultados do Setor Rondônia, em

relação ao Setor Acre, onde concordância entre as classificações de referência e os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada* avaliada com o índice Tau, neste último setor, incrementou-se para 88 y 83%, respectivamente. Em relação aos erros de comissão e omissão, as classificações de controle também apresentaram valores semelhantes em ambas áreas piloto.

4.2.2 Análise de regressão

A avaliação das estimativas de área queimada foi complementada com uma análise de regressão entre a classificação de referência e as classificações de controle, mediante a comparação das proporções de *pixels* (km^2) rotulados como *queimadas* dentro de células fixas de dimensão 4 km x 4 km, para cada um dos produtos de áreas queimadas utilizados neste estudo.

O tamanho das células foi empiricamente dimensionado visando, por um lado, compensar as diferenças espaciais entre a classificação de referência (30 m) e as classificações de controle (250, 500 e 1000 m), inerentes ao tamanho do *pixel* em cada produto de áreas queimadas e; por outro lado, estabelecer um número máximo de células (1.648) que fosse possível de ser administrado no banco de dados do Sistema de Informação Geográfica (SPRING).

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam diagramas de dispersão para a proporção de área queimada nos produtos 1, 2, e 3, relativo ao produto de referência (TM/Landsat), para os dois setores avaliados (Acre e Rondônia). Equações de regressão foram geradas para cada caso, assim como fornecido o coeficiente de regressão linear entre as classificações de controle e a classificação de referência.

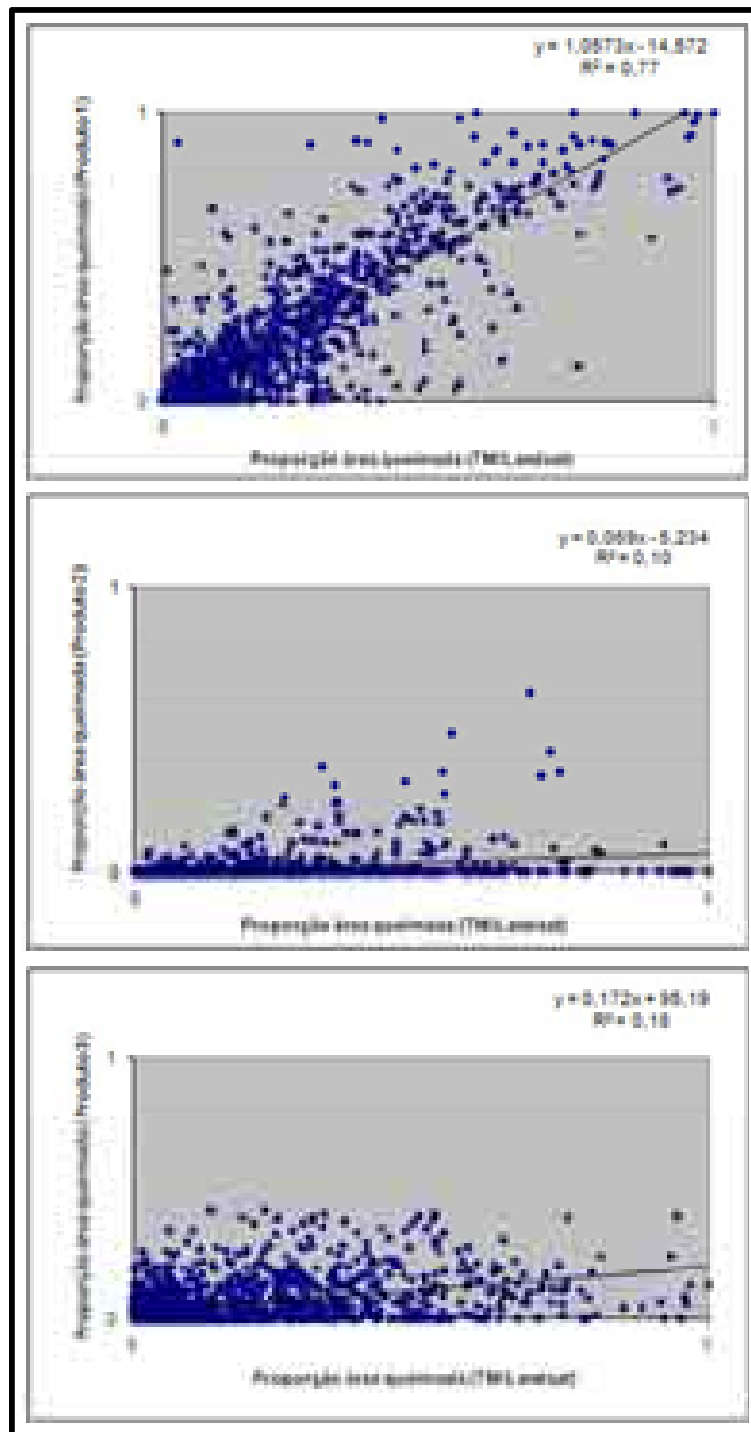


FIGURA 4.18 - Gráficos de dispersão (Setor Acre) apresentando a proporção das células de 4 km x 4 km, classificadas como queimada nas classificações de controle (Produto 1= *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, Produto 2= *MCD45* e Produto 3= *Deteção de Área Queimada*), e a proporção das células classificadas como queimada na classificação de referência.

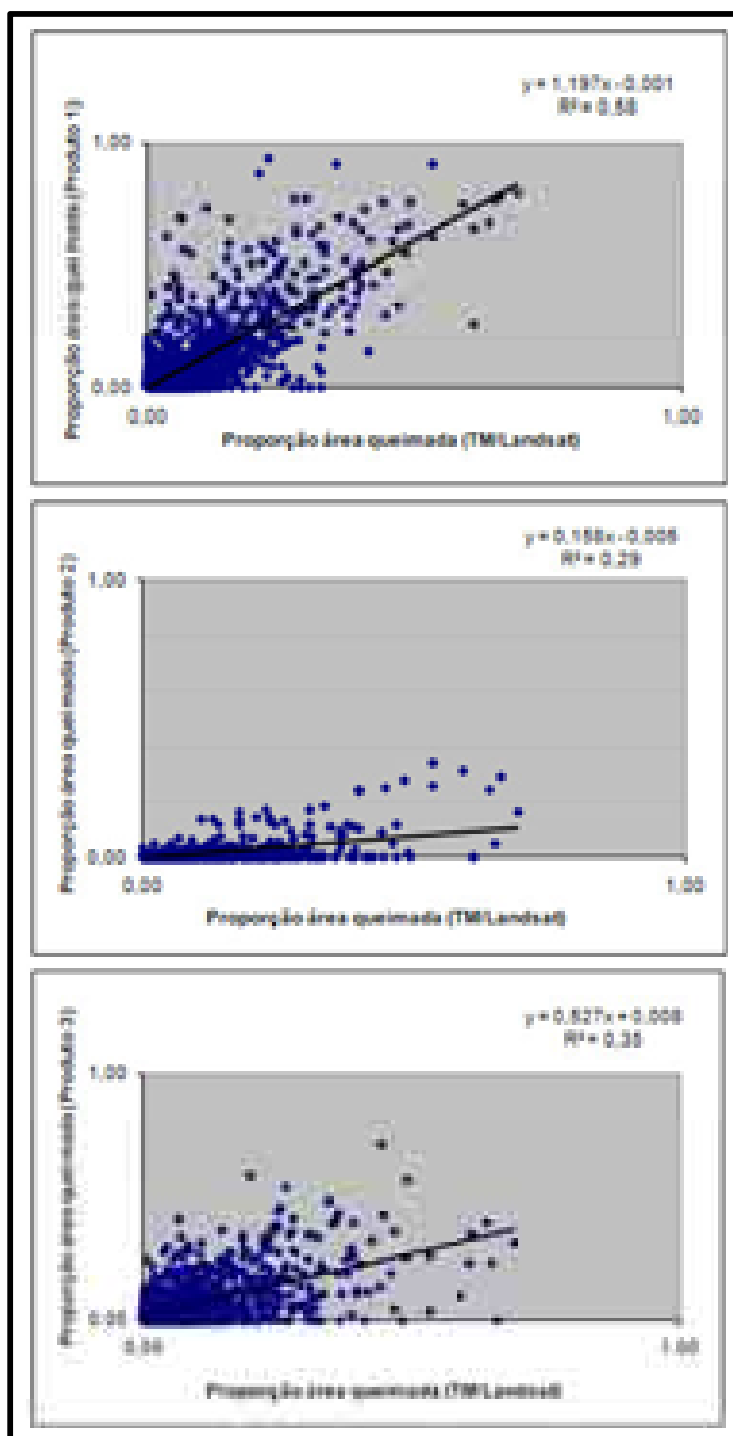


FIGURA 4.19 - Gráficos de dispersão (Setor Rondônia) apresentando a proporção das células de 4 km x 4 km, classificadas como queimada nas classificações de controle (Produto 1= *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, Produto 2= *MCD45* e Produto 3= *Deteção de Área Queimada*), e a proporção das células classificadas como queimada na classificação de referência.

Em ambos setores houve uma concordância razoável entre a classificação de referência e a classificação de controle do produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* ($r = 0,77$ e $r = 0,58$, respectivamente para os setores Acre e Rondônia); e baixa para os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada*, para ambos setores (valores do r entre 0,10 e 0,35 para ambos produtos). A análise destes resultados é discutida em maiores detalhes no item 4.3.

4.3 Análise das diferenças entre as estimativas de áreas queimadas

Os métodos para avaliar os produtos de áreas queimadas utilizados no presente estudo (índices de concordância e análise de regressão) estão orientados a mapeamentos de parâmetros ambientais em escala local, utilizando dados orbitais de alta resolução espacial. Contudo, o uso destes métodos envolvendo mapeamentos temáticos de grandes extensões do território (e.g. os biomas Amazônia e Cerrado), a partir do uso de dados orbitais de resolução espacial moderada a baixa, apresenta limitações importantes, conforme apontado por outros autores (MAYAUX e LAMBIN, 1995; EVA e LAMBIM, 1998; SMITH et al., 2003; BOSCHETTI et al., 2004). Adicionalmente, tópicos como a definição do tamanho ótimo da amostra de dados orbitais de alta resolução espacial (classificação de referência), utilizados para avaliar a precisão de dados de baixa resolução espacial (classificação de controle), ainda não foram claramente definidos.

Até o presente, o desenvolvimento de procedimentos e metodologias para a validação de produtos gerados a partir de dados orbitais de baixa resolução espacial é incipiente e tem sido reconhecido pela comunidade científica como prioritário (BOSCHETTI et al., 2004). Por outro lado, a grande maioria dos índices de exatidão utilizados para validar produtos temáticos estão baseados na matriz de erros. Contudo, o uso comum desta matriz assume que tanto a classificação de referência, quanto a classificação de controle, possuem a mesma resolução espacial; o que muitas vezes não acontece quando avaliadas classificações geradas a partir de dados orbitais de resolução espacial moderada a baixa (BOSCHETTI et al., 2004).

É o caso dos produtos de áreas queimadas avaliados neste estudo, onde a classificação de referência foi gerada a partir de dados do sensor TM/Landsat (30 m de resolução espacial) com a finalidade de validar os produtos de áreas queimadas gerados com dados do sensor MODIS (250, 500 e 1000 m) (Figura 4.20). Isto, somado à baixa resolução temporal do sensor TM/Landsat (16 dias), quando comparada com o MODIS (2 a 3 dias), pode ter ocasionado incrementos nos erros, tanto de comissão quanto de omissão, que não são próprios das classificações de controle.

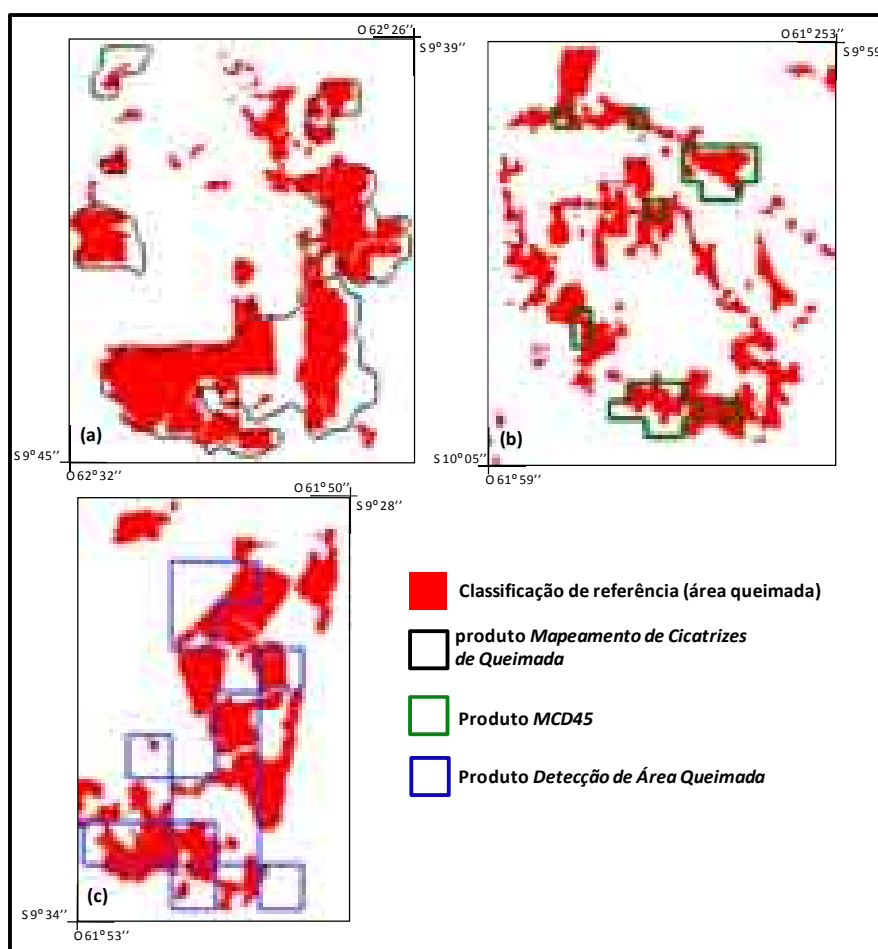


FIGURA 4.20 - Exemplo comparando a classificação de referência (TM/Landsat de 30 m de resolução espacial), em vermelho, com as classificações de controle (MODIS/Aqua e Terra), no Setor Rondônia: (a) produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (250 m), polígonos negros, (b) Produto *MCD45* (500 m), polígonos verdes, e (c) Produto *Detecção de Área Queimada* (1000 m), polígonos azuis.

O incremento dos erros de comissão e omissão devido ao uso de dados orbitais que não possuem a mesma resolução espacial está relacionado, entre outras causas, com as

discrepâncias na localização das áreas queimadas observadas na classificação de referência e as equivalentes nas classificações de controle. Isto, já que diferenças de apenas um (1) *pixel* no georreferenciamento de imagens do sensor MODIS (e.g. bandas 20 e 21 com resolução espacial de 1000 m) de uma mesma seqüência temporal, podem representar deslocamentos de até dois (2) km na localização de áreas queimadas, em relação a produtos de maior resolução espacial; ou de quatro (4) km em diferenças de dois (2) *pixels*.

Com a finalidade de ilustrar o descrito anteriormente foram avaliados os possíveis deslocamentos de um mesmo *pixel* rotulado como queimada em duas classificações diferentes, mediante a interseção de áreas queimadas detectadas entre os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (resolução espacial de 250 m) e *Detecção de Área Queimada* (resolução espacial de 1000 m), para o bioma Amazônia, visando quantificar o grau de concordância entre *pixels* rotulados como queimadas em ambas classificações.

Na Tabela 4.4 é apresentado o resultado desta avaliação, onde pode-se observar uma melhor concordância acumulada entre as classificações à medida que aumentou o deslocamento (distância) entre *pixels* classificados como área queimada em cada um dos produtos, devido a erros no georreferenciamento inerentes à resolução espacial do sensor MODIS.

TABELA 4.4 - Concordância entre produtos de áreas queimadas *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *Detecção de Área Queimada*, acumulada para diferentes distâncias de deslocamento entre *pixels* de área queimada.

Distância (raio)	Concordância (Km²)	Concordância Acumulada (Km²)	Concordância Acumulada (%)
Inicial (0 km)	10.904	10.904	16
Até 1 km	16.764	27.668	41
Até 2 km	25.253	36.157	54
Até 3 km	30.357	41.261	61
Até 4 km	33.946	44.850	67

Assim, se considerarmos todos os *pixels* detectados como área queimada pelo produto *Detecção de Área Queimada* dentro de uma distância (raio) de deslocamento de até dois

(02) km, em relação aos seus equivalentes detectados com o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*, teria-se um acumulado de 36.167 *pixels* ou de 54% de concordância entre produtos. Este valor seria de 67% caso fosse considerado um deslocamento de quatro (4) *pixels*, mostrando que grande parte das discrepâncias observadas entre diferentes classificações está associada à resolução espacial dos dados orbitais; isto é, aos deslocamentos inerentes ao tamanho do *pixel* de cada produto (Figura 4.21).

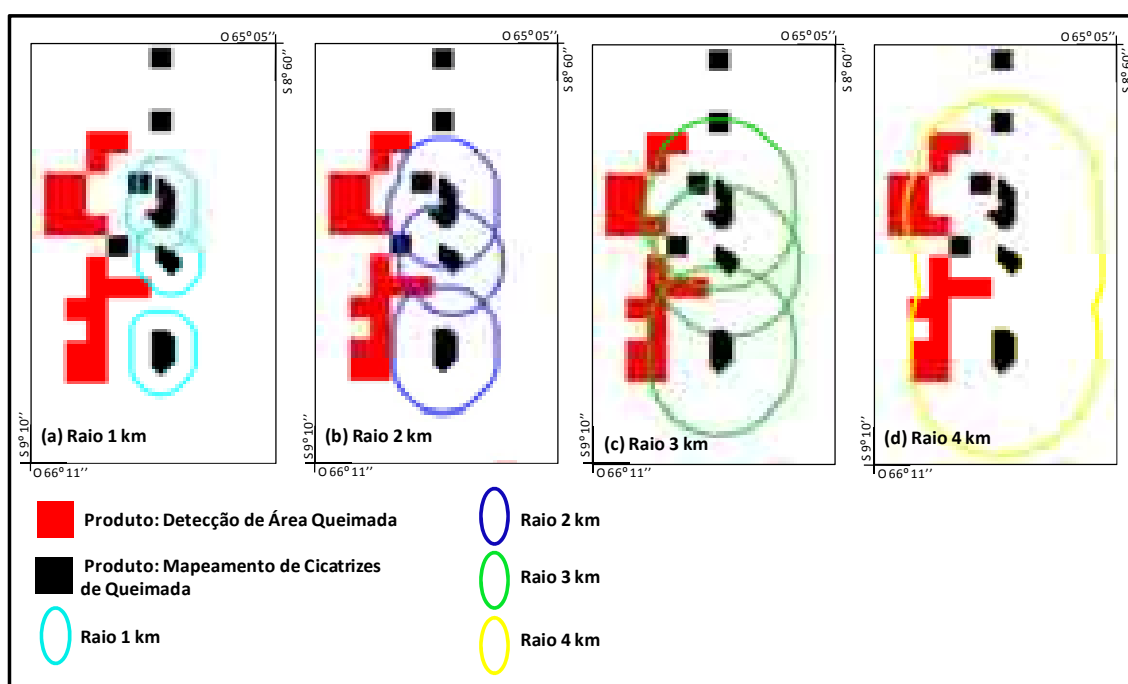


FIGURA 4.21 - Exemplo de deslocamentos na localização de áreas queimadas observados entre classificações de diferentes resoluções espaciais. Em negro a classificação do produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e em vermelho o produto *Detecção de Área Queimada*. Observa-se uma melhor concordância acumulada entre as classificações à medida que aumenta a distância (raio) entre *pixels* classificados como área queimada em cada um dos produtos.

Neste sentido, quando utilizados dados orbitais de diferentes resoluções espaciais para validar produtos de áreas queimadas (30 m para o sensor TM/Landsat versus 250, 500 e 1000 m para o MODIS), é importante diferenciar as incertezas decorrentes da quantificação de áreas queimadas, daquelas decorrentes da localização destas áreas (o qual não é possível quando utilizada a matriz de erros e os índices de concordância).

Isto, já que as discrepâncias observadas na localização de áreas queimadas quando utilizados diferentes algoritmos de detecção de queimadas (e.g. entre os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *Detecção de Área Queimada*, para o bioma Amazônia) poderiam apontar, *a priori*, diferenças na quantificação de áreas queimadas, porém, representar a mesma superfície afetada pelo fogo (ou com diferenças desprezíveis); e, até mesmo, proporcionar estimativas semelhantes de emissões atmosféricas brutas de GEE.

Essa diferenciação entre as incertezas relativas à quantificação e à localização de áreas queimadas representa um argumento importante para fundamentar o uso do produto *Detecção de Área Queimada* nas estimativas de áreas queimadas, principalmente, quando existe necessidade de se estimar, de forma regular e sistemática, a extensão das áreas queimadas em nível regional, continental ou global; assim como das emissões atmosféricas brutas de GEE resultantes das queimadas. Isto, considerando as limitações de produtos como *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* para cumprir com certas condições de automatização das estimativas, como, por exemplo, a necessidade de se editar visualmente o mapeamento das cicatrizes de queimadas geradas previamente de forma automática.

A segunda causa do incremento dos erros de comissão e omissão motivados ao uso de dados orbitais que não possuem a mesma resolução espacial refere-se ao tempo de revisita de 16 dias do sensor TM/Landsat, somado à ocorrência de longos períodos sem disponibilidade de dados devido à dificuldade em se obter seqüências de imagens TM/Landsat livres de nuvens.

Durante esses períodos sem disponibilidade de dados a impossibilidade de detectar queimadas que ocorreram entre duas ou mais passagens do satélite pode ocasionar omissões de queimadas na classificação de referência, contribuindo, assim, com o incremento dos erros de comissão nas classificações de controle que não são próprios dessa classificação.

Finalmente, é importante destacar a diversidade de fatores que originam os erros de omissão e comissão em todos os produtos de áreas queimadas avaliados neste estudo, incluindo aqueles inerentes à classificação de referência, os quais estão relacionados às

limitações apresentadas pelos algoritmos de detecção automática utilizados, assim como pelas características das plataformas orbitais e dos sensores a bordo.

Neste sentido, as incertezas introduzidas ao validar dados orbitais de resolução espacial moderada a baixa com dados orbitais de alta resolução espacial dificultaram qualquer comparação em relação ao desempenho dos produtos de áreas queimadas avaliados, que pudesse indicar qual o de maior confiabilidade para a estimativa de áreas queimadas. Por outro lado, cabe enfatizar a ausência de estudos que avaliam o uso de diferentes técnicas e procedimentos de identificação e quantificação de áreas queimadas, com resultados específicos para os biomas Amazônia e Cerrado, que pudessem favorecer a comparação dos resultados obtidos neste estudo.

4.4 Estimativas de emissões atmosféricas brutas

Emissões atmosféricas brutas de CO₂ foram estimadas empregando-se diferentes produtos de áreas queimadas gerados a partir de dados do sensor MODIS/Aqua e Terra de diferentes resoluções espaciais (250, 500 e 1000 m), para cada uma das fisionomias afetadas pelo fogo nos biomas Amazônia e Cerrado. Um quarto produto para a detecção de anomalias termais, baseado em um algoritmo de detecção automática de queimadas ativas foi utilizado, também, com a finalidade de avaliar o seu desempenho para estimar emissões atmosféricas brutas, relativas aos produtos de quantificação de áreas queimadas (item 4.1). Posteriormente, as emissões de CO₂ foram utilizadas como gás de referência para estimar a massa total de outras espécies químicas emitidas (CO, CH₄, N₂O e NO_x) aplicando um quociente de emissão (Apêndices A e B). As estimativas são apresentadas na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - Estimativas de emissões brutas de gases de efeito estufa para os biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE), em Tg (1 Tg = 10¹² g).

	Produto 1	Produto 2	Produto 3	Anomalia Termal
Bioma AM				
<i>M(CO₂)</i>	163,300	46,220	136,070	334,990
<i>M(CO)</i>	12,130	3,310	10,850	26,620
<i>M(CH₄)</i>	0,562	0,140	0,541	1,322
<i>M(NO_x)</i>	0,252	0,074	0,201	0,595
<i>M(N₂O)</i>	0,021	0,006	0,017	0,042
Bioma CE				
<i>M(CO₂)</i>	132,030	74,640	32,350	94,600
<i>M(CO)</i>	8,920	4,800	2,340	6,720
<i>M(CH₄)</i>	0,308	0,148	0,095	0,263
<i>M(NO_x)</i>	0,241	0,134	0,060	0,174
<i>M(N₂O)</i>	0,017	0,010	0,004	0,012

Produto 1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada (250 m de resolução espacial)

Produto 2= Detecção de Mudanças ou MCD45 (500 m de resolução espacial)

Produto 3= Detecção de Área Queimada (1000 m de resolução espacial)

Anomalia Termal= Detecção de Anomalias Termais ou MCD14, em km² (1000 m de resolução espacial)

Como pode ser observado os resultados apresentados apontam para discrepâncias nas estimativas de emissões de CO₂, as quais apresentam diferenças similares às encontradas nas estimativas de áreas queimadas. No bioma Amazônia, a diferença entre as estimativas de emissões do CO₂ geradas a partir dos produtos para estimar a extensão de áreas queimadas, como variáveis de entrada no modelo de emissões (Tabela 4.5), foi pouco significativa. O produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* gerou uma estimativa 17 % maior do que o produto *Detecção de Área Queimada*. Contudo, as emissões do CO₂ geradas com esses produtos diferem significativamente daquela gerada pelo produto *MCD45*, verificando-se uma diferença com um fator de cerca de três (3) vezes para menos (3,5 e 3, respectivamente).

Em relação ao produto *Anomalia Termal* essa diferença resultou significativa, cerca de duas (2) e duas e meia (2,5) vezes para menos entre as estimativas de emissões (CO₂) geradas por este produto e os produtos *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* e *Detecção de Área Queimada*, respectivamente; e, de pouco mais que sete vezes (7,2) para menos utilizando o produto *MCD45*.

No bioma Cerrado os resultados indicam diferenças pouco significativas entre as estimativas de emissões (CO₂) utilizando os produtos *MCD45* e *Anomalia Termal* (cerca de 20%), e entre este último e o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* (cerca de 28%); porém expressivas entre todos os anteriores e o produto *Detecção de Área Queimada*, com um fator de quatro (4) vezes para mais entre este último e a maior estimativa de emissões (produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*).

Estes resultados sugerem que as estimativas da extensão das áreas queimadas e as estimativas de emissões atmosféricas brutas resultantes, para os biomas estudados (em escala regional), são fortemente dependentes dos produtos orbitais de áreas queimadas utilizados atualmente.

Finalmente, as estimativas de emissões obtidas neste estudo foram comparadas com estimativas geradas por outros modelos pra o ano 2000. A Tabela 4.6 mostra as estimativas de emissões de CO utilizando diferentes produtos de área queimada em escala continental e global, valendo-se da informação contida tanto na região óptica, quanto na região do IV médio do espectro eletromagnético. Os resultados obtidos neste estudo sugerem que os valores mais altos de CO estão acima daqueles estimados pelos outros modelos, à exceção do produto MOZART (ATSR), considerando que estes últimos abrangem uma área maior (América Tropical e América do Sul). Contudo, cabe destacar que as diferenças entre os valores mais baixos e mais altos do conjunto das estimativas comparadas, apresentam-se consistentes com as diferenças nas faixas de valores observados com os produtos de área queimada utilizados neste estudo.

TABELA 4.6 - Comparação do total das estimativas de emissões brutas de CO para os biomas Amazônia (AM) e Cerrado (CE) para o ano 2005, com outros modelos de emissões (2000), em Tg (1 Tg = 10¹² g).

Região	P1	P 2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
AM e CE	21,05	8,11	13,19	33,34						
América Tropical					19,3	14,8	32,9			
América do Sul								19,83	20,85	98,63

P1= Mapeamento de Cicatrizes de Queimada.

P2= MCD45.

P3= Detecção de Área Queimada.

P4=Anomalia Termal (MCD14).

P5=ISAM-GLOBSCAR. Jain (2007).

P6=ISAM-GBA. Jain (2007).

P7=ISAM-TRIM. Jain (2007).

P8=GWEN-1.2 (IGBP). Hoelzemann et al. (2004).

P9=GWEN-1.2 (MODIS). Hoelzemann et al. (2004).

P10=MOZART (ATSR). Hoelzemann et al. (2004).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Neste trabalho foi avaliado o desempenho de quatro produtos de detecção de áreas queimadas baseados na informação contida na região óptica e do infravermelho médio do espectro eletromagnético, gerados a partir de dados do sensor MODIS/Aqua e Terra de diferentes resoluções espaciais (250, 500 e 1000 m). A metodologia e os procedimentos utilizados por estes produtos para estimar a área queimada fundamentou-se na aplicação de diversos algoritmos matemáticos próprios, visando modelar o comportamento do fogo nos biomas Amazônia e Cerrado. Este conhecimento foi de suma importância para avaliar as incertezas nas estimativas de emissões brutas dos principais GEE decorrentes da queima de biomassa, nos biomas estudados.

- O estudo demonstrou que as principais incertezas derivadas do uso dos produtos para estimar a extensão de áreas queimadas estão vinculadas, sobretudo, aos critérios de identificação de queimadas definidos nos algoritmos de detecção automática, às limitações intrínsecas à plataforma orbital e aos sensores de resolução moderada a baixa, como o MODIS. Neste sentido, qualquer avanço na diminuição dessas incertezas estaria orientado a melhorar os algoritmos que modelam as mudanças na cobertura da terra associadas à ocorrência de queimadas, diferenciando estas de alvos espectralmente similares, incorporando dados orbitais de maior resolução espacial.

- Qualquer tentativa de melhorar a exatidão das estimativas de áreas queimadas deve, também, estar orientada à melhoria no georreferenciamento das imagens MODIS, principalmente aquelas com resolução espacial de 1000 m, visando diminuir os erros de localização das áreas queimadas. Essa melhora pode ser alcançada setorizando o georreferenciamento dos dados orbitais em nível estadual, mediante o uso de cartas planimétricas na escala de 1:250.000, no lugar de cartas ao milionésimo.

- Limitações nas características do sensor MODIS como as distorções no tamanho do *pixel*, presentes para ângulos além de 45 graus do nadir, e as variações angulares na refletância observada das superfícies queimadas devido às variações do ângulo de visada e iluminação do sensor ao longo do campo de visada (110°); constituem um obstáculo importante para melhorar a confiabilidade nas incertezas das estimativas de

áreas queimadas. Essas limitações não podem ser sobrelevadas com os atuais produtos de detecção de áreas queimadas, portanto, novos sensores orbitais com capacidades melhoradas contribuiriam, juntamente com novas técnicas e procedimentos de identificação de áreas queimadas desenvolvidos pela comunidade científica, com estimativas mais exatas da área queimada.

-A avaliação dos diferentes produtos utilizados neste estudo para estimar a extensão de áreas queimadas nos biomas Amazônia e Cerrado, indicou que o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada* foi o que apresentou o maior grau de concordância entre as áreas queimadas detectadas e as observadas na classificação de referência, 81 e 93% de concordância e um coeficiente de regressão linear de 0,57 e 0,77, para ambos setores validados. No entanto, os produtos *MCD45* e *Detecção de Área Queimada* são os mais apropriados para estimar a biomassa queimada, nos biomas onde obtiveram um desempenho adequado, quando há necessidade de se estimar de forma regular e sistemática a extensão das áreas queimadas em nível regional, continental ou global.

Questões como: custo operacional, volume de informação que deve ser processada e disponibilidade e tempo demandado do recurso humano, são requeridos para o mapeamento regular e sistemático da extensão das áreas queimadas, os quais resultariam muito elevados se utilizados outros procedimentos que não automáticos. Desta forma, a detecção de áreas queimadas deve estar orientada ao uso de procedimentos automáticos ao longo de todas as etapas da aplicação dos algoritmos, evitando qualquer ajuste mediante técnicas de interpretação visual.

- Até o presente os produtos para estimar a extensão de áreas queimadas utilizados neste estudo carecem de validações rigorosas voltadas para o comportamento do fogo em ecossistemas brasileiros e adequadas às resoluções temporais e espaciais dos dados MODIS. A avaliação da qualidade das classificações automáticas é indispensável para poder incorporar ajustes no desempenho atual dos algoritmos de áreas queimadas.

- O estudo mostrou que a avaliação da qualidade dos produtos de detecção automática de áreas queimadas em escala regional, utilizando dados orbitais de alta resolução espacial e baixa resolução temporal, apresenta problemas específicos que ainda não têm sido abordados desde uma perspectiva teórica. Neste sentido, estimativas mais

confiáveis das emissões atmosféricas globais de GEE serão possíveis com o esforço da comunidade científica internacional para desenvolver procedimentos e metodologias de validação dos produtos de áreas queimadas, envolvendo maiores extensões do território e de acordo com as escalas espaço-temporais desses produtos, que possam ser implementados como parte essencial do desenvolvimento de produtos para estimar áreas queimadas, principalmente, em projetos consolidados de detecção automática em nível regional, continental ou global.

-Embora não exista na atualidade consenso na adoção de um algoritmo único, uma possível tendência seria o desenvolvimento de algoritmos híbridos que considerassem as variações espaço-temporais da cobertura da terra, combinando a informação espectral das bandas refletivas e emissivas do espectro (detecção de fogos ativos e discriminação de cicatrizes do fogo); assim como o desenvolvimento de algoritmos e técnicas de fusão de dados orbitais multi-sensores.

Por outro lado, qualquer tentativa em se aperfeiçoar as técnicas e os procedimentos relativos à quantificação de áreas queimadas, deve considerar fatores condicionantes como a confusão das áreas queimadas com outros alvos espectralmente similares, a dificuldade em se mapear áreas queimadas pequenas com dimensão menor do que a resolução espacial dos sensores (no nadir) e a resolução temporal adequada aos requerimentos de cada região de estudo, visando estimativas mais precisas do que as disponíveis atualmente.

- A avaliação do desempenho dos diferentes produtos para estimar a área queimada mostrou discrepâncias significativas nas estimativas obtidas. Para o bioma Amazônia a diferença entre as estimativas de área queimada foi de 128.300 km² (uma diferença de 85% entre o maior e o menor valor estimado). No bioma Cerrado a diferença entre o maior e o menor valor estimado de área queimada foi de 89.700 km² (uma diferença de 77% entre o maior e o menor valor estimado). Portanto, essas discrepâncias nas estimativas da área queimada foram responsáveis pelas discrepâncias observadas nas estimativas de emissões atmosférica brutas, resultando em diferenças similares em ambos biomas estudados. Isto demonstra que as incertezas nas estimativas de área queimada a partir de dados orbitais de resolução moderada a baixa, contribuem

significativamente com as incertezas nas estimativas de emissões atmosféricas brutas de gases de efeito estufa.

-Um fator importante que contribui com as incertezas nas estimativas de emissões atmosféricas brutas de GEE, geradas a partir de dados de orbitais, refere-se à diversidade dos parâmetros utilizados nos modelos de emissões, os quais apresentam margens de erros pouco conhecidas. Embora um grande volume dessas informações tenha sido recopiladas até o presente, estas encontram-se dispersas em um grande número de publicações e apresentadas em diferentes unidades e sistemas de referência, que a torna pouco acessível à comunidade científica.

-Neste estudo foi feita, pela primeira vez, uma análise das potencialidades e limitações de diferentes produtos para estimar áreas queimadas nos biomas Amazônia e Cerrado, recentemente disponíveis à comunidade científica, depois de vários anos de pesquisas. Foram delineadas, também, as principais causas das incertezas nas estimativas de áreas queimadas para cada um dos produtos avaliados, assim como as melhoras que devem ser consideradas em relação aos critérios de identificação de áreas queimadas definidos nos algoritmos de detecção automática, através dos quais é modelado o comportamento do fogo; visando estimativas mais precisas tanto das áreas queimadas, quanto das emissões atmosféricas brutas. Portanto, os resultados e as análises efetuadas no presente trabalho constituem uma referência importante para o ajuste de futuros algoritmos automáticos, assim como para a criação de procedimentos e metodologias de detecção de queimadas.

-Como conclusão geral deste trabalho, aponta-se, particularmente, para a complexidade dos temas estudados, cujos resultados devem ser entendidos como preliminares e específicos para cada bioma da área de estudo; assim como para a dificuldade em se modelar o comportamento do fogo por meio de algoritmos automáticos de detecção de mudanças na cobertura da terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DA AMAZÔNIA (ADA). **Amazônia Legal:** situação geográfica [S.l.], 2005.. Disponível em: <http://www.ada.gov.br/amazonia/geografica.asp/> . Acesso em: 30/06/2008.
- AGRESTI, A. An agreement model with Kapa as parameter. **Statistics & Probability Letters**, v.7, p. 271-273, 1989.
- AHERN, F. J.; GOLDAMMER, J. C.; JUSTICE, C. O. **Global and regional vegetation fire monitoring from space:** palnning a coordinated international effort. The Hague: SPB, Acad. Publ., 2001.
- ANDERSON, H. E. **Aids to determine fuel models for estimating fire behavior.** USDA Forest Fire Service. Ogden UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station General, 1982. 22 p. Technical Report INT-122.
- ANDREAE, M. O. Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. In: LEVINE, J. S. (ed.). **Biomass burning and global change.** Cambridge, Mass: MIT Press, 1991. p. 3-21.
- ANDREAE, M. O.; ANDREAE, T. W.; ANNEGARN, H.; BEER, J.; CACHIER, H.; LE CANUT, P.; ELBERT, W.; MAENHAUT, W.; SALMA, I.; WIENHOLD, F. G.; ZENKER, T. Aierborne studies of aerosol emissions from savannas fires in Southern Africa: 2. Aerosol chemical composition. **Journal of Geophysical Research-Atmosphere**, v.103, p. 32119-32128, 1998.
- ANDREAE, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosol from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v.15, n.4, p. 955-966, 2001.
- ARINO, O; PICCOLINI, I.; SIEGERT, F.; EVA, H.; CHUVIECO, E.; MARTIN, P.; LI, Z.; FRASER, R. H.; KASISCHHE, E.; ROY, D.; PEREIRA, J.; STROPPIANA, D. BURNS SCARS MAPPING METHODS. IN: AHERN, F.; GRÉGORIE, J.M.; JUSTICE, C. (eds.). **Forest fire monitoring and mapping:** a component of global observation of forest cover. [S.l]: European Commission Joint Research Centre, 2000. p. 198-223.
- BARBOSA, P. M.; GRÉGOIRE, J.; PEREIRA, J. M. An assessment of vegetation fire in Africa (1981-1991): Burned areas, burned biomass, and atmospheric emissions. **Global Biogeochemical Cycles**, v.13 n.4, p. 933-950, 1999.
- BELWARD, A. S.; KENNEDY, P. J.; GREGOIRE, J. M. The limitations and potential of AVHRR GAC data for continenta scale fire studies. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.11, p. 2215-2234, 1994.
- BRASIL. Decreto N° 89.817 de 20 de junho de 1984. **Normas técnicas da Cartografia Nacional.** Brasília, Diário Oficial da União, 1984.
- BRONW, S.; LUGO A., P. M. Brazil's Amazon forest and the global carbon problem, to Letter to the Editor. **Interciência**, v.11, n.2, p. 57-58, 1986.

- BOSCHETTI, L.; FLASSE, S. P.; BRIVIO, P. A. Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareo Boundary. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p. 280-292, 2004.
- BOSCHETTI, L.; EVA, H. D.; BRIVIO, P. A. GRÉGOIRE, J. M. Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. **Geophysical Research Letters**, v.31, n.L21501, p.1-1, 2004.
- BOX, E. O.; HOLBEN, N.; KALB, V. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary production and net CO₂ flux. **Vegetation**, v.80, p. 71-80, 1989.
- BURGAN, R. E.; ROTHERMEL, R. C. BEHAVE: **fire behavior prediction and fuel modeling system-FUEL subsystem**. Ogden, UT: USDA Forest Fire Service. Intermountain Research Station, 1984. Technical Report INT-167.
- CARVALHO, J. A.; SANTOS, J. M.; SANTOS, J. C.; LEITÃO, M. M.; HIGUCHI, N. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burn in the Manaus region. **Atmospheric Environment**, v. 29, n. 17, p. 2301-2309, 1995.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer & Graphics**, v.15, n. 6, p. 13-22, 1996.
- CARVALHO, J. A.; COSTA, F.; VERAS, C.; SANDBERG, D.; ALVARADO, E.; GIELOW, R.; SERRA, A.; SANTOS, J. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research-Atmosphere**, v.106, p. 17877-17887, 2001.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOUD, S.; GRÉGOIRE, J. M. Detecting Vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, v.77, p. 22-23, 2001.
- CESAR, O.; PAGANO, S. N.; LEITÃO FILHO, H. F.; MONTEIRO, R. SILVA, O. A.; MARINIS, G.; SHEPHERD, G. Estrutura do estrato arbóreo de uma vegetação de cerrado no município de Corumbataí (Estado de São Paulo). **Naturalia**, v.13, p. 91-101, 1988.
- CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid: Ediciones Rialp. 1996. 568 p.
- CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; COCERO, D.; RIAÑO, D. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR analysis in forest fire danger studies. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.8, p. 1621-1637, 2003.
- CHUVIECO, E.; COCERO, D.; AGUADO, I.; PALACIOS-ORUETA, A.; PRADO, E. Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.14, p. d14S07, 2004.
- COFER, W. R.; LEVINE, E. L.; WINSTEAD, L.; STOCKS, J. Gaseous emissions from Canadian boreal forest fires. **Atmospheric Environment**. Part A, v. 24, n. 7, p. 1653-1659, 1990.

COOPERATION INSTITUTE FOR METEOROLOGICAL SATELLITE STUDIES (CIMSS). **International MODIS/AIRS processing package**. Disponível em: <http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp>. Acesso em: 30/06/2008.

CONARD, S. G.; SUKHININ, A. I.; STOCKS, B. J.; CAHOON, D. R.; DAVIDENKO, E. O.; IVANOVA, G. A. Determining effects of area burned and severity on carbon cycling and emission in Siberia. **Climatic Change**, v.55, p. 197-211, 2002.

CRUTZEN, P. J.; HEIDT, L. E.; KRASNEC, J. P.; POLLOCK, W. H.; SELIER, W. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃CL and CO₂. **Nature**, n.282, p.253-256, 1979.

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, n. 250, p. 1669-1678, 1990.

DELITTI, W. B. C. **Aspectos comparativos da ciclagem de nutrientes minerais na mata ciliar, no campo cerrado e na floresta implantada de *Pinus elliottii* Engelm. *Var. elliottii***. 1984. 298 p. Tese (Doutorado em Ecologia)–Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

DELITTI, W. B. C.; MEGURO, M. Biomassa da vegetação lenhosa do cerrado. In: FUNCATE. **Primeiro relatório de atividades referente ao contrato PNUD/FUNCATE – Projeto BRA/95/G31**. Anexo II, 1997. p. 95-103.

DELMAS, R.; LACAUX, J. P.; BROCARD, D. Determination of biomass burning emission factors-Methods and results. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.138, n. 2-3 p. 181-204, 1995.

DUNCAN, B. N.; RANDALL V. N.; AMANDA, C. S.; ROSEMARIE, Y.; JENNIFER A. L. Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.D2, p. ACH 1-22, 2003.

ELVIDGE, C. D. Thermal infrared reflectance of dry plant materials: 2.5 – 20.0 micrometers. **Remote Sensing of Environment**, v.16, p. 265-285, 1988.

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.

FEARNSIDE, P. M. Burn quality prediction for simulation of the agriculture tem of Brazil's Transamazon highway colonist for estimating human carrying capacity. In: MISRA K. C.; PANDEY H. V.; GOVIL J. V. (eds.) **Ecology and resource management in the tropic**. Varanasi, India: International Society for Tropical Ecology. 1985.

FEARNSIDE, P. M. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. **Climatic Change**, v.46, p. 115-158, 2000.

FENSHOLT, R.; SANDHOLT, I. Derivaton of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and short wave infrared data in a semi-arid environment. **Remote Sensing of Environment**, v.87, n.1, p. 111-121. 2003.

- FERGUSON, S. A.; SANDBERG, D. V. OTTMAR. Modeling the effect of landuse changes on global biomass emissions. In: INNES, J. L.; BENISTON, M.; VERSTARETE, M. M. (eds.). **Biomass burning and its inter-relationships with the climate system**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 33-50.
- FINNEY M. A. **FARSITE users guide and technical documentation**. Fort Collins, CO: USDA Forest Fire Research Paper RMRS-RP-4, 1998. 47 p.
- FOODY, G. M.; On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment.. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.58, n.10, p. 1459-1460, 1992.
- FRANÇA, H. **Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no Cerrado com imagens AVHRR/NOAA**. 2001. 121 p. Tese (Doutorado em Ciências)– Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- FRIEDL, M. A.; MICHAELSEN, J.; DAVIS F. W.; WALKER H.; SCHIMEL D. S. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v.15 n.7, p. 1401-1420, 1994.
- GAO, F.; JIN, Y.; XIAWEN, L.; SCHAF, C. B.; STRAHER, A. H. Bidirectional NDVI and atmospherically resistant BRDF inversion for vegetation canopy. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.40, p. 1269-1278. 2002.
- GOODLAND, R. A physiognomic analysis of the “Cerrado” vegetation of Central Barzil. **Journal of Ecology**. v.59, n.1880, p. 411-419. 1971.
- GRAETZ, R. D.; GRÉGOIRE, J. M.; LOVELL, J. L.; KING, E. A.; CAMPBELL, S. K.; TOURNIER, A. A contextual approach to the mapping of burned areas in tropical Australian savannas using medium-resolution satellite data. **Canadian Journal of Remote Sensing** v. 29, n. 4, p. 499-509. 2003.
- HAO, W.; LIU, M. H.; CRUTZEN, P. J. Estimatives of annual and regional releases of CO₂ and other trace gases to the atmosphere from fires in the tropics, based on the FAO statistics for the period 1975-1980. In: GOLDAMMER, J. G. (ed.). **Fire in the tropical biota: ecosystem processes and global challenges**. New York: Springer-Verlag, 1990. p. 440-462.
- HAO, W.; WARD, D. E. Methane production from global biomass burning. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n.D11, p. 20657-20661, 1993.
- HAO, W.; LIU, M. H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v.8, n.4, p. 495-503, 1994.
- HIGUCHI, N; SANTOS, J.; RIBERIRO, R, J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, v.28, n. 2, p. 153-166. 1998.
- HIGUCHI, N. Above and below biomass allometry in the Brazilian Amazon. In: REGIONAL AMAZON FOREST STRUCTURE AND CARBON CYCLING WORKSHOP, 2004, New Orleans. **Proceedings**...New Orleans: University of New Orleans, 2004.

HOELZEMANN, J. J.; SCHULTZ, M. G.; BRASSEUR, G. P.; GRANIER, C.; SIMON, M. Global wideland fire emission model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n.D14S04, p. 1000-1029, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de Vegetação do Brasil**, 1:5.000.000. Rio de Janeiro, IBGE. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm> . Acesso em: 30/06/2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, IBGE-CDDI. Série Manuais Técnicos em Geociências, n.1. 1992.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário 1996-1997**. Rio de Janeiro, IBGE. 1998. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/1995_1996/default.shtm . Acesso em: 30/06/2004.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE)/Coordenação de Observação da Terra (OBT). **Projeto Prodes** - monitoramento da floresta amazônica brasileira por satélite. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html> . Acesso em: 01/03/2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE)/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Produto MOD14**. Disponível em: <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/>. Acesso em: 30/06/2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE)/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Algoritmo de detecção de área queimada**. Disponível em: <http://pirandira.cptec.inpe.br/queimadas/areasimg.php> . Acesso em: 30/06/2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE)/Divisão de Geração de Imagens (DGI). **Landsat 5**. Disponível em <http://www.dgi.inpe.br/>. Acesso em: 30/06/2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). [S.I.], 2001. **Cambio Climático 2001**: Informe de Síntesis. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwg2s.pdf/> . Acesso em: 30/08/2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). [S.I.], 2006. **Guidelines for nacional greenhouse gas inventories**: agricultura, forestry and other land use (draft). Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/2006GLs/sod/> . Acesso em: 30/11/2005.

JAIN, A. K.; TAO, Z.; TANG, X.; GILLESPIE, C. ESTIMATES of global biomas burning emission for reactive greenhouse gases (CO, NMHCs, and NO_x) and CO₂. **Journal of Geophysical Research**, v.111, n.D06304, p. 1-214, 2006.

JAIN, A. K. Global estimation of CO emission using three sets of satellite data for burned area. **Atmospheric Environment**, v.41, p.6931-6940, 2007.

- JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing**. Englewood Cliffs: Prentice – Hall, 51p. 1986.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.; ROY, T. D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p. 244–262, 2002a.
- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLF, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, T. D.; MORISETTE, J. T. An overview of the MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n. 1-2. p. 3–15, 2002b.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; CSISZAR I.; MORISETTE, J.; KAUFMAN, Y. **MODIS fire products** - algorithm technical background document, version 2.3, October, 2006. Disponível em: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf . Acesso em: 30/12/2007.
- KASISCHKE, E. S.; CHRISTENSEN, N. L.; STOCKS, B. J. Fire Global warming and the carbon balance of boreal forests. **Ecological Applications**, v5, p.437-451, 1995.
- KASISCHKE, E. S.; BRUHWILER, L. P. Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.D1, 8146, 2003.
- KAUFMAN, Y. J.; FRASER, R. S.; FERRARE, R. A. Satellite remote sensing of large-scale air pollution-Method. **Journal of Geophysical Research**, v.95, p. 9895-9909, 1990a.
- KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A.W.; JUSTICE, C.; TUCKER, C.J.; PEREIRA, M.C.; FUNG, I. Remote sensing of biomass burning in the tropics. In: GOLDAMMER, J.G. (eds.). **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, 1990b. Cap. 16, p. 371-399. (Ecological Studies, 84).
- KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A.; WARD, D.; TANRE, D.; HOLBEN, B. N., MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R. Biomass burning airborne and spaceborne experiment in the Amazonas (Base-A). **Journal of Geophysical Research**, v.97, n. D13, p. 14581-14599, 1992.
- KAUFMAN, Y. J.; JUSTICE, C. O. **MODIS fire products** - algorithm technical background document, 77 p., 1998. Disponível em: <http://modis-fire.umd.edu/MOD14.asp>. Acesso em: 30/12/2007.
- KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradients in the Brazilian cerrado. **Journal of Ecology**, v.82, p. 519-531, 1994.
- KEANE, R., E.; BURGAN, R.; WAGTENDONK, J. V. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS and biophysical modeling. **International Journal of Wildland Fire**, V.10, p. 301-319, 2001.
- KESHAVA, N.; MUSTARD, J. Spectral Unmixing. **IEEE Signal Processing Magazine**, v.19, n. 1, p. 44-57, 2002.

KIDWELL, K.B. **NOAA polar orbiter data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, NOAA-9, NOAA-10, NOAA-11 and NOAA-12): user guide**. Washington, DC: NOAA, v.1, 1991.

KING, M. D.; KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D.; NAKAJIMA, T. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present and future. **Bulletim of the Americam Meteorological Society**, v.80, p. 2229-2259. 1999.

LACAUX, J. P; DELMAS, R.; JAMBERT, C.; KUHNBUSCH, T.A. NO_x emissions from African savanna fires. **Journal of Geophysical Research**, v.10, n. D19, p. 23585-23595, 1996.

LAMARQUE, J. F.; EDWARDS, D. F.; EMMONS, L. K.; GILLE, J. C.; WILHELMI, O.; GERBIG, C. (2003). Identification of CO plumes from MOPITT data: Application to the August 2000 Idaho-Montana forest fires. **Geophysical Research Letters**, v.30, n.13, 2003.

LAMBIN, E. F.; GOYVAERTS, K.; PETIT, C. Remotely-sensed indicators of burning efficiency of savannah and forest fires. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.15, p. 3105-3118, 2003.

LEVINE, J.S. Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications. In: J. S. LEVINE (ed.). **Biomass burning and global change**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1991. p. 15–30.

LEVINE, J.S. Gaseous and particulate emissions released to the atmosphere from vegetation fires. In: Health Guidelines for Vegetation Fire Events, 1999, Lima, Perú. **Proceedings...** Lima, Perú.: United Nations Environment Programme, 1999.

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. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.14.49>>. Acesso em: 10 jun. 2009.

LIU, J.; DRUMMOND, J.R.; LI, Q.; GILLE, J.C.; ZISKIN, D.C. Satellite mapping of CO from forest fires in Northwest America using MOPITT measurements. **Remote Sensing of Environment**, V.95, p. 502-516, 2005.

MA, Z.; REDMOND, R. L. Tau coefficients for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.61, n.4, p. 435-439, 1995.

MACK, F.; HOFFSTADT, J.; ESSER, G.; GOLDAMMER, J. G. Modeling the influence of vegetation fires on the global carbon cycle. In: LEVINE, J. S. (ed.). **Biomass burning and global change**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1996. p. 149-159.

- MAYAUX, P.; LAMBIN, E. F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: A two-step correction function for proportional errors due to spatial aggregation. **Remote Sensing of Environment**, v.53, p. 1-15, 1995.
- MCKINLEY, R. A.; CHINE, E. P.; WERTH, L. F. Operational fire fuels mapping with NOAA-AVHRR data. PECORA SYMPOSIUM, 10., 1985, Falls Church, VA. **Proceedings**... p.295-304. Falls Church, VA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1985.
- MEDLER, M. J.; YOOL, S. R. Improving thematic mapper based classification of wildfire induced vegetation mortality. **Geocarto International**, V.12, p. 49-58, 1997.
- MEIRA FILHO, L. G. Estimate of above-ground stock in the Brazilian Amazon Forest. (Universidade de São Paulo, SP). 2000. Comunicação pessoal.
- MENAUT, J.; ABBADIE L.; LAVENU, F.; LOUDJANI, P.; PODAIRE A. Biomass burning in west african savannas. In: LEVINE, J. S. (ed.). **Biomass burning and global change**. Cambridge, Mass: MIT Press, p. 133-142, 1991.
- MERRILL, E. H.; BRAMBLE-BRODAHL, M. K.; MARRS, R. W.; BOYCE M. S. Estimation of green herbaceous phytomass from Landsat MSS data in Yellowstone National Park. **Journal of Range Management**, v.46, p. 151-157, 1993.
- MEYER, C. P.; LUHAR, A. K.; MITCHELL, R. M. Biomass burning emissions over northern Australia constrained by aerosol measurements: I-Modelling the distribution of hourly emissions. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 1629-1646, 2008.
- MICHEL, C.; LIOSSE, C.; GRÉGOIRE, J. M.; TANSEY, K.; CARMICHAEL, G. R.; WOO, J. H. Biomass burning emission inventory from burnt area data given by the SPOT-Vegetation system in the frame of TRACE-P and ACE-Asia campaigns. **Journal of Geophysical Research**, v.110, n. D09304, 2005.
- MILLINGTON, A. C.; CRITCHLEY, R. W.; DOUGLAS, T. D. RYAN, P. **Estimating woody biomass in sub-Saharan Africa**. Washington, D. C.: The world Bank, 1994. 191 p.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Primeiro inventário brasileiro de emissões de gases de efeito estufa**: emissões de gases de efeito estufa da queima de biomassa no Cerrado não antrópico utilizando dados orbitais. Brasília, 2002. Relatórios de Referência.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **primeiro inventário brasileiro de emissões de gases de efeito estufa**: emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas. Brasília, 2006. Relatórios de Referência.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Segundo inventário brasileiro de emissões de gases de efeito estufa**: emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas. Brasília, 2008. Relatórios de Referência. *No prelo*.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO)**. Brasília, 2007.

Disponível em: ftp://ftp.ibge.gov.br/Cartas_e_Mapas/Mapas_Murais/ . Acesso em: 30/06/2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado**. Brasília, 2004. Relatório Final. Edital Probio 02/2004, Projeto Executivo B.02.02.59.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Warehouse inventory search tool (WIST)**. Disponível em: <https://wist.echo.nasa.gov/>. Acesso em: 30/11/2007a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Acesso em: 30/11/2007b.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Modis land global browse image**. Disponível em: <http://landqa2.nascom.nasa.gov/cgi-bin/browse/browse.cgi>. Acesso em: 30/12/2007c.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Orthorectified Landsat thematic mapper mosaic**. Disponível em: <https://zulu.ssc.nasa.gov/mrsidl/>. Acesso em: 30/12/2007d.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **NESDIS programs** – NOAA satellite operations. Washington, DC, 1985. 264 p.

OLSON, J. S. Carbon balance in relation to fire regimes. In: MOONEY, H. A.; BONNIKESEN, J. M.; CHRISTENSEN, N. L.; LOTAN, J. E.; REINERS, W. A. (eds.) **Fire regimes and ecosystem properties**. Washington, D. C.: National Headquarters USDA Forest Service General, 1981. p. 327-378. Technical Report WO-26.

OTTMAR, R. D.; VIHANEK, E.; WRIGTH, C. S. **Stereo photo series for quantifying natural fuels, vol. I, Mixed-Conifer with mortality, Western Juniper, Sagebrush, and Grassland types in the interior Pacific Northwest**. Boise, Idaho: U.S. Dep. of Agric. For. Serv. Natl. Interag. Fire Cent., 1998.

OTTMAR, R. D.; VIHANEK, E. **Stereo photo series for quantifying natural fuels, vol. II, Black Spruce and White Spruce types in Alaska**. Boise, Idaho: U.S. Dep. of Agric. For. Serv. Natl. Interag. Fire Cent., 1998a.

OTTMAR, R. D.; VIHANEK, E.; REGELBRUGGE, C. **Stereo photo series for quantifying natural fuels, vol. IV, Pinyon-Juniper, Sagebrush and Chaparral types in the Southwestern United States**. Boise, Idaho: U.S. Dep. of Agric. For. Serv. Natl. Interag. Fire Cent., 2000.

OTTMAR, R. D.; VIHANEK, E.; MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, M. A. **Stereo photo series for quantifying Cerrado fuels in Central Brazil, vol. I**. Portland, Oreg: Gen. Tech. Rep. U.S. Dep. of Agric. For. Serv. Pac. Northwest Res. St., 2000.

PALACIOS-ORUETA, A.; PARRA, A.; CHUVIECO, E.; PARRA, A.; CARMONA-MORENO, C. Remote sensing and geographic information systems methods for global

- spatiotemporal modeling of biomass burning emissions: assessment in the African Continent. **Journal of Geophysical Research**, v.109, n. D14S09, 2004.
- PALACIOS-ORUETA, A.; CHUVIECO, E.; PARRA, A.; CARMONA-MORENO, C. Biomass burning emissions: a review of models using remote-sensing data. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.104, p. 189-209, 2005.
- PALTRIEDGE, G. W.; BARBER, J. Monitoring grassland dryness and the fire potential in Australia with NOAA-AVHRR data. **Remote Sensing of Environment**, V.25, p. 381-394, 1988.
- PEREIRA, J. M. C.; CHUVIECO, E.; BEAUDOIN, A.; DESBOIS N. Remote sensing of burned areas: a review. In: CHUVIECO, E. (ed.). **A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires**. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, 1997. p. 127-183.
- PONTIUS, R. G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.8, p. 1011-1016, 2000.
- POTTER, C.; BROOKS-GENOVESE, V.; KLOOSTER, S.; TORREGOSA, A. Biomass burning emission reactive gases estimated from satellite data analysis and ecosystem modeling for the Brazilian Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D20,8056 2002.
- PRINCE, S. D.; GOETZ, S. J.; GOWARD, S. N. Monitoring primary production from earth observing satellites, **Water, Air, and Soil Pollution**, v.82, p. 509-522., 1995.
- Projeto RADAMBRASIL. **Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: 1981. (Levantamento de Recursos Naturais).
- ROBINSON, J. M. On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning. **Climatic Change**, v. 14, n. 3, p. 243-22694, 1989.
- ROBINSON, J. M. Fire from space: global fire evaluation using infrared remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 3-24, 1991
- ROLLINGS, M. G.; KEANE, R. E.; PARSONS, R. A. Mapping fuel and fire regimes using remote sensing ecosystem simulation, and gradient modeling. **Ecological Applications**. v.14, n.1, p. 75-95, 2004.
- ROY, D. P.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data—a bi-directional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p. 263-286, 2002.
- ROY, D. P.; YIN, 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.
- ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. **MODIS collection 5 burned area product MCD45 - user's guide**, version 1.1, Sept., 2008a. Disponível em: http://modis-fire.umd.edu/documents/MODIS_Burned_Area_Users_Guide_1.1.pdf. Acesso em: 30/09/2008.

- 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, 2008b.
- SALAS, J.; CHUVIECO, E. Geographic information systems for wildfire risk mapping. **Wildfire**, v.3, n.2, p. 7-13, 1994.
- SCHOLES, R. J.; KENDALL, J.; JUSTICE, C. O. The quantity of biomass burned in Southern Africa. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n. D19, p. 23667-23676. 1996a.
- SCHOLES, R. J.; VANDERMERWE, M. R. Greenhouse gas emissions from South Africa. **South African Journal of Science**, v.92, n.5, p. 220-222, 1996b.
- SEILER, W.; CRUTZEN, P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. **Climate Change**, v.2, p. 207-247, 1980.
- SETZER, A.W. Operational satellite monitoring of fires in Brazil. **International Forest Fire News**, v. 9, n. 7, p.8-11. 1993.
- SETZER, A.W.; PEREIRA, M.C.; PEREIRA JR., A.C. Satellites studies of biomass burning in Amazônia: some practical aspects. **Remote Sensing Reviews**, v.10, n. 1-3, p. 91-103. 1994.
- SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVERA-LOMBARDI, R. Estimativa quinzenal de áreas queimadas. In: RUDORFF, Bernard Friedrich Theodor; SHIMABUKURO, Yosio Edemir; CEBALLOS, Juan Carlos (Ed.). **O sensor Modis e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: A.Silva Ed, 2007. v. cap. 28, p. 403-417. ISBN 978-85-60507-00-9. (INPE-15291-PRE/10106). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.14.11.50>>. Acesso em: 10 jun. 2009.
- SHIMABUKURO, Y.; SMITH, J. The Least-Squares Mixing Models to Generate Fraction Images From Remote Sensing Multispectral Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. V.29, n.1, p. 16-20. 1991.
- SHIMABUKURO, Y. E.; BATISTA, G. T.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; DUARTE, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.3, p. 535-541, 1998.
- SISTEMA DE VIGILÂNCIA DA AMAZÔNIA (SIVAM). **Mapeamento de vegetação**. Disponível em: http://www.sivam.gov.br/INFO/un_44.htm. Acesso em: 30/12/2005.
- SMITH, J. H.; STEHMAN, S. V.; WICKHAM, J. D.; YANG, W. Effects of landscape characteristics on land-cover class accuracy. **Remote Sensing of Environment**, v.84, p. 342-349, 1993.
- SOUSA, W. P. The role of disturbance in natural communities. **Annual Review of Ecology and Systematics**. V.15, p. 353-391. 1984.

- VIEGAS, D. X.; PIÑOL, J.; VIEGAS, M. T.; OGAYA, R. Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. **International Journal of Wildland Fire**, v.10, p. 223-240, 2001.
- VINEY, N. R. A review of fine fuel moisture modeling. **International Journal of Wildland Fire**, v.1, p. 215-2240, 1991.
- WARD, D. E; **Field scale measurements of emissions from open fires, technical paper presented at the defense nuclear agency global effects review.** Washington, D. C.: Defense Nuclear Agency, 1986.
- WARD, D. E.; HARDY, C. C. Smoke emissions from wildland fires. **Environment International**, v.17, n.18, p. 117-134, 1991.
- WARD, D. E.; HAO, W. M. Projections of emissions from burning of biomass for use in studies of global climate and atmospheric chemistry. In: National Air and Waste Management Association, Meeting, 4., 1991, Vancouver, B. C. **Proceedings...**, Vancouver, B. C.: Air and Waste Management Association, 1991, p. 91-128.
- WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMAN, J. B.; BABBITT, R.E.; CUMMINGS, D. L.; DIAS, B., HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in Brazil: Base-B experiment. **Journal of Geophysical Research**, v.97, n. D13, p. 14601-14619, 1992.
- WARD, D. E; HAO, W. M.; SUSSOT, R. A.; BABBIT, R. E.; SHEA, R. W.; KAUFFMAN, J. B. JUSTICE, C. O. Effect of fuel composition on combustion efficiency and emission factors for African savanna ecosystems. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n. D19, p. 23569-23576. 1996.
- WARING, R. H.; RUNNING, S. W. **Forest ecosystems: analysis at multiple scales.** San Diego: Academic Press, 1998. 370 p.
- WHITE, J. D.; RYAN, K. C.; KEY, C. C; RUNNING, W. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. **International Journal of Wildland Fire**, v.6, p. 125-136, 1996.
- WOLFE, R. E; NISHIHAMA M.; FLEIG, A. J.; KUYPER, J. A.; ROY, D. P. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS Land Science. **Remote Sensing of Environment**, v.83, n.1-2 p. 31-49. 2002.
- WOLFE, R. E; ROY, D. P.; VERMOTE, E. F. The MODIS Lland data storage, gridding and compositing methodology: L2 grid. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. V.36, p. 1324-1338. 1998.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. , Geneva, 1995. World Global Ozone Res. and Mon. Proj., Rep. 37.
- ZARCO-TEJADA, P. J.; RUEDA, C. A.; USTIN, S. L. Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods. **Remote Sensing of Environment**, v.85, n. 1, p. 109-124. 2003.

APÊNDICE A

LISTAGEM DAS CLASSES DE VEGETAÇÃO

TABELA A.1 Listagem das classes de vegetação adotadas no presente estudo apresentando as siglas e suas respectivas descrições para o bioma Amazônia.

Sigla	Descrição
AA	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial
AB	Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas
AS	Floresta Ombrófila Aberta Sub Montana
CB	Floresta Estacional Decidual – Terras Baixas
CS	Floresta Estacional Decidual – Submontana
DA	Floresta Ombrófila Densa Aluvial
DB	Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas
DM	Floresta Ombrófila Densa Montana
DS	Floresta Ombrófila Densa Submontana
FA	Floresta Estacional Semi-Decidual Aluvial
FB	Floresta Estacional Semi-Decidual Terras Baixas
FS	Floresta Estacional Semi-Decidual Submontana
LA	Campinarana Arborizada
LB	Campinarana Arbustiva
LD	Campinarana Florestada
LO	Contato Campinarana e Floresta Ombrófila
PA	Área das formações pioneiras - Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre
PF	Área das formações pioneiras - Vegetação com influência flúvio marinha
RM	Refúgio Montano
SA	Savana Arborizada
SD	Savana Florestada
SG	Savana Gramíneo Lenhosa
SP	Savana Parque

Sigla	Descrição
TD	Savana Estépica Florestada
TG	Savana Estépica Gramíneo Lenhosa
TP	Savana Estépica Parque
AC	AC - Agricultura
AP	AP – Pastagem
Iu	Área Urbana
Co	Corte Seletivo
Im	Mineração
Re	Reservatório
Água	Rios e Lagos
VS	Vegetação Secundária

TABELA A.2 Listagem das classes de vegetação adotadas no presente estudo apresentando as siglas e suas respectivas descrições para o bioma Cerrado.

Sigla	Descrição
As	Floresta Ombrófila Aberta Sub Montana
Da	Floresta Ombrófila Densa Aluvial
Ds	Floresta Ombrófila Densa Sub Montana
Fa	Floresta Estacional Semi-Decidual – Aluvial
Fb	Floresta Estacional Semi-Decidual – Terras Ba
Fs	Floresta Estacional Semi-Decidual – Submontana
Pa	Área das formações pioneiras - Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre
Pf	Área das formações pioneiras - Vegetação com influência flúvio marinha
Pm	Área das formações pioneiras - Vegetação com influência marinha
Saf	Savana – Arborizada com floresta de galeria
Sas	Savana – Arborizada sem floresta de galeria
Sd	Savana – Florestada
Spf	Savana – Parque com floresta de galeria
Sps	Savana – Parque sem floresta de galeria
Aa	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial
Cs	Floresta Estacional Decidual – Submontana
Sgf	Savana – Gramíneo Lenhosa com floresta de galeria
Sgs	Savana – Gramíneo Lenhosa com floresta de galeria
Tas	Savana Estépica – Arborizada sem palmeira e sem floresta de galeria
Cm	Floresta Estacional Decidual - Montana
Fm	Floresta Estacional Semi-Decidual – Montana
Taf	Savana Estépica – Arborizada com floresta de galeria
Td	Savana Estépica – Florestada
Tgs	Savana Estépica – Gramíneo Lenhosa sem palmeiras e sem floresta de galeria
Cb	Floresta Estacional Decidual – Terras Baixas
Mm	Floresta Ombrófila Mista – Montana
Tpf	Savana Estépica – Parque com floresta de galeria
Tps	Savana Estépica – Parque sem palmeiras e sem floresta de galeria

Sigla	Descrição
R	Reflorestamento
Ac	Agricultura
Ap	Pastagem
Iu	Área Urbana
Im	Área de Mineração
Agua	Reservatórios, Rios e Lagos
Vs	Vegetação Secundária

APÊNDICE B

TABELA B.1 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Amazônia, utilizando o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*.

Classe	A (ha)	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
AA	78.852,22	6.675.698,77	0,70	0,50	0,88	2,06	0,081419	0,17	0,017	0,00285
AB	543.372,15	39.929.722,99	0,70	0,50	0,88	12,30	0,081419	1,00	0,017	0,01702
AS	2.009.392,65	150.758.061,96	0,70	0,50	0,88	46,43	0,081419	3,78	0,017	0,06427
CB	1.208,13	87.021,41	0,70	0,50	0,90	0,03	0,081419	0,00	0,024	0,00005
CS	17.917,48	1.290.596,10	0,70	0,50	0,90	0,41	0,081419	0,03	0,024	0,00079
DA	36.635,83	3.516.210,88	0,70	0,50	0,88	1,08	0,081419	0,09	0,017	0,00150
DB	379.645,08	32.819.795,43	0,70	0,50	0,88	10,11	0,081419	0,82	0,017	0,01399
DM	36,22	2.778,57	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,017	0,00000
DS	1.070.896,97	99.485.985,92	0,70	0,50	0,88	30,64	0,081419	2,49	0,017	0,04241
FA	14.559,85	872.571,70	0,70	0,50	0,90	0,27	0,081419	0,02	0,024	0,00054
FB	33.154,84	1.986.969,80	0,70	0,50	0,90	0,63	0,081419	0,05	0,024	0,00122
FS	531.150,82	31.617.931,15	0,70	0,50	0,90	9,96	0,081419	0,81	0,024	0,01946
LA	5.007,92	470.493,93	0,70	0,50	0,98	0,16	0,081419	0,01	0,029	0,00038
LB	431,74	38.213,35	0,70	0,50	0,98	0,01	0,081419	0,00	0,03	0,00003
LD	2.676,19	197.851,03	0,70	0,50	0,98	0,07	0,081419	0,01	0,029	0,00016
LG	2.849,02	300.428,64	0,05	0,95	0,96	0,01	0,039916	0,00	0,037	0,00002
LO	1.268,53	93.782,77	0,70	0,50	0,98	0,03	0,081419	0,00	0,017	0,00004
PA	166.068,67	12.691.970,03	0,05	0,95	0,96	0,58	0,039916	0,02	0,037	0,00085
PF	7.989,72	1.107.455,11	0,70	0,50	0,91	0,35	0,069561	0,02	0,024	0,00059
RM	7.663,00	636.642,29	0,70	0,50	0,90	0,20	0,081419	0,02	0,017	0,00028
SA	170.806,64	11.764.941,51	0,80	0,89	0,93	7,79	0,057703	0,45	0,03	0,01349
SD	210.880,09	12.612.936,22	0,80	0,89	0,88	7,90	0,081419	0,64	0,024	0,01544
SG	161.666,38	15.374.473,08	0,05	0,95	0,96	0,70	0,039916	0,03	0,037	0,00104
SP	541.254,96	52.991.785,82	0,70	0,89	0,94	31,03	0,051774	1,61	0,034	0,05463
TD	9.117,71	546.697,89	0,80	0,89	0,88	0,34	0,081419	0,03	0,024	0,00067
TG	11,46	1.089,89	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,037	0,00000
TP	3.093,34	294.176,17	0,80	0,89	0,94	0,20	0,051774	0,01	0,034	0,00035
R	0,00									
AC	44.041,52									
AP	848.681,21									
Iu	46.317,37									
Co	6.478,68									
Im	5.996,31									
Re	223,57									
Água	33.620,42									
VS	1.204,57									
Total	6.994.171,26					163,30		12,13		0,25208

Para todas as tabelas do Apêndice B – segue a descrição das siglas utilizadas: A corresponde à área queimada; BC é a densidade total de CO_2 na biomassa; FBV é a fração da biomassa viva acima do solo; E é a eficiência da queima; EC é a eficiência da combustão; $M(CO_2)$ é a massa total de CO_2 emitida; $RECO$ é o quociente de emissão, ou seja, a razão entre a concentração de CO e a concentração de uma espécie de referência (CO_2) emitida durante a queimada (CO/CO_2); e $RENO_x$ é o quociente de emissão (NO_x/CO). As referências são descritas a seguir: BC^a , MCT (*no prelo*); FBV^b , Ottomar et al. (1998, 1998a, 2000 e 2002); E^c , MCT (2002), Fearnside (2000) e Hoelzemann (2004); EC^d e $RECO^d$, Cofer et al. (1990), Ward et al. (1992), Hao e Ward (1993), Kauffman et al. (1994), Delmas et al. (1996) e Lacaux et al. (1996); e $RENO_x^e$, Hoelzemann (2004).

TABELA B.2 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Amazônia, utilizando o produto MCD45.

Classe	A (ha)	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
AA	6.396,61	541.012,72	0,70	0,50	0,88	0,17	0,081419	0,01	0,017	0,00023
AB	69.337,52	5.037.560,69	0,70	0,50	0,88	1,55	0,081419	0,13	0,017	0,00215
AS	645.540,29	43.930.872,34	0,70	0,50	0,88	13,53	0,081419	1,10	0,017	0,01873
CB	0,00	0,00	0,70	0,50	0,90	0,00	0,081419	0,00	0,024	0,00000
CS	3.820,28	275.175,05	0,70	0,50	0,90	0,09	0,081419	0,01	0,024	0,00017
DA	7.093,00	625.621,26	0,70	0,50	0,88	0,19	0,081419	0,02	0,017	0,00027
DB	45.050,40	3.858.736,22	0,70	0,50	0,88	1,19	0,081419	0,10	0,017	0,00165
DM	0,00	0,00	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,017	0,00000
DS	222.781,91	19.150.191,89	0,70	0,50	0,88	5,90	0,081419	0,48	0,017	0,00816
FA	5.079,84	304.435,02	0,70	0,50	0,90	0,10	0,081419	0,01	0,024	0,00019
FB	6.366,29	381.531,74	0,70	0,50	0,90	0,12	0,081419	0,01	0,024	0,00023
FS	181.746,79	11.000.907,11	0,70	0,50	0,90	3,47	0,081419	0,28	0,024	0,00677
LA	34,97	3.285,59	0,70	0,50	0,98	0,00	0,081419	0,00	0,029	0,00000
LB	55,91	4.948,23	0,70	0,50	0,98	0,00	0,081419	0,00	0,03	0,00000
LD	936,43	69.230,16	0,70	0,50	0,98	0,02	0,081419	0,00	0,029	0,00006
LG	217,72	22.959,04	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,037	0,00000
LO	468,60	34.643,51	0,70	0,50	0,98	0,01	0,081419	0,00	0,017	0,00002
PA	80.985,55	6.666.487,24	0,05	0,95	0,96	0,30	0,039916	0,01	0,037	0,00045
PF	827,07	114.639,71	0,70	0,50	0,91	0,04	0,069561	0,00	0,024	0,00006
RM	4.061,38	337.419,38	0,70	0,50	0,90	0,11	0,081419	0,01	0,017	0,00015
SA	73.847,97	4.878.014,52	0,80	0,89	0,93	3,23	0,057703	0,19	0,03	0,00559
SD	112.699,65	6.382.551,59	0,80	0,89	0,88	4,00	0,081419	0,33	0,024	0,00781
SG	88.318,44	8.399.083,47	0,05	0,95	0,96	0,38	0,039916	0,02	0,037	0,00057
SP	209.433,22	20.106.838,65	0,70	0,89	0,94	11,77	0,051774	0,61	0,034	0,02073
TD	621,93	37.290,79	0,80	0,89	0,88	0,02	0,081419	0,00	0,024	0,00005
TG	0,00	0,00	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,037	0,00000
TP	410,59	39.047,07	0,80	0,89	0,94	0,03	0,051774	0,00	0,034	0,00005
R	0,00									
AC	35.376,86									
AP	266.168,38									
Iu	5.539,29									
Co	699,84									
Im	1.015,68									
Re	55,24									
Água	1.926,71									
VS	686,60									
Total	2.077.600,94					46,22		3,31		0,07407

TABELA B.3 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Amazônia, utilizando o produto *Deteção de Área Queimada*.

Classe	A (ha)	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
AA	67.594,74	5.867.146,36	0,70	0,50	0,88	1,81	0,081419	0,15	0,017	0,00250
AB	373.091,39	27.623.176,76	0,70	0,50	0,88	8,51	0,081419	0,69	0,017	0,01178
AS	1.602.412,85	131.974.664,79	0,70	0,50	0,88	40,65	0,081419	3,31	0,017	0,05626
CB	1.274,38	91.793,84	0,70	0,50	0,90	0,03	0,081419	0,00	0,024	0,00006
CS	10.019,53	721.706,80	0,70	0,50	0,90	0,23	0,081419	0,02	0,024	0,00044
DA	86.622,74	8.279.593,50	0,70	0,50	0,88	2,55	0,081419	0,21	0,017	0,00353
DB	602.263,56	54.105.600,34	0,70	0,50	0,88	16,66	0,081419	1,36	0,017	0,02307
DM	228,51	17.528,75	0,70	0,50	0,88	0,01	0,081419	0,00	0,017	0,00001
DS	1.363.793,18	128.113.115,06	0,70	0,50	0,88	39,46	0,081419	3,21	0,017	0,05462
FA	15.045,26	901.662,22	0,70	0,50	0,90	0,28	0,081419	0,02	0,024	0,00055
FB	38.097,38	2.283.176,17	0,70	0,50	0,90	0,72	0,081419	0,06	0,024	0,00141
FS	503.590,94	29.975.724,19	0,70	0,50	0,90	9,44	0,081419	0,77	0,024	0,01845
LA	915,31	74.882,75	0,70	0,50	0,98	0,03	0,081419	0,00	0,029	0,00006
LB	483,97	42.836,26	0,70	0,50	0,98	0,01	0,081419	0,00	0,03	0,00004
LD	1.843,17	137.810,24	0,70	0,50	0,98	0,05	0,081419	0,00	0,029	0,00011
LG	4.037,51	425.755,37	0,05	0,95	0,96	0,02	0,039916	0,00	0,037	0,00003
LO	1.129,44	83.499,20	0,70	0,50	0,98	0,03	0,081419	0,00	0,017	0,00004
PA	74.999,31	9.545.340,13	0,05	0,95	0,96	0,44	0,039916	0,02	0,037	0,00064
PF	3.924,93	544.034,91	0,70	0,50	0,91	0,17	0,069561	0,01	0,024	0,00029
RM	3.048,81	253.295,54	0,70	0,50	0,90	0,08	0,081419	0,01	0,017	0,00011
SA	71.873,81	4.791.573,45	0,80	0,89	0,93	3,17	0,057703	0,18	0,03	0,00549
SD	206.640,29	11.685.409,32	0,80	0,89	0,88	7,32	0,081419	0,60	0,024	0,01431
SG	14.461,48	1.375.286,92	0,05	0,95	0,96	0,06	0,039916	0,00	0,037	0,00009
SP	75.835,73	7.209.103,12	0,70	0,89	0,94	4,22	0,051774	0,22	0,034	0,00743
TD	1.717,31	102.970,07	0,80	0,89	0,88	0,06	0,081419	0,01	0,024	0,00013
TG	166,76	15.858,53	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,037	0,00000
TP	889,30	84.572,17	0,80	0,89	0,94	0,06	0,051774	0,00	0,034	0,00010
R	1.959,19									
AC	31.570,32									
AP	1.058.352,98									
Iu	62.487,89									
Co	5.255,34									
Im	2.543,14									
Re	14.894,18									
Água	63.682,87									
VS	1.480,42									
Total	6.368.227,95					136,07		10,85		0,20154

TABELA B.4 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Amazônia, utilizando o produto *Anomalia Termal*.

Classe	A (ha)	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
AA	145.800	12.378.854	0,70	0,50	0,88	3,81	0,081419	0,31	0,01700	0,00528
AB	926.800	68.310.933	0,70	0,50	0,88	21,04	0,081419	1,71	0,01700	0,02912
AS	4.136.900	343.182.787	0,70	0,50	0,88	105,70	0,081419	8,61	0,01700	0,14630
CB	7.800	561.834	0,70	0,50	0,90	0,18	0,081419	0,01	0,02400	0,00035
CS	22.100	1.591.863	0,70	0,50	0,90	0,50	0,081419	0,04	0,02400	0,00098
DA	106.700	9.417.851	0,70	0,50	0,88	2,90	0,081419	0,24	0,01700	0,00401
DB	1.041.800	92.508.391	0,70	0,50	0,88	28,49	0,081419	2,32	0,01700	0,03944
DM	1.000	76.710	0,70	0,50	0,88	0,02	0,081419	0,00	0,01700	0,00003
DS	2.966.800	269.867.967	0,70	0,50	0,88	83,12	0,081419	6,77	0,01700	0,11505
FA	23.500	1.408.355	0,70	0,50	0,90	0,44	0,081419	0,04	0,02400	0,00087
FB	81.800	4.902.274	0,70	0,50	0,90	1,54	0,081419	0,13	0,02400	0,00302
FS	2.399.500	142.924.967	0,70	0,50	0,90	45,02	0,081419	3,67	0,02400	0,08797
LA	2.900	237.043	0,70	0,50	0,98	0,08	0,081419	0,01	0,02900	0,00019
LB	2.700	238.977	0,70	0,50	0,98	0,08	0,081419	0,01	0,03000	0,00020
LD	4.200	312.107	0,70	0,50	0,98	0,11	0,081419	0,01	0,02900	0,00025
LG	6.400	672.284	0,05	0,95	0,96	0,03	0,039916	0,00	0,03700	0,00005
LO	5.500	406.615	0,70	0,50	0,98	0,14	0,081419	0,01	0,01700	0,00019
PA	181.000	21.714.333	0,05	0,95	0,96	0,99	0,039916	0,04	0,03700	0,00146
PF	9.200	1.275.212	0,70	0,50	0,91	0,41	0,069561	0,03	0,02400	0,00068
RM	7.900	656.332	0,70	0,50	0,90	0,21	0,081419	0,02	0,01700	0,00029
SA	201.900	12.973.413	0,80	0,89	0,93	8,59	0,057703	0,50	0,03000	0,01487
SD	497.300	28.096.055	0,80	0,89	0,88	17,60	0,081419	1,43	0,02400	0,03440
SG	56.400	5.363.640	0,05	0,95	0,96	0,24	0,039916	0,01	0,03700	0,00036
SP	235.000	22.609.678	0,70	0,89	0,94	13,24	0,051774	0,69	0,03400	0,02331
TD	8.500	509.660	0,80	0,89	0,88	0,32	0,081419	0,03	0,02400	0,00062
TG	100	9.510	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,03700	0,00000
TP	2.600	247.260	0,80	0,89	0,94	0,17	0,051774	0,01	0,03400	0,00029
R	3.600									
AC	89.700									
AP	1.669.800									
Iu	107.100									
Co	31.800									
Im	7.300									
Re	4.100									
Água	39.200									
VS	4.500									
Total	15.039.200					334,99		26,62		0,50958

TABELA B.5 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Cerrado, utilizando o produto *Mapeamento de Cicatrizes de Queimada*.

Classe	A (ha)	BC ^a	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
As	109.568,75	119,73	13.118.666,44	0,70	0,50	0,88	4,04	0,081419	0,33	0,01700	0,00559
Da	2.000,00	118,22	236.440,00	0,70	0,50	0,88	0,07	0,081419	0,01	0,01700	0,00010
Ds	5.256,25	119,73	629.330,81	0,70	0,50	0,88	0,19	0,081419	0,02	0,01700	0,00027
Fa	131.418,75	152,93	20.097.869,44	0,70	0,50	0,90	6,33	0,081419	0,52	0,02400	0,01237
Fb	5.937,50	152,93	908.021,88	0,70	0,50	0,90	0,29	0,081419	0,02	0,02400	0,00056
Fs	554.887,50	152,93	84.858.945,38	0,70	0,50	0,90	26,73	0,081419	2,18	0,02400	0,05223
Pa	11.418,75	15,93	181.900,69	0,05	0,95	0,96	0,01	0,039916	0,00	0,03700	0,00001
Pf	0,00	98,40	0,00	0,70	0,50	0,91	0,00	0,069561	0,00	0,02400	0,00000
Pm	5.131,25	98,40	504.915,00	0,70	0,50	0,91	0,16	0,069561	0,01	0,02400	0,00027
Saf	1.911.687,50	15,39	29.420.870,63	0,80	0,89	0,93	19,48	0,057703	1,12	0,03000	0,03372
Sas	1.848.056,25	15,39	28.441.585,69	0,80	0,89	0,93	18,83	0,057703	1,09	0,03000	0,03260
Sd	1.296.143,75	28,67	37.160.441,31	0,80	0,80	0,88	20,93	0,081419	1,70	0,02400	0,04090
Spf	1.845.893,75	15,39	28.408.304,81	0,70	0,89	0,94	16,64	0,051774	0,86	0,03400	0,02929
Sps	1.423.925,00	15,39	21.914.205,75	0,70	0,89	0,94	12,83	0,051774	0,66	0,03400	0,02259
AA	3.481,25	118,22	411.553,38	0,70	0,50	0,88	0,13	0,081419	0,01	0,01700	0,00018
CS	70.193,75	152,93	10.734.730,19	0,70	0,50	0,90	3,38	0,081419	0,28	0,02400	0,00661
Sgf	275.937,50	15,39	4.246.678,13	0,05	0,95	0,96	0,19	0,039916	0,01	0,03700	0,00029
Sgs	321.675,00	15,39	4.950.578,25	0,05	0,95	0,96	0,23	0,039916	0,01	0,03700	0,00033
Tas	45.581,25	20,25	923.020,31	0,80	0,89	0,94	0,62	0,051774	0,03	0,03000	0,00096
Cm	4.225,00	152,93	646.129,25	0,70	0,50	0,90	0,20	0,081419	0,02	0,02400	0,00040
Fm	3.068,75	152,93	469.303,94	0,70	0,50	0,90	0,15	0,081419	0,01	0,02400	0,00029
Taf	5.062,50	20,25	102.515,63	0,80	0,89	0,93	0,07	0,057703	0,00	0,03000	0,00012
Td	8.212,50	33,75	277.171,88	0,80	0,80	0,88	0,16	0,081419	0,01	0,02400	0,00031
Tgs	60.287,50	15,39	927.824,63	0,05	0,95	0,96	0,04	0,039916	0,00	0,03700	0,00006
Cb	906,25	152,93	138.592,81	0,70	0,50	0,90	0,04	0,081419	0,00	0,02400	0,00009
Mm	6,25	119,73	748,31	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,01700	0,00000
Tpf	6.850,00	15,39	105.421,50	0,70	0,89	0,94	0,06	0,051774	0,00	0,03400	0,00011
Tps	25.100,00	15,39	386.289,00	0,70	0,89	0,94	0,23	0,051774	0,01	0,03400	0,00040
R	22.156,25										
Ac	329.512,50										
Ap	655.400,00										
Iu	8.237,50										
Im	56,25										
Água	20.193,75										
Vs	544.918,75										
Total	11.562.387,50						132,03		8,92		0,24063

TABELA B.6 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Cerrado, utilizando o produto MCD45.

Classe	A (ha)	BC ^a	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
As	52.475,00	119,73	6.282.831,75	0,70	0,50	0,88	1,94	0,081419	0,16	0,01700	0,00268
Da	1.387,50	118,22	164.030,25	0,70	0,50	0,88	0,05	0,081419	0,00	0,01700	0,00007
Ds	6,25	119,73	748,31	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,01700	0,00000
Fa	86.418,75	152,93	13.216.019,44	0,70	0,50	0,90	4,16	0,081419	0,34	0,02400	0,00813
Fb	550,00	152,93	84.111,50	0,70	0,50	0,90	0,03	0,081419	0,00	0,02400	0,00005
Fs	113.387,50	152,93	17.340.350,38	0,70	0,50	0,90	5,46	0,081419	0,44	0,02400	0,01067
Pa	9.462,50	15,93	150.737,63	0,05	0,95	0,96	0,01	0,039916	0,00	0,03700	0,00001
Pf	0,00	98,40	0,00	0,70	0,50	0,91	0,00	0,069561	0,00	0,02400	0,00000
Pm	3.425,00	98,40	337.020,00	0,70	0,50	0,91	0,11	0,069561	0,01	0,02400	0,00018
Saf	1.178.868,75	15,39	18.142.790,06	0,80	0,89	0,93	12,01	0,057703	0,69	0,03000	0,02080
Sas	1.266.068,75	15,39	19.484.798,06	0,80	0,89	0,93	12,90	0,057703	0,74	0,03000	0,02233
Sd	750.312,50	28,67	21.511.459,38	0,80	0,80	0,88	12,12	0,081419	0,99	0,02400	0,02367
Spf	1.573.162,50	15,39	24.210.970,88	0,70	0,89	0,94	14,18	0,051774	0,73	0,03400	0,02496
Sps	823.175,00	15,39	12.668.663,25	0,70	0,89	0,94	7,42	0,051774	0,38	0,03400	0,01306
AA	1.718,75	118,22	203.190,63	0,70	0,50	0,88	0,06	0,081419	0,01	0,01700	0,00009
CS	45.937,50	152,93	7.025.221,88	0,70	0,50	0,90	2,21	0,081419	0,18	0,02400	0,00432
Sgf	208.562,50	15,39	3.209.776,88	0,05	0,95	0,96	0,15	0,039916	0,01	0,03700	0,00022
Sgs	144.318,75	15,39	2.221.065,56	0,05	0,95	0,96	0,10	0,039916	0,00	0,03700	0,00015
Tas	50.093,75	20,25	1.014.398,44	0,80	0,89	0,94	0,68	0,051774	0,04	0,03000	0,00105
Cm	3.693,75	152,93	564.885,19	0,70	0,50	0,90	0,18	0,081419	0,01	0,02400	0,00035
Fm	4.506,25	152,93	689.140,81	0,70	0,50	0,90	0,22	0,081419	0,02	0,02400	0,00042
Taf	6.981,25	20,25	141.370,31	0,80	0,89	0,93	0,09	0,057703	0,01	0,03000	0,00016
Td	7.000,00	33,75	236.250,00	0,80	0,80	0,88	0,13	0,081419	0,01	0,02400	0,00026
Tgs	78.325,00	15,39	1.205.421,75	0,05	0,95	0,96	0,05	0,039916	0,00	0,03700	0,00008
Cb	1.950,00	152,93	298.213,50	0,70	0,50	0,90	0,09	0,081419	0,01	0,02400	0,00018
Mm	112,50	119,73	13.469,63	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,01700	0,00001
Tpf	10.231,25	15,39	157.458,94	0,70	0,89	0,94	0,09	0,051774	0,00	0,03400	0,00016
Tps	20.775,00	15,39	319.727,25	0,70	0,89	0,94	0,19	0,051774	0,01	0,03400	0,00033
R	23.881,25										
Ac	665.343,75										
Ap	489.518,75										
Iu	1.837,50										
Im	0,00										
Água	9.437,50										
Vs	96.762,50										
Total	7.729.687,50						74,64		4,80		0,13441

TABELA B.7 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Cerrado, utilizando o produto *Deteção de Área Queimada*.

Classe	A (ha)	BC ^a	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
As	20.006,25	119,73	2.395.348,31	0,70	0,50	0,88	0,74	0,081419	0,06	0,01700	0,00102
Da	6.456,25	118,22	763.257,88	0,70	0,50	0,88	0,24	0,081419	0,02	0,01700	0,00033
Ds	5.506,25	119,73	659.263,31	0,70	0,50	0,88	0,20	0,081419	0,02	0,01700	0,00028
Fa	39.862,50	152,93	6.096.172,13	0,70	0,50	0,90	1,92	0,081419	0,16	0,02400	0,00375
Fb	812,50	152,93	124.255,63	0,70	0,50	0,90	0,04	0,081419	0,00	0,02400	0,00008
Fs	245.843,75	152,93	37.596.884,69	0,70	0,50	0,90	11,84	0,081419	0,96	0,02400	0,02314
Pa	4.168,75	15,93	66.408,19	0,05	0,95	0,96	0,00	0,039916	0,00	0,03700	0,00000
Pf	100,00	98,40	9.840,00	0,70	0,50	0,91	0,00	0,069561	0,00	0,02400	0,00001
Pm	14.737,50	98,40	1.450.170,00	0,70	0,50	0,91	0,46	0,069561	0,03	0,02400	0,00077
Saf	347.768,75	15,39	5.352.161,06	0,80	0,89	0,93	3,54	0,057703	0,20	0,03000	0,00613
Sas	314.450,00	15,39	4.839.385,50	0,80	0,89	0,93	3,20	0,057703	0,18	0,03000	0,00555
Sd	265.600,00	28,67	7.614.752,00	0,80	0,80	0,88	4,29	0,081419	0,35	0,02400	0,00838
Spf	267.156,25	15,93	4.255.799,06	0,70	0,89	0,94	2,49	0,051774	0,13	0,03400	0,00439
Sps	144.562,50	15,93	2.302.880,63	0,70	0,89	0,94	1,35	0,051774	0,07	0,03400	0,00237
AA	431,25	118,22	50.982,38	0,70	0,50	0,88	0,02	0,081419	0,00	0,01700	0,00002
CS	22.775,00	152,93	3.482.980,75	0,70	0,50	0,90	1,10	0,081419	0,09	0,02400	0,00214
Sgf	50.837,50	15,93	809.841,38	0,05	0,95	0,96	0,04	0,039916	0,00	0,03700	0,00005
Sgs	39.718,75	15,93	632.719,69	0,05	0,95	0,96	0,03	0,039916	0,00	0,03700	0,00004
Tas	18.762,50	20,25	379.940,63	0,80	0,89	0,94	0,25	0,051774	0,01	0,03000	0,00039
Cm	2.693,75	152,93	411.955,19	0,70	0,50	0,90	0,13	0,081419	0,01	0,02400	0,00025
Fm	3.668,75	152,93	561.061,94	0,70	0,50	0,90	0,18	0,081419	0,01	0,02400	0,00035
Taf	7.837,50	20,25	158.709,38	0,80	0,89	0,93	0,11	0,057703	0,01	0,03000	0,00018
Td	2.387,50	33,75	80.578,13	0,80	0,80	0,88	0,05	0,081419	0,00	0,02400	0,00009
Tgs	12.712,50	15,93	202.510,13	0,05	0,95	0,96	0,01	0,039916	0,00	0,03700	0,00001
Cb	737,50	152,93	112.785,88	0,70	0,50	0,90	0,04	0,081419	0,00	0,02400	0,00007
Mm	100,00	119,73	11.973,00	0,70	0,50	0,88	0,00	0,081419	0,00	0,01700	0,00001
Tpf	1.862,50	15,93	29.669,63	0,70	0,89	0,94	0,02	0,051774	0,00	0,03400	0,00003
Tps	7.768,75	15,93	123.756,19	0,70	0,89	0,94	0,07	0,051774	0,00	0,03400	0,00013
R	15.456,25										
Ac	74.525,00										
Ap	299.081,25										
Iu	3.031,25										
Im	0,00										
Água	21.518,75										
Vs	330.456,25										
Total	2.593.393,75						32,35		2,34		0,05998

TABELA B.8 Estimativa de emissões atmosféricas brutas (CO₂, CO e NO_x) para o bioma Cerrado, utilizando o produto *Anomalia Termal*.

Classe	A (ha)	BC ^a	A x BC ^a	FBV ^b	E ^c	EC ^d	M(CO ₂) (Tg/ano)	RECO ^d	M(CO) (Tg/ano)	RENO _x ^e	M(NO _x) (Tg/ano)
As	82.838,00	119,73	9.918.193,74	0,70	0,50	0,88	3,05	0,08142	0,25	0,01700	0,00423
Da	22.082,00	118,22	2.610.534,04	0,70	0,50	0,88	0,80	0,08142	0,07	0,01700	0,00111
Ds	4.514,00	119,73	540.461,22	0,70	0,50	0,88	0,17	0,08142	0,01	0,01700	0,00023
Fa	107.970,00	152,93	16.511.852,10	0,70	0,50	0,90	5,20	0,08142	0,42	0,02400	0,01016
Fb	1.464,00	152,93	223.889,52	0,70	0,50	0,90	0,07	0,08142	0,01	0,02400	0,00014
Fs	620.858,00	152,93	94.947.813,94	0,70	0,50	0,90	29,91	0,08142	2,44	0,02400	0,05844
Pa	9.394,00	15,93	149.646,42	0,05	0,95	0,96	0,01	0,03992	0,00	0,03700	0,00001
Pf	732,00	98,40	72.028,80	0,70	0,50	0,91	0,02	0,06956	0,00	0,02400	0,00004
Pm	24.522,00	98,40	2.412.964,80	0,70	0,50	0,91	0,77	0,06956	0,05	0,02400	0,00128
Saf	1.254.526,00	15,39	19.307.155,14	0,80	0,89	0,93	12,78	0,0577	0,74	0,03000	0,02213
Sas	958.676,00	15,39	14.754.023,64	0,80	0,89	0,93	9,77	0,0577	0,56	0,03000	0,01691
Sd	790.560,00	28,67	22.665.355,20	0,80	0,80	0,88	12,77	0,08142	1,04	0,02400	0,02494
Spf	915.122,00	15,39	14.083.727,58	0,70	0,89	0,94	8,25	0,05177	0,43	0,03400	0,01452
Sps	550.708,00	15,39	8.475.396,12	0,70	0,89	0,94	4,96	0,05177	0,26	0,03400	0,00874
Aa	1.342,00	118,22	158.651,24	0,70	0,50	0,88	0,05	0,08142	0,00	0,01700	0,00007
Cs	73.444,00	152,93	11.231.790,92	0,70	0,50	0,90	3,54	0,08142	0,29	0,02400	0,00691
Sgf	162.748,00	15,39	2.504.691,72	0,05	0,95	0,96	0,11	0,03992	0,00	0,03700	0,00017
Sgs	208.742,00	15,39	3.212.539,38	0,05	0,95	0,96	0,15	0,03992	0,01	0,03700	0,00022
Tas	44.652,00	20,25	904.203,00	0,80	0,89	0,94	0,61	0,05177	0,03	0,03000	0,00094
Cm	6.466,00	152,93	988.845,38	0,70	0,50	0,90	0,31	0,08142	0,03	0,02400	0,00061
Fm	11.102,00	152,93	1.697.828,86	0,70	0,50	0,90	0,53	0,08142	0,04	0,02400	0,00105
Taf	14.030,00	20,25	284.107,50	0,80	0,89	0,93	0,19	0,0577	0,01	0,03000	0,00033
Td	5.856,00	33,75	197.640,00	0,80	0,80	0,88	0,11	0,08142	0,01	0,02400	0,00022
Tgs	48.922,00	15,39	752.909,58	0,05	0,95	0,96	0,03	0,03992	0,00	0,03700	0,00005
Cb	1.830,00	152,93	279.861,90	0,70	0,50	0,90	0,09	0,08142	0,01	0,02400	0,00017
Mm	488,00	119,73	58.428,24	0,70	0,50	0,88	0,02	0,08142	0,00	0,01700	0,00002
Tpf	10.614,00	15,39	163.349,46	0,70	0,89	0,94	0,10	0,05177	0,00	0,03400	0,00017
Tps	25.376,00	15,39	390.536,64	0,70	0,89	0,94	0,23	0,05177	0,01	0,03400	0,00040
R	77.714,00										
Ac	618.418,00										
Ap	951.356,00										
Iu	19.276,00										
Im	0,00										
Água	10.614,00										
Vs	341.478,00										
Total	7.978.434,00						94,60		6,72		0,17421