



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

FERNANDO MOREIRA DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DAS ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA CERRADO:
PROPOSIÇÕES PARA O MONITORAMENTO E CONSERVAÇÃO**

GOIÂNIA - GO

2015

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: Dissertação Tese

2. Identificação da Tese ou Dissertação

| | | | |
|---|--|--------|--------------------------|
| Autor (a): | Fernando Moreira de Araújo | | |
| E-mail: | fernandomsbl@gmail.com | | |
| Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não | | | |
| Vínculo empregatício do autor | Universidade Federal de Goiás | | |
| Agência de fomento: | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior | Sigla: | CAPES |
| País: | Brasil | UF:GO | CNPJ: 08.156.102/0001-02 |
| Título: | Avaliação da Área queimadas no Bioma Cerrado: proposições para o monitoramento e conversação | | |
| Palavras-chave: | Área Queimada. Cerrado. MODIS MCD45A1. Recorrência. | | |
| Título em outra língua: | Burned Areas of Assessment in Cerrado Biome: Proposals for Monitoring and Conservation | | |
| Palavras-chave em outra língua: | Burned Area. Cerrado. MODIS MCD45A1. Recurrence | | |
| Área de concentração: | Estrutura e Dinâmica Ambiental | | |
| Data defesa: (dd/mm/aaaa) | 03/03/2015 | | |
| Programa de Pós-Graduação: | Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais | | |
| Orientador (a): | Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Júnior | | |
| E-mail: | lapig.ufg@gmail.com | | |

3. Informações de acesso ao documento:

Liberação para disponibilização?¹ total parcial

Em caso de disponibilização parcial, assinale as permissões:

Capítulos. Especifique: _____
 Outras restrições: _____

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O Sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Data: 16 / 10 / 2015

Assinatura do (a) autor (a)

¹ Em caso de restrição, esta poderá ser mantida por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Todo resumo e metadados ficarão sempre disponibilizados.

FERNANDO MOREIRA DE ARAÚJO

**AVALIAÇÃO DAS ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA CERRADO: PROPOSIÇÕES
PARA O MONITORAMENTO E CONSERVAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB), da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior.

GOIÂNIA - GO

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Araújo, Fernando Moreira

As Áreas Queimadas no Bioma Cerrado: Proposições para o
Monitoramento e Conservação [manuscrito] / Fernando Moreira
Araújo. - 2015.

CXLII, 142 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Júnior.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Pró-reitoria de Pós
graduação (PRPG) , Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Goiânia, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui lista de figuras, lista de tabelas.

1. Área Queimada. 2. Cerrado. 3. MODIS MCD45A1. 4.
Recorrência. I. Ferreira Júnior, Laerte Guimarães , orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

1. As Instituições que viabilizaram essa pesquisa de doutorado: Universidade Federal de Goiás (UFG), Doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB/PRPPG), Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de Doutorado.
2. Agradeço de forma bastante especial ao Dr. Laerte Guimarães Ferreira Jr., orientador desta tese, e em especial pela amizade, confiança, orientação, incentivo a realização desta pesquisa, bem como pelas discussões produtivas e dedicação nos momentos necessários, contribuindo com sua experiência e conhecimento. Também agradeço por todas as oportunidades de crescimento profissional, como a participação no IGARSS 2014.
3. Ao professor e coordenador/CIAMB Dr. Fausto Miziara, muito Obrigado!
4. Aos professores Dr. Paulo de Marco Júnior e Dr. Nilson Clementino Ferreira pelas considerações realizadas durante a banca de qualificação dessa pesquisa.
5. Aos professores e servidores da secretária do CIAMB, todos muito atenciosos.
6. Aos companheiros de LAPIG, em especial a Arielle Elias Arantes.
7. Aos meus colegas de CIAMB, Karina Dias e Silas Pereira, muito obrigado pelos momentos de amizade e alegria. O tempo voa!!!
8. A minha querida e amada Janete Rêgo Silva, obrigado pelo imenso apoio nesses 4 anos de doutoramento.
9. Aos meus pais, Umberto Araújo e Lúcia Moreira!
10. A todos que contribuíram diretamente e indiretamente a esta pesquisa, com discussões e ideias/apontamentos.

TRAJETÓRIA ACADÊMICA-PROFISSIONAL

Entre 2005 - 2008 cursei o bacharelado em Geografia pelo Instituto de Estudos Sócio-Ambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás (UFG), em Goiânia. No período entre 2006 e 2007 constituí o quadro de bolsistas e monitores da graduação em Geografia do IESA, especificamente para a disciplina de geologia geral. Ainda, em 2007, iniciei as minhas atividades de estagiário/bolsista no Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) com suporte financeiro da Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) sob orientação do coordenador Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira.

Entre março de 2009 a dezembro de 2010 cursei o mestrado em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) do IESA/UFG, área de concentração *Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica*, com suporte financeiro do CNPQ. O objeto de estudo durante o desenvolvimento do mestrado foi o fenômeno das queimadas no bioma Cerrado. Também, nesse período, coordenei, sob orientação do coordenador do LAPIG e pesquisadores da EMBRAPA, o processo de atualização do mapeamento da pastagem cultivada proposto pelo PROBIO Cerrado (ano base de 2002) para o ano de 2008 utilizando imagens orbitais de resolução média (LANDSAT TM), vinculado ao projeto de *Mapeamento e Caracterização Biofísica de Áreas de Pastagens Cultivadas no Bioma Cerrado*.

Em 2011 iniciei o processo de doutoramento pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB) da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás (PRPPG – UFG) – área de concentração *Estrutura e Dinâmica Ambiental*, com suporte financeiro da CAPES. Em dezembro de 2012, no âmbito do doutorado e representando o LAPIG, participei do workshop “*Severidade de Queimadas e respostas ecossistêmicas: implicações para a conservação e manejo da biodiversidade em ecossistemas de savanas*”, no qual participaram pesquisadores da UNB, IBAMA (Prevfogo), INPE e de instituições internacionais da Austrália (*Bushfires NT Research*), Alemanha (*Remote Sensing Solutions, GmbH*), Canadá (*Canadian Forest Service*), e Estados Unidos (*Forest Rangeland and Fire Sciences*). Atualmente integro o grupo de pesquisadores associados do LAPIG.

Em fevereiro de 2014 passei a integrar, como consultor, a iniciativa Cerrado Sustentável/TerraClass Cerrado do Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Cerrado iniciativa que visa fornecer o mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal remanescente para o Cerrado com base em imagens Landsat 8 OLI de 2013 (escala de

mapeamento de 1:250.000). Essa iniciativa tem a participação em conjunto do IBAMA/CSR, INPE, Embrapa monitoramento por satélite e Embrapa informática agropecuária. A equipe do LAPIG-UFG ficou responsável por fornecer o FTP para armazenamento e compartilhamento dos dados do projeto, como as imagens Landsat OLI (121 cenas – limite útil) em valores de reflectância aparente e o segmento base (i.e. segmentação de cada imagem Landsat) a ser utilizado entre os grupos para a classificação das diferentes classes de uso da terra e remanescente para composição do mapeamento.

RESUMO

Araújo, Fernando Moreira. **Avaliação das Áreas Queimadas no Bioma Cerrado: Proposições para o Monitoramento e Conservação**. 2015. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa em Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2015.

O fogo é um importante fenômeno ecológico e de perturbação ambiental no bioma Cerrado, o qual sofre influência de fatores climáticos, ecológicos, culturais e econômicos. A queima da biomassa promove a alteração da estrutura e composição do solo, acelera os processos erosivos e de sedimentação, promove a germinação de sementes, renovação das gramíneas e libera grandes quantidades de gases traços e aerossóis para a atmosfera. A presente pesquisa busca entender os padrões de localização e de recorrência das áreas queimadas para o bioma Cerrado, segundo suas diferentes regiões geográficas a partir das classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente e variáveis climáticas. Em específico busca-se avaliar quantitativamente a performance do produto MODIS MCD45A1 para o bioma Cerrado, de acordo com as distintas classes de uso e cobertura da terra em função da paisagem com base em 130 polígonos de áreas queimadas e 4 imagens orbitais de resolução espacial média, ambas amostras localizadas no mês de setembro. Outro interesse é de analisar os padrões espaciais e temporais da distribuição das áreas queimadas no território brasileiro considerando os limites territoriais dos biomas brasileiros e seus principais tipos de cobertura vegetal natural e antrópica (base PROBIO MMA), para tanto foi considerado os limites territoriais dos 6 biomas brasileiros (i.e. Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal). Por fim, avaliar os padrões (espaciais e temporais) e as frequências de recorrências das queimadas no Cerrado, com base em áreas queimadas $\geq 2\text{km}^2$ e interseções $\geq 50\%$ para as recorrências, bem como entender como a sazonalidade e variação interanual climática a partir dos dados de índice da vegetação (EVI), precipitação (TRMM) e evapotranspiração (MOD16) determinam os diferentes regimes de queima das várias classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente, para tanto foram analisados quatro grupos de recorrências com recortes temporais distintos. Os polígonos do produto MCD45A1 (setembro) apresentaram boa relação com o mapeamento de referência (base Landsat) ($r^2 = 0.92$) e também com os focos de calor (MOD14 e MYD14 - dados mensais) ($r^2 = 0.89$). O erro de omissão encontrado é alto, mas este está associado aos padrões de estrutura da paisagem, como o encontrado para as quatro imagens de referência. O Produto MCD45A1 mesmo apresentando limitações espaciais e temporais promove mapeamento com série temporal consistente, fornecendo entendimento do comportamento e os impactos do fogo sobre a paisagem do Cerrado. Entre os biomas brasileiros, o Cerrado é o que apresenta o maior registro de queimadas entre 2002 a 2010 (73%), seguido do Amazônico (14%), enquanto 81% dos registros das áreas queimadas ocorrem sobre as classes de cobertura vegetal remanescente. O registro das recorrências de queimadas no Cerrado se concentra sobre as classes remanescentes, 59%, já a frequência da recorrência apresenta maior proporção até 3 vezes para o período de 2000 a 2013. Para os quatro grupos de recorrências analisados, após o primeiro registro de fogo, 2002, o vigor vegetativo registra queda, principalmente após o ano de 2010, sendo em média 4% para as classes remanescentes e 3,5% para as antrópicas. A distância mínima entre os fragmentos mostra que 42% de recorrências analisadas estão entre 1 a 2 quilômetros, conferindo maior concentração espacial.

Palavras-Chave: Área Queimada. Cerrado. MODIS MCD45A1. Recorrência.

ABSTRACT

Araújo, Fernando Moreira. **Avaliação das Áreas Queimadas no Bioma Cerrado: Proposições para o Monitoramento e Conservação**. 2015. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Programa em Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2015.

Fire is an important ecological and environmental disturbance phenomenon in the Cerrado biome, which is influenced by climatic, ecological, cultural and economic factors. Burning biomass promotes change in the structure and composition of the soil, accelerates the erosion and sedimentation processes, promotes seed germination, renewal of grasses and releases large amounts of trace gases and aerosols into the atmosphere. This research seeks to understand the location patterns and the recurrence of burned areas to the Cerrado biome according to their different geographical regions from the land cover and land use class, and climatic variables. In particular, we evaluated quantitatively the performance of the MODIS MCD45A1 product for the Cerrado biome, in accordance with the different land use and land cover classes depending on the landscape, using as reference 130 randomly selected burned area polygons, and four randomly selected medium resolution orbital images, both from the month of September. In addition, we analyzed the burned areas spatial and temporal patterns in Brazil, considering both the territorial limits of the six biomes (i.e. Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa and Pantanal) and their main land cover and land use classes (PROBIO MMA). At last, for burned areas greater than 2 km², we evaluated their patterns (spatial and temporal) and frequency of recurrence (burned areas that intersect more than 50%), as well as their interannual and seasonal climatic variations from vegetation index (EVI), precipitation (TRMM) and evapotranspiration (MOD16) images. These images were analyzed in association with the four groups of recurrence (burned areas with recurrence every four years) to determine the different burning regimes and the pre and post burning vegetation responses. The MCD45A1 polygons (September) had good relationship with the reference mapping (Landsat base) ($r^2 = 0.92$) and also with the hotspots (MOD14 and MYD14 - monthly data) ($r^2 = 0.89$). The omission error found is high, but this is associated with landscape structure patterns, as found for the four reference images. The Product MCD45A1 even with spatial and temporal limitations promotes temporal mapping consistency and provides understanding the behavior and impacts of the burned on the Cerrado landscape. Among the Brazilian biomes, Cerrado is the one with the highest record of fires between 2002 and 2010 (73%), followed by Amazon (14%), while 81% of the records of the burned areas occur on the remnant vegetation cover class. The records of the burning recurrences in the Cerrado focus on the remnant class, 59% whereas the frequency of recurrence presented a higher proportion up to 3 times for the period 2000-2013. For the four groups of recurrences analyzed after the first fire record, 2002, the vegetative vigor records declines, especially after 2010, on average 4% for the remnant classes and 3.5% for the anthropogenic. The minimum distance between the fragments presents that 42% of recurrences analyzed are between 1-2 kilometers, providing greatest spatial concentration.

Key word: Burned area. Cerrado. MODIS MCD45A1. Recurrence.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 3.1 | Location of September burned area (2000 to 2012) (A) and of the 130 randomly selected MCD45A1 burned polygons overlaid by the respective Landsat TM, ETM+ and ResourceSat 1 LISS3 scenes utilized for the validation of MODIS MCD45A1 product (B)..... | 43 |
| Figura 3.2 | Landsat based manual delineation (in green) of a burned area (A), according to the adjacent MCD45A1 polygons criterion (dashed polygons in green) (B)..... | 45 |
| Figura 3.3 | Schematic flowchart depicting the main steps and approaches followed in this study | 46 |
| Figura 3.4 | Cerrado burned area (whole year and September only) registered by the MCD45A1 product (A), total monthly distribution (2000 to 2012 period) plotted against TRMM average monthly precipitation (B), and total monthly distribution of MOD14 and MYD14 active fires (C) | 47 |
| Figura 3.5 | Local MODIS MCD45A1 commission and omission errors relative to the TM, ETM+, and LISS3 reference scene..... | 48 |
| Figura 3.6 | Relationship between burned area identified by the MCD45A1 and the reference images (130 randomly selected polygons) | 48 |
| Figura 3.7 | Spatial distribution of burned area, according to the reference mapping: orbital images LISS3 329/82 (1), TM 222/67 (2), TM 221/70 (3), and. TM 221/71 (4) (yellow limits) and MCD45A1 detections (red polygons). | 50 |
| Figura 3.8 | Hotspot intersection (active fires) with the reference mapping and MCD45A1 burned areas (with – WB - and without – NB - buffer) | 51 |
| Figura 3.9 | Examples of the MCD45A1 product accuracy and precision relative to the reference mapping: orbital images LISS3 329/82 (A), TM 221/71 (B), TM 221/70 (C), and TM 222/67 (D) | 54 |
| Figura 4.1 | Spatial distribution of the total burned area (2002–2010) within the six Brazilian biomes, relative to the major land cover and land use classes (PROBIO) (Arc of deforestation limits provided by the Brazilian Environmental Agency (IBAMA))..... | 65 |
| Figura 4.2 | Schematic flowchart depicting the main steps and approaches followed in this study | 67 |
| Figura 4.3 | Distribution of the burned areas in the Brazilian biomes, between 2002 and 2010 | 68 |
| Figura 4.4 | Distribution of thermal anomalies (fire hotspots) in the Brazilian biomes, between 2002 and 2010.. | 69 |
| Figura 4.5 | (A) Total burned area (MCD45A1); and (B) fire hotspots (MOD14 and MYD14), between 2002 and 2010, according to the Brazilian municipalities. | 70 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.6 | Distribution of El Niño and La Niña events between 2002 and 2010 (ENSO = El Niño Southern Oscillation) | 70 |
| Figura 4.7 | Annual mean precipitation anomalies (2002 to 2010) in the Brazilian biomes | 71 |
| Figura 4.8 | Distribution of monthly mean precipitation (2002 to 2010) in the Brazilian biomes (TRMM data) | 72 |
| Figura 4.9 | Distribution and proportion of burned areas in the Brazilian territory, between 2002 and 2010, according to the remnant vegetation and major land use classes. | 73 |
| Figura 4.10 | Distribution of burned areas (%), according to the major land cover classes, in the six Brazilian biomes (2002 to 2010): (a) Pampa; (b) Caatinga; (c) Atlantic Forest; (d) Pantanal; (e) Amazon, and (f) Cerrado | 75 |
| Figura 5.1 | Localização espacial dos 2.400 polígonos de recorrências de cicatrizes de queimadas (intersecção $\geq 50\%$) sobre o bioma Cerrado | 87 |
| Figura 5.2 | Distribuição das áreas queimadas interseccionadas (total) e $\geq 50\%$ em relação ao ano de 2002 (base) e a respectiva proporção das intersecções $\geq 50\%$ (linha) referente ao total interseccionado entre 2003 a 2013 para o bioma Cerrado..... | 89 |
| Figura 5.3 | Distribuição da frequência de recorrência das áreas queimadas no bioma Cerrado, segundo o mapeamento base (2.400 amostras). | 91 |
| Figura 5.4 | Distâncias entre as áreas com queimadas recorrentes (em relação às detecções de 2002), conforme a análise de distância do vizinho mais próximo | 92 |
| Figura 5.5 | Distribuição dos valores de EVI médio para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada, conforme os quatro grupos de recorrências (A, B, C e D) | 93 |
| Figura 5.6 | Distribuição dos valores médios de precipitação (PPT) e evapotranspiração (ET) para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada, conforme os quatro grupos de recorrência (A, B, C e D)..... | 95 |
| Figura 5.7 | Distribuição dos valores médios de precipitação para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente | 96 |
| Figura 5.8 | Distribuição dos valores médios de evapotranspiração para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente | 97 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 5.9 | Distribuição dos valores médios índice de vegetação (EVI) para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente | 99 |
| Figura 5.10 | Distribuição da recorrência de áreas queimadas (entre 2003 a 2013), a partir do mapeamento base de 2002, conforme as classes de uso da terra e cobertura remanescente | 100 |
| Figura 5.11 | Distribuição da frequência de recorrência (2003 a 2013) das áreas queimadas segundo as principais classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente encontradas no bioma Cerrado..... | 102 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 2.1 | Principais sistemas orbitais para detecção e monitoramento de ocorrência de incêndios | 24 |
| Tabela 2.2 | Produtos MODIS para aplicações terrestres | 28 |
| Tabela 3.1 | TM, ETM+, and LISS3 orbital images utilized for the validation of the MODIS MCD45A1 over the Cerrado biome (2000–2012).. | 44 |
| Tabela 3.2 | Landsat TM and ResourceSat LISS images utilized for the assessment of the MCD45A1 commission and omission errors | 45 |
| Tabela 3.3 | MODIS MCD45A1 burned area mapping and respective omission errors relative to the reference mapping (R.M) | 49 |
| Tabela 4.1 | Annual extension of the total burned area (in 1,000 km ²) in the Brazilian territory (biomes) for the 2002–2010 period..... | 67 |
| Tabela 5.1 | Distribuição das amostras de recorrência de queimadas de acordo com as classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente para o bioma Cerrado..... | 88 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| | Apresentação | 15 |
| 1 | Introdução | 17 |
| 1.1 | Questões investigativas | 18 |
| 1.2 | Hipóteses | 19 |
| 1.3 | Objetivo geral | 19 |
| 1.3.1 | Objetivos específicos | 20 |
| 2 | Revisão Teórica | 20 |
| 2.1 | O fogo e as suas consequências | 20 |
| 2.2 | Uso de dados satelitários para o monitoramento das áreas queimadas | 23 |
| 2.3 | Produto MODIS MCD45A1 área queimada | 30 |
| 2.4 | Produtos de Anomalias Termais (MOD14 e MYD14) | 32 |
| 2.5 | Referências | 33 |
| 3 | SATELLITE-BASED AUTOMATED BURNED ÁREA DETECTION: A PERFORMANCE ASSESSMENT OF THE MODIS MCD45A1 IN THE BRAZILIAN SAVANNA | 40 |
| 3.1 | Introdução..... | 40 |
| 3.2 | Materiais e Métodos | 42 |
| 3.3 | Resultados | 47 |
| 3.4 | Discussão | 51 |
| 3.5 | Conclusões..... | 55 |
| 3.6 | Referências | 56 |
| 4 | DISTRIBUTION PATTERNS OF BURNED AREAS IN THE BRAZILIAN BIOMES: AN ANALYSIS BASED ON SATELLITE DATA FOR THE 2002-2010 PERIOD | 62 |
| 4.1 | Introdução..... | 62 |
| 4.2 | Materiais e Métodos | 64 |
| 4.3 | Resultados e Discussão | 67 |
| 4.3.1 | Áreas queimadas e cobertura do uso da terra..... | 73 |
| 4.4 | Conclusões..... | 76 |
| 4.5 | Referências | 77 |
| 5 | RECORRÊNCIA DAS ÁREAS QUEIMADAS NO BIOMA CERRADO: PADRÕES BIOFÍSICOS E ESPAÇO-TEMPORAIS | 84 |
| 5.1 | Introdução..... | 84 |
| 5.2 | Materiais e Métodos | 86 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3 | Resultados | 88 |
| 5.3.1 | Distribuição espacial da recorrência de queimadas..... | 88 |
| 5.3.2 | Análise do comportamento temporal e biofísico das áreas queimadas. | 92 |
| 5.3.2.1 | Índice de Vegetação Realçado (EVI) | 92 |
| 5.3.2.2 | Evapotranspiração (ET) e Precipitação PPT)..... | 94 |
| 5.3.2.3 | Uso da terra e cobertura vegetal remanescente | 95 |
| 5.3.3 | Discussão | 100 |
| 5.4 | Conclusões | 104 |
| 5.5 | Referências | 105 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 110 |
| | APÊNDICE A: Análise da ocorrência das morbidades respiratórias e sua relação com a incidência de áreas queimadas para o Estado de Goiás | 112 |
| | APÊNDICE B: Distribuição e recorrência de queimadas nas áreas de pastagens cultivadas no Brasil..... | 132 |

APRESENTAÇÃO

A presente tese de doutorado compreende artigos científicos e apêndices, e está organizada da seguinte forma:

1) *Introdução*, composta de uma descrição geral do tema tratado na tese, i. e. a problematização, apresentada em forma de questões científicas, bem como as hipóteses e os objetivos;

2) *Referencial teórico*, composto pelos conceitos básicos para a composição geral da tese;

3) *Desenvolvimento*, que compreende três artigos, resultados diretamente da pesquisa e correlacionados às questões científicas centrais;

4) *Considerações gerais*, onde são integrados todos os resultados obtidos no desenvolvimento da tese;

5) *Apêndices*: A) artigo intitulado “*Análise da ocorrência das morbidades respiratórias e sua relação com a incidência de áreas queimadas para o Estado de Goiás*” publicado na revista Boletim Goiano de Geografia (BGG) em 2014; B) A análise “*Distribuição e recorrência de queimadas nas áreas de pastagens cultivadas do Brasil*” integra o documento produzido no âmbito do projeto *Radiografia das Pastagens do Brasil*, como também insere-se no escopo do projeto *Caracterização das Pastagens do Cerrado-Pantanal*, parceria do LAPIG com o WWF-Brasil.

Os procedimentos metodológicos, os resultados e as discussões constam nos artigos apresentados nessa tese.

O primeiro artigo, intitulado “*Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savana*”², apresenta os resultados da acuidade do produto MODIS MCD45A1 (500 m) para a região do bioma Cerrado entre 2002 a 2012 por meio da análise de 130 amostras de cicatrizes de queimada e imagens de alta resolução espacial (Landsat TM e ResouceSat1), selecionadas aleatoriamente.

O segundo artigo, “*Distribution Patterns of Burned Areas in the Brazilian Biomes: An Analysis Based on Satellite Data for the 2002–2010 Period*”³, apresenta o resultado dos padrões de distribuição das áreas queimadas entre os biomas brasileiros (i.e. Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal) entre 2002 a 2010, bem como a proporção destas entre as principais classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente a partir do

² Artigo publicado na revista *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (2015).

³ Artigo publicado na revista *Remote Sensing* (2012).

mapeamento proposto pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO) do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

O terceiro artigo, “*Recorrência das áreas queimadas no bioma Cerrado: padrões biofísicos e espaço-temporais*”, por sua vez, buscou compreender os padrões (espaciais e temporais) e as frequências de recorrências das queimadas para o bioma Cerrado, como também entender o impacto da sazonalidade e da variação interanual climática para os diferentes regimes de queima das diferentes classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente.

Os dois primeiros artigos já se encontram publicados, enquanto o terceiro artigo será submetido após considerações e apontamentos. O apêndice “A” refere-se ao artigo elaborado durante a disciplina de “Oficinas em Análise Ambiental”, que integra parte das atividades obrigatórias do Doutorado em Ciências Ambientais (CIAMB). O apêndice “B” diz respeito às análises de focos de calor em áreas de pastagens, realizadas no âmbito do projeto *Radiografia das Pastagens do Brasil* (fruto da parceria entre a Secretária de Assuntos Estratégicos da Presidência da República e a Universidade Federal de Goiás; para dados e análises, ver www.pastagem.org).

1. Introdução

O bioma Cerrado possui uma área de 2.039.387 km², localizando-se latitudinalmente e longitudinalmente entre as coordenadas 2°34' e 24°68'S e 41°52' e 60°10'W, respectivamente. O seu limite abrange parte de 12 estados do território brasileiro, estabelecendo uma zona de transição com quatro biomas brasileiros, “Amazônia, a Caatinga, a Mata Atlântica e o Pantanal”. Esse importante bioma possui a formação savânica mais diversa do mundo, sendo considerado um dos 34 *hotspots* da biodiversidade (Myers et al., 2000), seja pelos aspectos naturais, quanto pela intensa ocupação agropastoril que o transformou na principal fronteira de expansão agrícola do Brasil (Miziara e Ferreira, 2008; Gibbs et al., 2015).

Aliado ao desenvolvimento das atividades agropecuárias, as práticas antrópicas de uso da terra se alavancaram em detrimento da perda da cobertura vegetal natural, uma vez que, aproximadamente 37% da área total do Cerrado já foram integralmente convertidos em áreas de agricultura e de pastagem cultivada, as quais ocupam, respectivamente, 10,5% e 26,5% da área total do Cerrado (Sano et al., 2008; 2010).

Dentre as práticas de manejo do uso da terra no Cerrado está a queimada. Para esse bioma, o registro das queimadas aumentaram de forma intensificada desde o desenvolvimento da agropecuária, seja no manejo do pasto para criação de bovinos, controle de pragas e expansão agrícola (Coutinho, 1990; Riveira-lombardi, 2003). Antes da ocupação antrópica, o relâmpago (raio) foi a principal forma natural para a ocorrência de fogo no Cerrado (França, 2001a). Contudo, parte da vegetação do Cerrado está adaptada e dependente das queimadas, já que muitas espécies da flora presentes em ambientes savânicos necessitam do fogo para brotar, florescer e desenvolver as sementes (França, 2001a; 2001b).

A estação das queimadas nesse importante bioma inicia-se em maio (final da estação chuvosa) e se intensifica entre os meses de agosto e setembro (final da estação seca), período em que são registrados os menores valores de umidade relativa do ar (< 20%) e baixos níveis de precipitação pluviométrica (chuva), incidindo severamente sobre a vegetação seca (material combustível fino) (França, 2001a; Riveira-Lombardi, 2003; Eiten, 1994). As queimadas apresentam diferentes efeitos aos ambientes em que elas ocorrem, devido às distintas propriedades da biomassa (massa total, densidade, umidade, etc) durante o processo da queima vegetação, apresentando emissões de gases e materiais particulados variados em cada local registrado (Yamasoe et al., 2000; Ribeiro e Assunção, 2002).

O entendimento dos fatores biofísicos e antrópicos que contribuem para a ocorrência das queimadas incorporado ao mapeamento sistemático de grandes e pequenas queimadas irregulares na paisagem, permitirá melhorar o monitoramento e a prevenção das queimadas, gerar modelos de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs) mais acurados para o Cerrado, bem como contribuir para subsidiar políticas públicas no planejamento territorial. De acordo com o segundo Inventário Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs), de 2010, estima que 24% das emissões de CO₂ relacionados ao uso da terra (2003 e 2005) ocorreram na região do Cerrado, principalmente pelo desmatamento e por queimadas.

Para tanto, a proposta desse trabalho visa o monitoramento sistemático das áreas queimadas no bioma Cerrado, aliado ao entendimento dos principais fatores ambientais condicionantes do fogo durante a estação seca ou das queimadas (maio a outubro), com vistas a contribuição para programas de prevenção às queimadas irregulares e grandes incêndios, compreender o comportamento dos padrões de recorrência por meio dos usos antrópicos (agricultura e pastagem cultivada) condicionantes (variáveis climáticas) e o vigor vegetativo após sucessivos registros de fogo.

1.1. Questões investigativas

Diante do exposto, esta pesquisa buscou responder as seguintes questões:

- a) O produto global MODIS MCD45A1 oferece acurácia espacial e temporal para o monitoramento das áreas queimadas no bioma Cerrado?
- b) A dinâmica de registro das áreas queimadas ocorre uniformemente entre as diferentes regiões geográficas e ecossistemas do Cerrado? Qual o impacto da fragmentação da paisagem?
- c) Qual a influência da distribuição espacial e sazonal da precipitação, bem como da concentração de material combustível fino durante a estação seca?
- d) Quais são as classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente que registram as maiores recorrências de queimadas?

1.2. Hipóteses

Essas questões estão centradas nas seguintes hipóteses:

- a) Queimadas são vinculadas à disponibilidade de material combustível fino (extrato herbáceo-subarbusivo). Assim, espera-se que paisagens menos fragmentadas sejam mais suscetíveis à recorrência e severidade das queimadas;
- b) Considerando que a pastagem cultivada, a qual ocupa cerca de 30% da área do Cerrado, apresenta grande produção de biomassa no período chuvoso (outubro – abril), então a recorrência de queimadas será potencializada nestas paisagens e suas adjacências.
- c) Em ambientes savânicos, como o Cerrado brasileiro, o teor de umidade relativa do ar e do solo se constitui como um dos principais condutores para a ocorrência das queimadas por extensas áreas durante a estação seca, bem como para a sua intensidade. Assim, anomalias climáticas favorecem a recorrência do fogo, sobretudo em áreas naturais com predomínio de herbáceas.
- d) Estudos realizados no bioma Cerrado demonstram que sucessivas queimadas em curto espaço de tempo (i.e. período inferior à 3 anos), provocam sucessão de vegetação lenhosa por gramíneas (fisionomias abertas) (Bond et al, 2005), perda de macro e micronutrientes do solo, abre espaço para as espécies exóticas invasivas em relação as espécies nativas (Miranda et al., 2004), maior escoamento superficial da água decorrente da chuva, e etc; Assim, áreas com sucessivas recorrências de queimadas apresentam maior variação da evapotranspiração e produtividade primária líquida em relação as áreas que não queimaram para igual período.

1.3. Objetivo Geral

Entender os padrões de localização e de recorrência das áreas queimadas para o bioma Cerrado segundo as suas diferentes regiões geográficas a partir das classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente e variáveis climáticas.

1.3.1. Objetivos Específicos

Com vistas à validação destas hipóteses, esta pesquisa se apoiou nos seguintes objetivos principais:

- a) Avaliar quantitativamente a performance do produto MODIS MCD45A1 para o bioma Cerrado de acordo com as distintas classes de uso e cobertura da terra e em função da paisagem.
- b) Analisar os padrões espaciais e temporais da distribuição das áreas queimadas no território brasileiro considerando os limites territoriais dos biomas brasileiros e seus principais tipos de cobertura vegetal natural e antrópica.
- c) Avaliar os padrões (espaciais e temporais) e as frequências de recorrências das queimadas para o bioma Cerrado, bem como entender como a sazonalidade e variação interanual climática determinam os diferentes regimes de queima das diferentes classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente.

2. Revisão Teórica

2.1. O fogo e suas consequências

A prática de utilização do fogo no manejo das atividades antrópicas é bastante recorrente, principalmente para a agricultura e pecuária com vistas à abertura e/ou consolidação de novas áreas desmatadas. No entanto, a prática de uso do fogo para auxílio em determinadas atividades é antiga, uma vez que a utilização das queimadas na região central do território brasileiro data de aproximadamente 32.000 anos através do homem primitivo (Guidon e Delibrias, 1986). Trabalhos como o de Coutinho (1981) e Berger e Libby (1966) evidenciam que a prática das queimadas na região do Cerrado brasileiro é bastante antiga. Datações, por meio do método do C₁₄, indicam amostras de carvões vegetais com idade de 8.600 anos na região do Parque Nacional das Emas.

Na região do Brasil Central, a ocorrência de queimadas vem acontecendo de forma expressiva desde a intensificação da agropecuária nas três últimas décadas do século XX, sendo principalmente vinculada às práticas antrópicas (Riveira-Lombardi, 2003) e para o manejo do pasto (em geral para criação de bovinos) (Coutinho, 1990). Em relação ao manejo e renovação das pastagens na região do Cerrado durante período seco, a queimada é utilizada para estimular

a rebrota da forragem, pois é mais fresca e palatável para o gado (Coutinho, 1980; Krug, 2004; Pivello, 1992; 1996; Pivello e Coutinho, 1996; Ramos-Neto e Pivello, 2000).

Coutinho (1990) conclui que a expansão agrícola é outra importante atividade causadora de queimadas, pois é uma atividade controlada e incorporada ao sistema de produção industrial moderno. A utilização das queimadas no sistema agrícola ocorre, sobretudo, vinculada à retirada de resíduos de colheitas, como é o caso da palha da cana-de-açúcar (Miranda et al., 1993). Dentre outros eminentes problemas que as queimadas podem favorecer, por meio de manejos incorretos, ao meio ambiente (meio físico e biótico) estão as erosões, a compactação do solo exposto por animais e maquinário e o avanço de espécies vegetais invasoras (Zanini e Diniz, 2006). O solo sem a cobertura vegetal fica vulnerável a ação da chuva, pois favorece o escoamento superficial e a diminuição da percolação da água. A maior frequência das recorrências de queimadas também promove a degradação das pastagens e a diminuição da matéria orgânica (Zanini e Diniz, 2006).

O fogo, com alta recorrência em unidades de conservação, favorece a ocupação/substituição das espécies naturais por invasoras, isto se apresenta como fator preocupante, uma vez que estas espécies invasoras produzem grande quantidade de biomassa bastante inflamável, aumentando a intensidade do fogo durante o processo de queima da biomassa e os riscos de incêndios durante a estação seca (Pivello, 1999a; 1999b; 2006; 2008). As espécies exóticas mais comuns na região do Cerrado são *Melinis minutiflora* (capim-gordura) e *Brachiaria decumbens*, as quais são bastante resistentes aos efeitos do fogo e altamente prejudiciais ao desenvolvimento e disseminação das herbáceas naturais (Pivello, 1999a; 1999b; 2006; 2008).

Parte da vegetação do Cerrado está adaptada e dependente das queimadas (França, 2001b), já que muitas necessitam do fogo para brotar, florescer e propagar, ou seja, desenvolver as sementes, contribuindo de forma decisiva para a manutenção desse ciclo (França, 2001a; Castro-Neves, 2007; Coutinho, 1978). A dinâmica de nutrientes para as plantas do Cerrado é altamente influenciada pelas queimadas, já que estas em intervalos sucessivos de três anos são adequadas para promover a reciclagem dos nutrientes sem empobrecimento dos macronutrientes (Pivello, 1992; Pivello, 1996; Walter, 2006).

Com a queimada, um dos principais efeitos é o aumento significativo da temperatura, já que a sua intensidade depende em parte da quantidade da massa vegetal combustível e o seu teor de umidade (Guimarães, 2000). Das diferentes fitofisionomias que compõe o Cerrado, a

vegetação do estrato herbáceo é a mais afetada, representando mais de 90% do combustível consumido (Miranda et al., 2004).

A estação de focos de calor/queimadas nesse importante bioma inicia-se em maio (final do período chuvoso) e se intensifica entre os meses de agosto e setembro (final da estação seca), período que se registra os menores valores de umidade do ar (< 20%) (França, 2001a; Riveira-Lombardi, 2003; Eiten, 1994). Dados de focos de calor⁴ (i.e. comprimento de onda do termal) levantados na página do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC – INPE), informam que entre maio/2008 e maio/2009 foram detectados pelo sensor MODIS cerca de 32.001 focos no Cerrado, sendo os meses de agosto (6.749 focos) e setembro (9.808 focos) com os maiores picos de incidência, enquanto 75,6% destes estão localizados sobre as classes de vegetação remanescente (Nascimento et al., 2011).

As emissões e efeitos da queima de biomassa entre os biomas brasileiros são distintas, sendo que na região do Cerrado, dependendo da fase da combustão e da estrutura da fitofisionomia, têm-se modelos definidos de emissões. Por outro lado, em regiões de florestas tropicais, como a Amazônica, devido à diversidade e porte das espécies vegetais (árvores grossas, folhas e galhos finos, etc.) que exigem maior tempo para queimarem, fator relacionado ao período de secagem (umidade) e de queima (intensidade), torna-se complexo definir padrões de emissão (Yamasoe et al., 2000; Ribeiro e Assunção, 2002).

A partir da grande concentração de focos de calor (princípio de extensas áreas queimadas) na região central do Brasil, sobretudo nos limites do Cerrado (Pivello, 2011), a saúde pública e o meio ambiente ficam bastante comprometidos, pois a concentração de queimadas ocorre justamente no período mais seco e quente do ano (julho a setembro). As queimadas apresentam diferentes efeitos deletérios à saúde (i.e. infecções do sistema respiratório superior, asma, bronquite, etc.) e ao meio ambiente devido às distintas propriedades da biomassa (massa total, densidade, umidade, etc.) durante a queima, desse modo, as emissões de gases e partículas são bastante variadas de lugar para lugar (Yamasoe et al., 2000; Ribeiro e Assunção, 2002).

Durante a queimada ocorre a formação de vários poluentes nocivos à saúde humana, tais como material particulado em suspensão no ar (partículas finas e grossas); ácidos inorgânicos (monóxido de carbono ozônio, dióxido de nitrogênio, etc); hidrocarbonetos (benzeno), e outros (Arbex et al., 2004). Os efeitos da queima de biomassa podem ser analisados sob duas formas, ambiente fechado e aberto, sendo que para esse último, devido às grandes extensões (área) e

⁴ Dados disponibilizados gratuitamente em: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>

intensidade de ocorrência, efeitos adversos a saúde podem ser potencializados, como também a redução da fotossíntese e/ou bloqueio dos raios ultravioletas A e B, potencializando aumento das larvas de mosquitos transmissores de doenças (Arbex et al., 2004; Mims, 1997).

De fato, os sintomas respiratórios (doenças cardiorrespiratórias como asma, laringite, sinusite, etc.) são agravados durante o período seco e quente, sendo potencializados com a ocorrência das queimadas, aumento da temperatura e de partículas suspensas no ar, atingindo, sobretudo, asmáticos, crianças e idosos, aumentando consideravelmente os gastos no sistema de saúde (Mascarenhas, 2008; Arbex et al., 2004; Ribeiro, 2008).

Os efeitos das queimadas para a saúde humana atingem principalmente as populações próximas da região de queima da biomassa. No Brasil, áreas de plantio de cana-de-açúcar, como na região centro-norte do Estado de São Paulo (maior produtor de cana no país), onde a safra da cana ocorre entre maio e novembro, período com os menores índices de chuva (ar seco e quente), tem-se nestes meses os maiores índices de internações hospitalares por doenças respiratórias, chegando a aumentar as internações em três vezes em comparação ao período chuvoso (Lopes e Ribeiro, 2006; Cançado, 2003; Ribeiro, 2008).

2.2. Uso de dados satelitários para mapeamento e monitoramento das áreas queimadas

O sensoriamento remoto é uma importante ferramenta que nos permite analisar e monitorar sistematicamente mudanças ambientais ao longo de uma série histórica, permitindo, de fato, acompanhar a evolução de determinados fenômenos. Sendo assim, com auxílio do sensoriamento remoto foram desenvolvidas várias linhas de pesquisas, tal como o monitoramento de uso da terra e cobertura vegetal natural para os mais variados ecossistemas do mundo, sendo que a sua utilização operacional e sistemática pela sociedade civil ocorreu somente a partir da década de 1970 com imagens de satélite, tais como LANDSAT (Jensen, 2009).

Juntamente com o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), os quais estão ligados aos princípios da cartografia, o sensoriamento remoto possui um papel fundamental no mapeamento dos fenômenos geográficos, devido à sua possibilidade de produção e análise de séries temporais consistentes e acuidade dos dados obtidos. Com o avanço tecnológico dos sensores orbitais, aliado com as geotecnologias, tornou-se possível verificar como as ações humanas moldam o meio ambiente e, concomitantemente, embasar melhor a

tomada de decisões pelo poder público, as quais dependem do levantamento e análise de dados espaciais (cobertura vegetal, ocupação antrópica, etc.) para auxílio na formulação de mitigações.

Em relação às queimadas, o monitoramento sistemático se torna imprescindível para ações de prevenção e combate à incêndios, assim como, para traçar metas no planejamento para controle e gerenciamento eficiente (Piromal et al., 2008). Há vários sistemas orbitais que fazem a detecção de focos de calor, tais como NOAA-AVHRR, MODIS, LANDSAT, GOES, entre outros. Cada um destes sistemas possui distintas características, como resolução espacial, temporal, espectral e radiométrica, as quais, por sua vez, interferem decisivamente na qualidade do dado para a detecção, podendo levar a superestimar (erro de comissão) ou subestimar (erro de omissão) a área queimada mapeada. Na tabela 2.1 tem-se as diferentes características (resolução temporal, espacial, bandas no visível e infravermelho-médio, e infravermelho termal) dos principais sistemas orbitais para detecção e monitoramento de focos de calor e cicatrizes de queimada no mundo.

Tabela 2.1 - Principais sistemas orbitais para detecção e monitoramento de ocorrência de incêndios.

| Sistemas (e informações adicionais) | Resolução Temporal (dias) | Resolução Espacial (km) | Bandas do Visível, Infravermelho (próximo e médio) (μm) | Bandas Termal (μm) |
|--|----------------------------------|--------------------------------|--|---|
| <i>Advanced Along Track Scanning Radiometer</i> http://www.le.ac.uk/ph/research/eos/aatsr/ | 2 | 1.00 | 0.56, 0.66, 0.86, 1.6 | 3.7, 11, 12 |
| <i>Advanced Land Imager</i> http://eo1.gsfc.nasa.gov/Technology/ALHome1.htm | 16 | 0.010–0.09 | 0.44, 0.48, 0.56, 0.64, 0.79, 0.87, 1.25, 1.65, 2.23 | |
| <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> http://asterweb.jpl.nasa.gov/ | 16 | 0.015–0.09 | 0.56, 0.66, 0.82, 1.65, 2.17, 2.21, 2.26, 2.33, 2.34 | 8.3, 8.65, 9.1, 10.6, 11.3 |
| <i>Along Track Scanning Radiometer</i> http://www.atsr.rl.ac.uk/ | 3 | 1.00 | 0.55, 0.67, 0.87, 1.6 | 3.7, 10.8, 12 |
| <i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i> http://www.nesdis.noaa.gov/ | 4 passagens diárias | 1.10 | 0.63, 0.91, 1.61 | 3.74, 11, 12 |
| <i>Hot Spot Recognition Sensor System</i> http://www.itc.nl/research/products/sensordb/getsen.aspx?name=HSRS | - | 0.37 | - | 3.8, 8.9 |

| | | | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------|--|---------------------------|
| <i>Hyperion</i> http://eo1.gsfc.nasa.gov/technology/hyperion.html | 16 | 0.03 | [220 bands: 0.38–2.5µm] | |
| Sistemas (e informações adicionais) | Resolução Temporal (dias) | Resolução Espacial (km) | Bandas do Visível, Infravermelho (próximo e médio) (µm) | Bandas Termal (µm) |
| <i>IKONOS</i> http://www.spaceimaging.com/ | 3 | 0.001–0.004 | 0.48, 0.55, 0.67, 0.81 | |
| <i>Indian Remote Sensing-1A,B</i> http://www.isro.org/ | 22 | 0.036–0.072 | 0.55, 0.65, 0.83 | |
| <i>Indian Remote Sensing-1B,C</i> http://www.isro.org/ | 24 | 0.023–0.188 | | |
| <i>Landsat</i> http://landsat.gsfc.nasa.gov/ | 16 | 0.015–0.09 | 0.48, 0.56, 0.66, 0.85, 1.65, 2.17 | 11.5 |
| <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> http://modis.gsfc.nasa.gov/ | 4 passagens diárias | 0.25–1.0 | 19 bandas | 16 bandas |
| <i>Quickbird</i> http://directory.eoportal.org/pre_s_QUICKBIRD2.html | 1–5 | 0.001–0.004 | 0.48, 0.56, 0.66, 0.83 | |
| <i>VEGETATION</i> http://www.spot-vegetation.com/ | 1 | 1.15 | 0.55, 0.65, 0.84, 1.62 | |

Fonte: Lentile et al., 2006.

Os dados da tabela 2.1 nos mostram diferenças e semelhanças entre os sensores orbitais, pois para os dados das bandas do visível e infravermelho médio temos semelhanças nos comprimentos de ondas para detecção da cicatriz de queimada, ainda que haja uma variação no número de bandas disponíveis para tal mapeamento. Como exemplo, temos o *Quickbird* com alta resolução espacial utilizando comprimentos de onda semelhante ao *LANDSAT 5 e 7* (média resolução espacial) e *IKONOS* (alta resolução espacial).

Como as queimadas ocorrem de forma distribuída latitudinalmente no território e em lugares de difícil acesso, a utilização de imagens de sensores com resolução espacial moderada e alta resolução temporal, são amplamente utilizadas em relação a imagens de satélite de alta resolução espacial, haja vista que a pequena área mapeada (alta diferenciação dos alvos) demanda maior quantidade de imagens para compor o mosaico da paisagem a ser analisada e o alto custo financeiro de aquisição. Da mesma forma, a baixa resolução temporal aumenta a probabilidade de incidência de nuvens, como no caso da imagem *LANDSAT* (resolução

temporal de 16 dias), dificultando o mapeamento das cicatrizes de queimadas (Rivera-Lombardi, 2009).

Por outro lado, imagens com resolução espacial moderada à pequena, como é o caso das obtidas pelos sensores *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), além de serem gratuitas, possuem alta resolução temporal (1 a 4 dias) e boa acuidade radiométrica, possibilitando mapeamentos rápidos e confiáveis, com vistas ao monitoramento, elaboração de estratégias e diretrizes de mitigação, como é o caso das queimadas, que ocorrem exponencialmente durante a estação seca (baixos níveis de umidade) e quente em relação ao período chuvoso, principalmente na região do Cerrado.

França e Seltzer (2001) utilizaram os dados do AVHRR, com resolução espacial de 1 Km², para monitoramento de cicatrizes de queimada no Parque Nacional das Emas, onde usaram as bandas 1 (0.6 µm), 2 (0.9 µm) e 3 (3.7µm), posteriormente comparadas com imagens LANSAT TM (resolução espacial de 30 m). Nessa análise, França e Seltzer (2001) notaram que mesmo com uma grande diferença de resolução espacial entre os dois sensores, o AVHRR subestimou a cicatriz de fogo em 15.7% em relação à imagem LANDSAT TM, e que a banda 3 (3.7µm) é a melhor para detecção de cicatrizes em comparação com as outras faixas espectrais analisadas.

Em outra análise utilizando dados AVHRR/NOAA-14, França (2001) quantificou a área queimada no Cerrado a partir do número de focos de calor obtidos pelo NOAA-12 por meio de algoritmo que utiliza dados da banda 3 (3,55 – 3,93 µm) e do IVDN (Índice de Vegetação de Diferença Normalizada). Com base nas imagens LANDSAT TM, utilizadas para a validação dos dados, França (2001) obteve resultados satisfatórios, pois conseguiu estimar a área queimada no Cerrado fazendo uso do dado AVHRR com erro inferior a 15% e identificar 94% das queimadas no período analisado.

Além da utilização dos dados do AVHRR-NOAA para monitoramento de queimada, temos pesquisas consistentes utilizando informações de outros sensores, como o SPOT Vegetation, o qual foi utilizado em estudos na região da Austrália (Stroppiana et al., 2003a; Stroppiana et al., 2003b), florestas boreais (Fraser et al., 2000; Fraser e LI, 2002; Gerard et al., 2003.) e em escala mundial, quantificando a cicatriz de queimada sobre os diferentes tipos de uso antrópico e de vegetação natural remanescente. Segundo Tansey et al. (2004), a área queimada no ano 2000 chega a estimativa de 3.5 milhões Km², com 80% concentrados em

regiões arbustivas, 17% em áreas de pastagens e agricultura e 3% em áreas florestais. Outro ponto interessante desse trabalho é a utilização dos dados UMD (University of Maryland) com resolução espacial de 1 km, confrontando-os com dados SPOT Vegetation, os quais foram validados com base em imagens LANDSAT TM. É de consenso entre os autores dos artigos citados que a banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR), situada no espectro entre os intervalos de 1.58 – 1.75 μm , apresenta melhor discriminação das áreas queimadas em relação a outros alvos presente na análise.

A análise de Tansey et al. (2004) corrobora os dados obtidos por Roy et al. (2008) no Brasil, os quais utilizaram dados do sensor MODIS, produto MCD45A1, voltado para o mapeamento de área queimada (*burned area*). Estas duas análises demonstraram que, dentre os cinco biomas brasileiros, o Cerrado é o mais afetado pelas queimadas ao longo do ano, e que as queimadas se concentram entre os meses de junho a setembro, período quente, seco e com baixo índice de precipitações pluviométricas, e que, as vegetações arborescentes (*woodland e savana grassland*) são as mais atingidas, pois 67% das cicatrizes mapeadas pelo SPOT Vegetation estão localizadas nesses dois tipos de fitofisionomias.

Dentre os sensores orbitais citados, o sensor MODIS está entre os principais utilizados para dados de mudança de uso das terras no mundo, isto se deve à alta confiabilidade dos dados gerados, sobretudo os da coleção 5, coleção a qual apresenta melhorias significantes em relação à anterior (coleção 4), como resolução radiométrica, correção atmosférica, redução da interferência de nuvens, etc (Boschetti et al., 2009; Friedl et al., 2010). Outra importante característica do sensor MODIS é a resolução espacial de 250m e 500m (escala moderada), constituindo uma grande vantagem em relação a outros sensores que apresentam resolução espacial de 1 km.

O sensor MODIS foi desenvolvido para diferentes análises, e dentre elas temos os produtos para aplicações terrestres (*MODLAND*), por exemplo, o MOD13 (índices de vegetação como NDVI e EVI) e o MOD15 (índices de área foliar / fração absorvida da radiação fotossinteticamente ativa) (Tabela 2.2) (Ferreira et al., 2006). O sensor MODIS, satélites Terra e Aqua, possui ainda dois importantes produtos para análise da dinâmica e modificações da paisagem em função da presença de fogo, i.e. o MOD14 (focos de calor) e o MCD45A1 (cicatrizes de queimada). Foram desenvolvidos inúmeros estudos para identificação e quantificação de áreas queimadas utilizando e validando os dados MODIS. Para a detecção dessas áreas (*burn scar*) é utilizado os canais do infravermelho próximo, centrados entre 1.24

e 2.13 μm , já que esses canais são sensíveis às mudanças da superfície induzidas pelo fogo e não são obscurecidos por fumaça (Li et al., 2004).

Tabela 2.2 - Produtos MODIS para aplicações terrestres.

| Balanco de energia e radiação da superfície | Produtos de vegetação e ecologia | Cobertura e uso da terra |
|---|--|--|
| Refletância | Índices de Vegetação | Cobertura/Mudanças na Cobertura |
| Temperatura da Superfície | Índice de Área Foliar / Fração de Radiação Absorvida Fotossinteticamente Ativa | Cobertura Vegetal / Conversões |
| Albedo | Produtividade Primária | Anomalias / Fogo |
| Aplicações Gerais | | |
| Avaliação Física de Processos Superficiais | Caracterização e Funcionamento de Ecossistemas; Padrão de Produtividade Sazonais | Estimativas de Carbono / Desenvolvimento Sustentável |

Fonte: FERREIRA et al., 2006.

Quanto ao produto *MODIS active fire* (fogo ativo), desenvolvido com base na experiência adquirida do sensor AVHRR, utiliza-se os comprimentos de ondas centrados em 3.9 μm e 11 μm para identificar fogos ativos, determinar temperatura da superfície e indicar cicatrizes de queimada, como também, utiliza o índice de vegetação NDVI, substituindo a banda do vermelho (RED) pela do infravermelho-médio (MIR), para diferenciação de áreas queimadas e não queimadas (Justice et al., 1998; Kaufman et al., 1998; Martín e Chuvieco, 1995).

Para validação do produto focos de calor gerado pelo *MODIS Active Fire*, o qual utiliza dados do sensor MODIS a bordo do satélite Terra (lançado em 1999) e Aqua (lançado em 2002), foram desenvolvidas importantes análises, dentre os quais o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) fez relevantes contribuições para o desenvolvimento e detecção de focos de calor no continente sul-americano. Morisette et al. (2005), por exemplo, utiliza os parâmetros do algoritmo desenvolvido pelo INPE para validação do *MODIS Active Fire* (resolução espacial de 1 km), método que utiliza dados NOAA AVHRR (aproximadamente de duas décadas), o

qual apresenta bons resultados na detecção de focos de calor ativos em comparação ao algoritmo EOS MODIS. A acurácia de ambos algoritmos foi analisada com base em imagens ASTER (30m), onde os erros de omissão são similares, mas o erro de comissão é maior no algoritmo do MODIS INPE.

Com o intuito de mapear a extensão das áreas de queimadas, foi lançado, em 2005, o produto MODIS MCD45A1 área queimada de escala global, com resolução espacial de 500 metros e resolução temporal mensal. Boschetti et al. (2008) indicam que os dados gerados pelo MCD45A1 apresentaram boa acuidade em relação aos dados gerados pelo produto EFFIS (*The European Forest Fires Information Service*), pois ambos obtiveram uma área comum de 2.429 Km², enquanto o MCD45A1 (2.927 Km²) e EFFIS (2.722 Km²) mapearam 83% e 89% da área total discriminada na paisagem, respectivamente.

Em outra análise para avaliação da acuidade do MCD45A1, Roy e Boschetti (2009) compararam três produtos de sensoriamento remoto para detecção de área queimada na região sul do continente africano (i.e. dados MODIS burned area, L3JRC e GlobCarbon). Os resultados indicaram que o MCD45A1 apresentou maior acurácia no mapeamento de cicatrizes de queimadas e de fragmentos menores, devendo-se a fatores como a precisa calibração, geolocalização, correção atmosférica, mascaramento de nuvens e a resolução espacial de 500 m, já que os outros dois produtos, L3JRC e GlobCarbon, possuem resolução espacial de 1 km, enquanto ambos os produtos apresentaram erro de comissão menor que o erro de omissão.

Em outro estudo, Roy et al. (2008) comparam dados do MODIS MCD45A1 com o *MODIS Active Fire* (MOD14), onde, em um período de um ano, julho de 2001 a junho de 2002, analisaram a extensão da área queimada nos principais tipos de cobertura vegetal remanescente e uso da terra (antrópico e natural) presentes em 6 continentes (África, América do Norte e do Sul, Euro Ásia Norte e Sul e Austrália-Oceania). Para o produto MCD45A1, foram utilizados os dados de confiabilidade baixa, média e alta, enquanto o produto *Active Fire* (MOD14), dados de média e alta confiabilidade. Os resultados mostram que a área queimada mapeada nos 6 continentes pelo MCD45A1 (3.66E+06 Km²) foi maior do que a obtida pelo *Active Fire* (MOD14) (2.78E+06 Km²). Em relação a análise continental, o continente da África foi o que mais obteve registros de áreas queimadas conforme os dois produtos MODIS, seguido, nessa ordem, pelos continentes da Austrália-Oceania, América do Sul, Euro Ásia Norte, Euro Ásia Sul e América do Norte. A cobertura vegetal remanescente apresentou maiores registros de queimadas comparado as regiões de uso antrópico (agricultura e pastagem), sendo que, a região fitoecológica savana foi a mais afetada pelo fogo em relação as demais.

Comumente, para validação das áreas de queimadas detectadas pelo sensor MODIS são utilizadas imagens de alta resolução espacial, como ASTER (Morissette et al., 2005) e/ou LANDSAT (Schroeder et al., 2008; Li et al., 2004). No caso dos dados do MODIS MCD45A1, Roy e Boschetti (2009) utilizaram 12 cenas LANDSAT ETM⁺ para validação das áreas queimadas mapeadas por esse produto na região sul do continente africano. Essas duas imagens, ASTER e LANDSAT, têm suas vantagens, já que possuem uma resolução espacial de 30 m e fácil aquisição (no caso das cenas TM, são disponibilizadas gratuitamente no catálogo de imagens mantido pelo INPE - <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>). Em relação as imagens LANDSAT, tanto TM quanto ETM⁺, são utilizadas as bandas 3 (0.63 – 0.69 μm), 4 (0.76 – 0.90 μm) e 5 (1.55 – 1.75 μm), as quais permitem boa discriminação visual das cicatrizes de queimadas em relação aos outros alvos que compõe a imagem (Krug et al., 2004).

Realizando a composição colorida com as bandas 4 (NIR - R), 5 (MIR - G) e 3 (RED - B) do sensor TM, as áreas que tiveram a biomassa queimada tendem a absorver mais a radiação dos comprimentos de onda centrados na banda 4 (infravermelho próximo - NIR). Os níveis de cinza mais baixos encontrados na banda 4 da imagem TM corresponde à queimada recente, enquanto a banda 5 permite a diferenciação espectral entre queimadas recentes e antigas (aproximadamente 15 a 20 dias) (Pereira e Seltzer, 1993; Riveira-Lombardi, 2003).

2.3. Produto MODIS MCD45A1 – mapeamento de áreas queimadas a nível global

O dado MODIS MCD45A1⁵ é um produto de mapeamento de áreas queimadas para todo o globo terrestre, menos as regiões polares, o qual é obtido utilizando dados do sensor MODIS de reflectância da superfície a bordo do satélite TERRA (manhã) e AQUA (tarde). São disponibilizados doze composições anualmente, ou seja, ele possui uma resolução temporal de 30 dias (mensal) e espacial de 500 metros. Por ser um produto mensal, ele fornece toda área queimada que ocorreu durante o mês, não sendo possível saber o dia exato que ocorreu a queimada, mas somente quantificar a área queimada atingida pelo fogo para determinada região (Boschetti et al., 2009; Justice et al., 2006; Roy et al., 2008).

Para geração das máscaras de área queimada pelo MCD45A1 está sendo utilizado a coleção 5, que apresenta melhorias significantes em relação à anterior (coleção 4), como

⁵ MCD45A1: MCD indica que usa dados dos satélites Terra e Aqua, enquanto o 45 indica mapeamento de área queimada.

resolução radiométrica, correção atmosférica, redução da interferência de nuvens, etc (Boschetti et al., 2009).

O mapeamento de área queimada pelo MCD45A1 leva em consideração a mudança estrutural, espectral e temporal do pixel ao longo de uma série de análise diária. A questão temporal é utilizada para diferenciar as mudanças que ocorrem no decorrer do dia, como a presença de nuvens e fumaças, que por serem espectralmente semelhantes a incêndios induzem erroneamente ao mapeamento de falsas queimadas (Boschetti et al., 2009; Roy et al., 2002; Roy et al., 2008). Especificamente, é utilizado o Modelo de Reflectância Bidirecional (*The Bidirectional Reflectance Model-based* - BRDF), método que verifica as mudanças ocorridas nas refletâncias dos alvos ao longo de uma série de observações, podendo ser analisado por semanas ou meses, determinando a diferença da reflectância entre o primeiro e último dia observado do pixel (Boschetti et al., 2009; Justice et al., 2006; Roy et al., 2002; Roy et al., 2008).

A diferença da reflectância para que um pixel seja caracterizado como área queimada ao longo de uma série temporal é obtida por medida estatística que analisa se há uma diferença significativa entre os parâmetros de reflectância obtidos pelo BRDF e os observados nas bandas do infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Boschetti et al., 2009; Roy et al., 2008). A medida estatística leva em consideração o erro de calibração do sensor e correção atmosférica, pois o algoritmo BRDF não detecta essas variações no decorrer das observações do sensor MODIS (Boschetti et al., 2009; Justice et al., 2006). Esse mesmo procedimento é passado independentemente para cada pixel em várias etapas ao longo do dia.

O MODIS MCD45A1 disponibiliza oito conjunto de dados, sendo *burn date* (1), *ba pixel qa* (2), *number of passes* (3), *number used* (4), *direction* (5), *surface type* (6), *gap range 1* (7) e *gap range 2* (8). O primeiro produto do MCD45A1, *burn date*, fornece a máscara binária com as áreas queimadas, em que pixels com valores zero significam áreas não queimadas e pixels que apresentam valores no intervalo de 1 a 366 são caracterizados como queimadas. O *ba pixel qa* refere-se à qualidade e acurácia do pixel ser realmente uma queimada, onde 1 significa alta confiabilidade de queimada, enquanto os pixels que possuem valores 2, 3 e 4 apresentam menor confiabilidade (Boschetti et al., 2009).

O período analisado pelo algoritmo do produto MODIS MCD45A1 é de oito dias antes do término do mês antecessor da análise e os oito dias iniciais do mês seguinte, ou seja, não

permitindo que a mesma queimada registrada anteriormente seja duplicada na composição do dado do mês seguinte.

2.4. Produtos de Anomalias Termiais (MOD14 e MYD14)

O produto de anomalias termiais, MODIS *fire products*, compreende o produto MOD14, (satélite Terra), e o produto MYD14 (satélite Aqua). Os horários de observação do sensor MODIS, a bordo do satélite Terra, são 10:30 e 22:30, enquanto a bordo do satélite Aqua é às 13:30 e 1:30. Dentre as características do *MODIS Active-Fire* destaca-se o registro das ocorrências de focos de calor diariamente para todo globo terrestre, com uma resolução espacial de 1 quilômetro e utilizando sete bandas espectrais, destacando-se os intervalos de 3.96 μm (bandas 21 e 22) e 11 μm (banda 31) para detecção de fogos ativos (Giglio, 2007; Boschetti et al., 2009; Justice et al., 2006). Nestes comprimentos de ondas são amenizados e mascarados os efeitos de nuvens e fumaças emitidas durante o processo de queima da vegetação.

O algoritmo utiliza a temperatura brilho das bandas 21 e 22, as quais estão posicionadas em torno de 4 μm , e da banda 31, próxima à 11 μm . As bandas 21 e 22 saturam aproximadamente na temperatura de 500 K e 331 K, respectivamente, enquanto a banda 31 em 400 K. O algoritmo do MODIS *Active Fire* é denotado como T_4 e T_{11} , onde T_4 baseia-se, sempre que possível nos valores da banda 22 devido à baixa saturação e ruídos. Contudo, se a banda 22 saturar, o valor de T_4 é obtido pela banda de maior saturação, banda 21.

Os Falsos alarmes de focos de calor são detectados com base nas bandas do vermelho (banda 1) e infravermelho próximo (banda 2), centradas em 0.65 μm e 0.86 μm , respectivamente, ambas com resolução espacial de 250 m (reamostradas para 1km), conforme a alta reflectância da superfície, tal reflectância é denotada pelo algoritmo como p_2 . O algoritmo do MODIS *Active Fire*, para evitar falsas detecções de focos de calor, segue alguns parâmetros, tais como, se todos os pixels em $T_4 < 315 \text{ K}$ (305 à noite) ou $T_4 - T_{11} < 10 \text{ K}$ (3 K à noite) ou $p_2 > 0.3$ (apenas no período diurno). Contudo, para detecção de focos de calor reais, o algoritmo requer que pelo menos umas das condições sejam satisfeitas, onde, na primeira condição, $T_4 > 360 \text{ K}$ (330 K à noite) ou, segunda condição, $T_4 > 330 \text{ K}$ (315 K à noite) e $T_4 - T_{11} > 25 \text{ K}$ (10 K à Noite) (Justice et al., 2002; Justice et al., 2006).

Se nenhum desses parâmetros for encontrado, o algoritmo continua o processo de detecção, mas agora analisa os valores médios do entorno do pixel de queimada através de três

desvios padrões nos valores obtidos em T_4 e $T_4 - T_{11}$ (Justice et al., 2002; Rivera-Lombardi, 2009), sendo:

- $T_4 >$ média (T_4) + 3 desvios padrões (T_4); e
- $T_4 - T_{11} >$ mediana ($T_4 - T_{11}$) + 3 desvios padrões ($T_4 - T_{11}$).

Os pixels do entorno, considerados como não queimadas, serão identificados seguindo parâmetros como $T_4 < 325$ K (305 K à noite) e $T_4 - T_{11} < 20$ K (10 K à noite). No entanto, se ambos os desvios padrões estiverem abaixo de 2 K, o valor de 2 K é usado em seu lugar. Se em qualquer situação apresentada durante a detecção de queimadas não identificar focos de calor ativo, o pixel será rotulado como desconhecido. Entretanto, As falsas detecções de focos de calor ativo durante o dia são rejeitadas se os pixels nas bandas 1 e 2 apresentarem uma reflectância acima de 30% e na posição de reflexão especular de 40° (Justice et al., 2002; Rivera-Lombardi, 2009).

2.5. Referências

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L.; SALDIVA, P. H. N.; Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **J. Bras. Pneumol**, Vol. 30, No. 2, p. 158-175, 2004.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; BARBOSA, P.; BOCA, R.; JUSTICE, C. A. MODIS assessment of the summer 2007 extent burned in Greece. **International Journal of Remote Sensing**. Vol.29. pg. 2433-2436. 2008.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A. A. **MODIS Collection 5 Burned Area Product - MCD45 User's Guide**. Version 2.0. 2009.

BRÂNCIO, P. A; Queima das pastagens. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa MG, 2001. Disponível em: <www.tdnet.com.br/domicio/queima.htm>. Acesso em 17/06/2012.

BERGER, R.; LIBBY, W. F. UCLA radiocarbon dates V. **Radiocarbon** 8:467-497, 1966.

CANÇADO, J.E.D. A poluição atmosférica e sua relação com a saúde humana na região canavieira de Piracicaba – SP [tese de doutorado]. São Paulo: Faculdade de Medicina USP; 2003.

CASTRO, L. H. R., MOREIRA, A. M.; ASSAD, E. D. Definindo padrões espaciais de precipitação no Cerrado Brasileiro. In: **Chuvas nos Cerrados: Análise e Espacialização**, ed. E.D. Assad, 423p, 1994, Brasília, DF: Embrapa-SPI.

CASTRO-NEVES, B. M. Efeitos de queimadas em áreas de cerrado Stricto Sensu e na biomassa de raízes finas. 2007. 82 f. **Tese** (Doutorado em Ecologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

COUTINHO, L. Aspectos ecológicos do fogo no Cerrado. II. A temperatura do solo durante as queimadas. **Revista Brasileira de Botânica** 1: 93-96. 1978.

COUTINHO, L. M. As queimadas e seu papel ecológico. **Brasil Florestal**, 10(44):7-23, 1980.

COUTINHO, L. M. Aspectos ecológicos do fogo no Cerrado: nota sobre a ocorrência e datação de carvões vegetais encontrados no interior do solo, em Emas, Pirassununga, S.P. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 4, p. 15-117, 1981.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Goldammer, J.G.(ed.). **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, 1990. Cap. 6, p. 82-105. (Ecological Studies, 84).

COUTINHO, L. M. O Uso do Fogo em Pastagens Naturais Brasileiras. In: PUIGNAU, J. P. (Ed.). **Utilización y Manejo de Pastizales**. Montivideo: IICA-PROCISUR, 1994. p.159-168. (DIALOGO XL).

EITEN, G. Vegetação do Cerrado. In: PINTO, M. N. (Ed.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília, DF: Editora da UnB, 1994. p. 17-73.

FRANÇA, H.; SETZER, A. AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, n. 13, p. 2449-2461, 2001a.

FRANÇA, H. Metodologia de identificação e quantificação de áreas queimadas no cerrado com imagens AVHRR/NOAA. **Tese** (Doutorado), Instituto de Biociências, USP, 2001b.

FRASER, R. H; LI, Z; LANDRY, R. SPOT VEGETATION for Characterising Boreal Forest Fires Research letter. **International Journal of Remote Sensing**. Vol. 21, 2000. pg. 3525-3532.

FRASER, R.; LI, Z. Estimating fire related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 82, 2002. pg. 95 – 110.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R.; PECCININI, A. A. Análise comparativa dos produtos MODIS ecologia para o monitoramento biofísico ambiental do bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Geofísica**. Vol. 24, No. 2. pg.251 – 260. 2006.

FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Modelo Conceitual, Lógico e Físico de um Sistema para o Monitoramento Integrado e Sistemático da Floresta Amazônica a partir da Análise de Produtos de Sensoriamento Remoto, Dados Censitários e Cartográficos. Goiânia: Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais, 2006 (**Tese de Doutorado**).

FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R.; FERREIRA, M. E. An operational deforestation mapping system using MODIS data and spatial context analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p. 47-62, 2007.

FRIEDL, M. A; SULLA-MENASHE. D; TAN, B; SCHNEIDER, A; RAMANKUTTY, N; SIBLEY, A; HUANG, X. MODIS Collection 5 Global Land Cover: Algorithm Refinements and Characterization of New Datasets. **Remote Sensing of Environment**. Vol. 114, p. 168-182, 2010.

GERARD, F; PLUMMER, S; WADSWORTH, R; FERRERUELA, A; ILIFFE, L; BALZTER, H; WYATT, B. Forest fire scar detection in the boreal forest with multi-temporal SPOT-VEGETATION. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 41., p. 2575-2585, 2003

GIBBS, H. K.; RAUSCH, L.; MUNGER, J.; SCHELLY, I.; MORTON, D. C.; NOOJIPADY, P.; SOARES-FILHO, B.; BARRETO, P.; MICOL, L.; WALKER, N. F. Brazil's Soy Moratorium. **Science**, vol. 347, no. 6220, 2015. p. 377-378. Doi: 10.1126/science.aaa0181

GIGLIO, L. **MODIS Collection 5 Active Fire Product User's Guide. Version 2.4**, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/gfims/docs/MODIS_Fire_Users_Guide_2.4.pdf>. Acessado em: 15/08/2011.

GUIDON, N.; DELIBRIAS, G. Carbon-14 dates point to man in the Americas 32,000 years ago. **Nature**, v. 321, n. 6072, p. 769-771, 1986.

GUIMARÃES, R. J. P. S. **Seleção das bandas do sensor Modis Airbone Simulator (MAS) na discriminação de queimadas**. São José dos Campos: INPE, 2000. 84p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Editora Parêntese, São José dos Campos, SP. 2009.

JUSTICE, C; VERMOTE, E; TOWNSHEND, J. R. G; DEFRIES, R; ROY, D. P; HALL, D. K; SALOMONSON, V. V; PRIVETTE, J; RIGGS, G; STRAHLER, A; LUCHT, W; MYNENI, R; KNJAZIHHIN, Y; RUNNING, S; NEMANI, R; WAN, Z; HUETE, A; VAN LEEUWEN, W; WOLFE, R. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 36, No. 4, p. 1228-1249, 1998.

JUSTICE, C.O; GIGLIO, L; KORONTZIA, S; OWENSA, J; MORISETTE, J.T; ROYA, D; DESCLOITRES, J; ALLEAUMED, S; PETITCOLINE, F; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, No. 83, p. 244 – 262, 2002.

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: 28/06/2011.

KAUFMAN, Y. J; JUSTICE, C; FLYNN, L; KENDALL, J; PRINS, E; WARD D. E; MENZEL, P; SETZER, A. Monitoring Global Fires from EOS-MODIS. **Journal of Geophysical Research**. Vol. 103, p. 32215-32238, 1998.

KLINK, C.A.; MACHADO, R.B. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology*, v. 19, No. 3, p. 707-713, 2005.

KRUG, T.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; DOS SANTOS, J. R. Burned area, Recurrence of Fires and Permanence of Burnt scars in Selected Areas of the Brazilian Cerrado Using TM-Landsat Imagery. In: **XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress**, Vol. 35, p. 243-246, 2004.

LENTILE, L. B.; HOLDEN, Z. A.; SMITH, A. M. S.; FALKOWSKI, M. J.; HUDAK, A. T.; MORGAN, P.; LEWIS, S. A.; GESSLER, P. E.; BENSON, N. C. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. **International Journal of Wildland Fire**, Vol. 15, p. 319-345, 2006.

LI, R. R.; KAUFMAN, Y. J.; HAO, W. M.; SALMON, M.; GAO, B. G. A Technique for Detecting Burn Scars Using MODIS Data. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**, vol. 42, 2004.

LOPES, F. S.; RIBEIRO, H. Mapeamento de internações hospitalares por problemas respiratórios e possíveis associações à exposição humana aos produtos da queima da palha de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Revista Brasileira Epidemiologia**, Vol. 9, No. 2, p. 215-225, 2006.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/SBF. **Mapeamento da cobertura vegetal do bioma cerrado, relatório final**. Edital Probio 02/2004. Projeto Executivo B.02.02.109. Brasília, junho 2007.

MIMS, F.M. 3rd. Health effects of tropical smoke. **Nature**; Vol. 390, p. 222-223, 1997.

MANTOVANI, J. E.; PEREIRA, A. Estimativa da integridade da cobertura de vegetação do Cerrado através de dados Landsat - TM. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Santos, SP, 1998.

MARTÍN, M. P.; CHUVIECO, E. Mapping and evaluation of burned land from multitemporal analysis of AVHRR NDVI images. **Advances in Remote Sensing**, Vol. 4, No. 3, p. 7-13, 1995.

MASCARENHAS, M. D. M. et al. Anthropogenic air pollution and respiratory disease-related emergency room visits in Rio Branco, Brazil - September, 2005. **J. bras. Pneumol.**, Vol. 34, No. 1, p. 42-46, 2008.

MIRANDA, E. E. de; MANTOVANI, L. E.; PIEROZZI Jr., I.; TAKEDA, A. M.; MATTOS, C. O.; MANGABEIRA, J. A. C.; FILARDI, A. L. **O impacto ambiental das queimadas da palha de cana-de-açúcar**: Parecer técnico científico. Campinas: MARA, Embrapa Monitoramento por Satélite, 1993.

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A.; HARUDASAN, M.; MORAIS, H. C. Queimadas de Cerrado: caracterização e impactos. In: Aguiar, L. M. S.; Camargo, A. J. A (Org). **Cerrado: ecologia e caracterização**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 3, p. 69-123, 2004.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N. C. Expansão da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no Estado de Goiás: subsídios à política ambiental. In: Laerte Guimarães Ferreira Jr. (Org.). **A encruzilhada socioambiental** - biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado. 1 ed. Goiânia: Editora UFG, v. 1, p. 107-125, 2008.

MORISSETTE, J. T; GIGLIO, L; CSISZAR, I; SETZER, A; SCHROEDER, W; MORTON, D; JUSTICE, C. O. Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms. **Earth Interactions**, Vol. 9, No. 9, p. 1-23, 2005.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Relation of soils and geomorphologic surfaces in the Brazilian Cerrado. In: **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical savanna**, eds. P.S. Oliveira e R.J. Marquis, p. 13-32. Columbia, NY: University Press, 2002.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403: 853-858, 2000.

NASCIMENTO, D. T. F.; ARAUJO, F. M.; FERREIRA, L. G. Análise dos padrões de distribuição espacial e temporal dos focos de calor no bioma cerrado. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, p. 577-589, 2011.

PEREIRA, M. C.; SETZER, A. W. Spectral characteristics of fire scars in Landsat-5 TM images of Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 14, No. 11, p. 2061-2078, 1993.

PIROMAL, R. A. S.; RIVEIRA-LOMBARDI, R. J.; SHIMABURURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; KRUG, T. Utilização de dados MODIS para a detecção de queimadas na Amazônia. **Revista Acta Amazonica**, Vol. 38, No. 1, p. 77 – 84, 2008.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. Transfer of Macro-Nutrients to the Atmosphere during Experimental Burnings in a Open Cerrado (Brazilian Savanna). **Journal of Tropical Ecology**, Vol. 8, No 4, p. 457-497, 1992.

PIVELLO, V. R.; NORTON, G. A. FIRETOLL: an expert system for the use of prescribed fires in Brazilian savannas. **The Journal of Applied Ecology**, Vol. 33, No. 2, p. 348-356, 1996.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. A qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. **Forest Ecology and Management**, Vol. 87, p. 127-138, 1996.

PIVELLO, V. R.; CARVALHO, V. M. C.; LOPES, P. F.; PECCININI, A. A; ROSSO, S. Abundance and distribution of native and alien grasses in a “cerrado” (Brazilian savanna) biological reserve. **Biotropica**, Vol. 31, No. 1, p. 71-82, 1999a.

PIVELLO, V. R.; SHIDA, C. N.; MEIRELLES, S. T. Alien grasses in Brazilian savannas: a threat to the biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, Vol. 8, No. 9, p. 1281-1294. 1999b.

PIVELLO, V. R. Manejo de fragmentos de cerrado: princípios para a conservação da biodiversidade. In: **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. A. Scariot, J. C. Sousa Silva e J. M. Felfili (Eds.). Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, p. 402-413, 2006.

PIVELLO, V. R. Invasões Biológicas no Cerrado Brasileiro: Efeitos da Introdução de Espécies Exóticas sobre a Biodiversidade. **ECOLOGIA.INFO**, No. 33, 2008. Disponível em: <<http://www.ecologia.info/cerrado.htm>>. Acessado em: 01/08/2011.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, Vol. 7, No. 1, 2011.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: rethinking management strategies. **Environmental Management** Vol. 26, No. 6, p. 675-684, 2000.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, Vol. 16, No. 44, p. 125-148, 2002.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: efeitos à saúde respiratória. **Revista Saúde Pública**, Vol.42, No. 2, p. 370-376, 2008.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto), São José dos Campos: INPE, 2003. 172p.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estimativa de áreas queimadas com produtos MODIS como subsídio à estimativa de emissões de gases de efeito estufa pela queima de biomassa na Amazônia e Cerrado brasileiros. **Tese** (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. 2009, Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon Burned Area Products. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 47, No. 4, p. 1032–1442, 2009.

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**, Vol. 112, p. 3690-3707, 2008.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA JR., L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Vol. 43, p. 153-156, 2008.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA JUNIOR, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Vol. 166, p. 113-124, 2010.

STROPPIANA, D; GRÉGOIRE, J-M; PEREIRA, J. M. C. The use of SPOT VEGETATION data in a classification tree approach for burnt area mapping in Australian savanna. **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 24, No. 10, p. 2131 – 2151, 2003a.

STROPPIANA, D; TANSEY, K; GRÉGOIRE, J-M; PEREIRA, J.M.C. An algorithm for mapping burnt areas in Australia using SPOT-VEGETATION data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 41, No. 4, p. 907-909, 2003b.

SCHROEDER, W.; PRINS, E.; GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; SCHMIDT, C.; MORISETTE, J.; MORTON, D. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 112, No. 5, p. 2711–2726, 2008.

TANSEY, K., et al. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 109, D14S03, 2004.

WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado: síntese terminológica e relações florísticas. **Tese de Doutorado**. Universidade de Brasília. 2006. 389p.

YAMASOE, E., M.A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A.H. e ALLEN, A.G. Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon Basin: water-soluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, Vol. 34, p. 1641-1653, 2000.

ZANINI, A. M.; DINIZ, D. Efeito da Queima sob o Teor de Umidade, Características Físicas e Químicas, Matéria Orgânica e Temperatura no Solo sob Pastagem. **Revista Eletrônica de Veterinária**, v. 7, nº 3. Espanha, 2006.

3. Satellite-based automated burned area detection: A performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna

Fernando Moreira de Araújo
Universidade Federal de Goiás – UFG
fernandomsbl@gmail.com

Laerte Guimarães Ferreira Júnior
Universidade Federal de Goiás – UFG
laerte@ufg.br

Abstract

Burnings, which cause major changes to the environment, can be effectively monitored via satellite data, regarding both the identification of active fires and the estimation of burned areas. Among the many orbital sensors suitable for mapping burned areas on global and regional scales, the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), on board the Terra and Aqua platforms, has been the most widely utilized. In this study, the performance of the MODIS MCD45A1 burned area product was thoroughly evaluated in the Brazilian savanna, the second largest biome in South America and a global biodiversity hotspot, characterized by a conspicuous climatic seasonality and the systematic occurrence of natural and anthropogenic fires. Overall, September MCD45A1 polygons (2000–2012) compared well to the Landsat-based reference mapping ($r^2 = 0.92$) and were closely accompanied, on a monthly basis, by MOD14 and MYD14 hotspots ($r^2 = 0.89$), although large omissions errors, linked to landscape patterns, structures, and overall conditions depicted in each reference image, were observed. In spite of its spatial and temporal limitations, the MCD45A1 product proved instrumental for mapping and understanding fire behavior and impacts on the Cerrado landscapes.

Keywords: MODIS MCD45A1, burned area detection, savannas

3.1. Introduction

Burnings cause major changes to the environment, by promoting seed germination (Meneses e Rossi, 2011) and the renewal / re-sprouting of grasses (Keeley, 2006), altering the structure and composition of soil and vegetation, accelerating erosive and sedimentation processes (Ice et al., 2004), as well as by releasing large amounts of trace gases and aerosols to the atmosphere (Longo, 2009). The estimated consumption of biomass and the chemical composition of the atmosphere after fires occur are two of the most complex factors for modeling gas emissions, for which it is necessary to conduct accurate mapping of burned areas and assessment of fire severity, as well as pre-fire evaluation of biomass (Palacios-Orueta et al., 2005; Randerson et al., 2005).

The occurrence of fires within landscapes, and most important, the understanding of their spatial and temporal distribution, according to the natural land-cover (Roy et al., 2008; McCarty

et al., 2009; Araújo et al., 2012) and land-use classes (crops and pastures), have been monitored by different remote sensing imagery and products (Hantson et al., 2013). Specifically, the mapping of fire occurrence through satellite data focuses on both the identification of active fires, through temperature anomalies registered in the middle and thermal infrared (Giglio et al., 2003; Justice et al., 2002b; Schroeder et al., 2008), and the estimation of burned areas, detected based on the spectral and temporal contrast between unburned and burned areas (Hantson et al., 2013; Bastarrika et al., 2011).

Although burned areas can be easily identified in medium / high spatial resolution orbital images, their automated discrimination is a complex process, due to both their spatial extension and the variety of spectral responses related to the fire severity, which depends on the vegetation structure and soil / surface properties (Roy et al., 2002; Pivello et al., 2010; Bastarrika et al., 2011), organic matter availability, climatic conditions (air humidity, wind speed, and temperature), and moisture content of the flammable material (Tansey et al., 2004a).

Among the many orbital sensors suitable for mapping burned areas on global and regional scales, the low spatial resolution Advanced Very High Resolution (AVHRR) (França e Setzer, 2001; Soja et al., 2004), the SPOT Vegetation (VGT) (Tansey et al., 2004a; 2004b; Silva et al., 2005), and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Roy et al., 2005; Roy et al., 2008; Libonati et al., 2010), have been the most widely utilized. At finer scales, the middle spatial resolution sensors, such as the ones onboard the Landsat satellite series, yield highly accurate burned area mappings, that are substantially less affected by both omission and commission errors and are often utilized in support of validating burned area products at a global scale (Krug et al., 2004; Román-Cuesta et al., 2005; Laris, 2005; Bastarrika et al., 2011; Stroppiana et al., 2012).

The MODIS sensor, onboard the Terra and Aqua platforms, has 36 spectral bands (wavelengths ranging from visible to infrared), spatial resolutions of 250m, 500m, and 1 km, and temporal coverage of 1 to 2 days (Justice et al., 1998; 2002b). Among the various MODIS data products, the MCD45A1 was specifically developed for the global mapping of burned areas, at 500m spatial resolution and 30 days repeating cycle (Roy et al., 2005). This product is based on a Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) model applied to MOD09 (bands 5 and 7) time-series, detecting, on a pixel basis, and according to a look-up-table, daily changes in surface reflectances. Based on a priori criteria, a statistical measure is attributed to each detected difference (i.e., between the previous and subsequent sampled reflectances),

which is classified into four categories, according to the respective confidence levels (Roy et al., 2005; Roy et al., 2008; Roy e Boschetti, 2009).

Although different validation exercises of the MODIS burned area product, compared to other global scale products, corroborate its potential applications at an acceptable accuracy (Boschetti et al., 2008; Chuvieco et al., 2008; Roy e Boschetti, 2009; Merino-de-Miguel et al., 2011), there is still a need for additional and more detailed error assessments for distinct environments. Within this context, the main purpose and contribution of the present study was to quantitatively evaluate, according to distinct land-cover classes and landscapes, the performance of the MODIS MCD45A1 product in the Brazilian savanna (known as Cerrado), the second largest biome in South America and a global biodiversity hotspot (Myers et al., 2000), characterized by a conspicuous climatic seasonality, with very little rain during the dry season months from May to September (Castro et al., 1994), and the systematic occurrence of severe natural and anthropogenic fires.

3.2. Data and Approaches

The evaluation of the MODIS MCD45A1 product in the Cerrado biome comprised two complementary steps. First, 130 burned scar polygons (from 2000 to 2012) with the highest confidence (i.e. MCD45A1 Quality Assurance = 1) and larger than 10 km², detected during the month of September, a period of great fire intensification in the Cerrado (Araujo et al., 2012), were randomly selected (Figure 3.1).

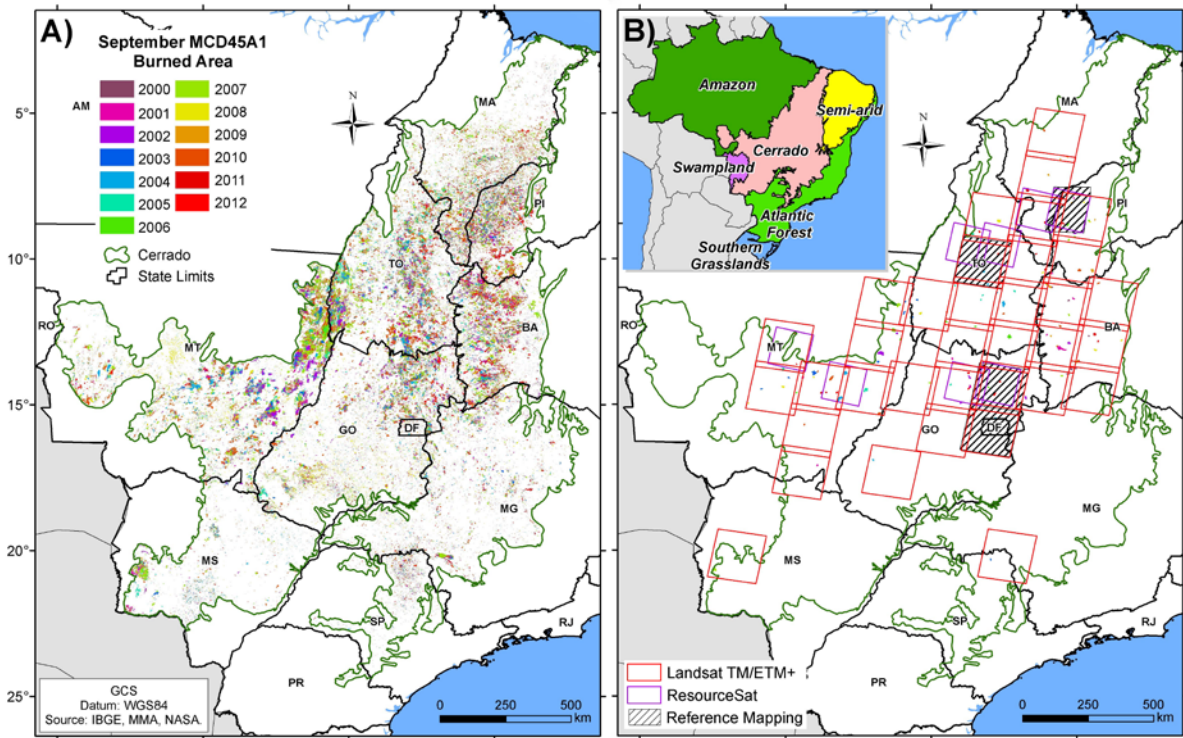


Figure 3.1 - Location of the September burned area (2000 to 2012) (A) and of the 130 randomly selected MCD45A1 burned polygons overlaid by the respective Landsat TM, ETM+ and ResourceSat 1 LISS3 scenes utilized for the validation of MODIS MCD45A1 product (B).

The Landsat TM and ETM+ utilized in the validation process were selected according to the location of the 130 MCD45A1 burned polygons. On average, for the inspection of each polygon, two TM or ETM+ overpasses were selected (beginning and end of September, or, in some cases, in the first days of October). Regarding the visual identification and manual delineation of burned scars, these were based on a GIS platform and the TM / ETM+ spectral bands 4 (0.76 – 0.90 μm), 5 (1.55 – 1.75 μm), and 7 (2.08 – 2.35 μm), which results in an optimum color composite contrast, capable of discriminating burned areas of low, medium, or high severity. For 2011 and 2012, when TM images were mostly unavailable, ResourceSat 1 – LISS3 scenes, comprising bands 4 (0.77 – 0.86 μm), 5 (1.55 – 1.70 μm), and 3 (0.62 – 0.68 μm) were acquired. Table 3.1 shows the TM, ETM+, and LISS3 images used for the evaluation of the MODIS MCD45A1 product in the Brazilian savanna, totaling 91 images.

Table 3.1 - TM, ETM+, and LISS3 orbital images utilized for the validation of the MODIS MCD45A1 over the Cerrado biome (2000–2012).

| Year | TM | ETM+ | ResourceSat 1 |
|-------------|-----------|-------------|----------------------|
| 2000 | 3 | - | - |
| 2001 | 9 | - | - |
| 2002 | - | 8 | - |
| 2003 | 6 | - | - |
| 2004 | 8 | - | - |
| 2005 | 9 | - | - |
| 2006 | 6 | - | - |
| 2007 | 8 | - | - |
| 2008 | 7 | - | - |
| 2009 | 7 | - | - |
| 2010 | 8 | - | - |
| 2011 | 3 | - | 2 |
| 2012 | - | - | 7 |

Ideally, for this analysis it would be desirable to have images prior to, during, and after the burning event, so that the fire behavior and severity, as well as the distribution and characteristics of the burned areas in the landscape could be properly investigated. However, for some of the polygons considered in this work, only one image was available, in part due to quality issues, as extensive fire fronts, particularly over natural areas, release a great amount of smoke and particulates into the atmosphere. This was the case of the 2000, 2002, 2006, and 2011 (the last year of Landsat 5 - TM data) polygons, evaluated on a single overpass basis.

As the burned areas in the Brazilian savanna occur mainly at irregular paths and over large areas (as is particularly the case of the prevalent low fragmented landscapes in the north region states of Maranhão, Mato Grosso, Piauí, and Tocantins), we assumed the “Landsat” boundaries of a given burned area to be constrained within adjacent MCD45A1 polygons (which may encompass more than one Landsat overpass) (Figure 3.2).

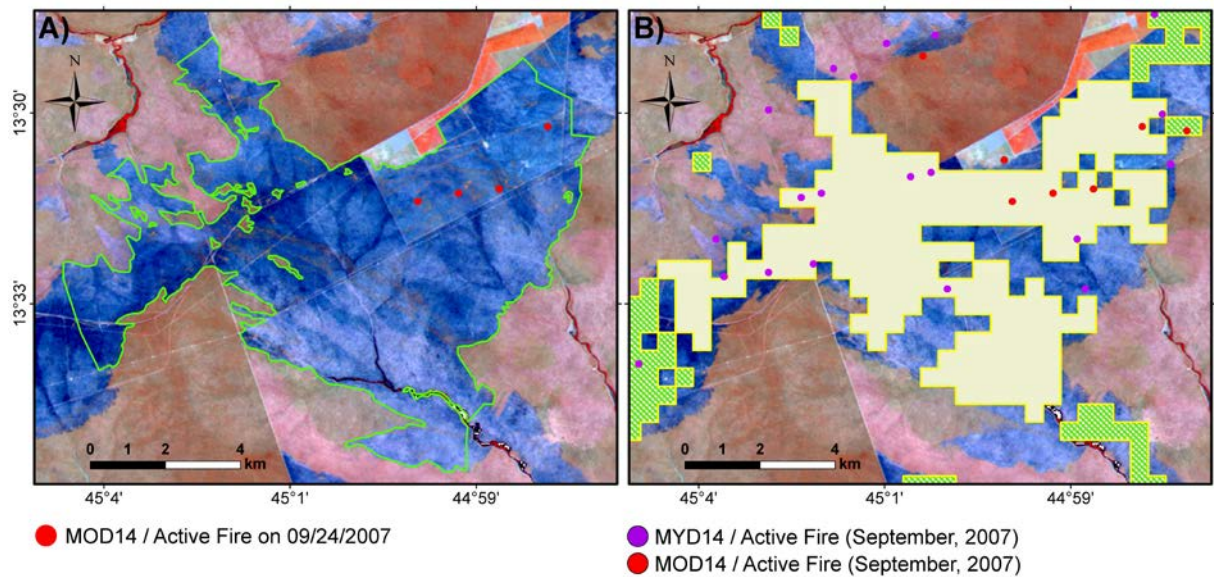


Figure 3.2 - Landsat based manual delineation (in green) of a burned area (A), according to the adjacent MCD45A1 polygons criterion (dashed polygons in green) (B).

Based on the PROBIO map (MMA, 2007; Sano et al., 2010), the MCD45A1 polygons were located relatively to the dominant Cerrado land-cover and land-use classes, as follows: 1) crops and cultivated pastures (anthropic classes); 2) dense and mixed ombrophilous forests; semi-deciduous and deciduous forests; woodland, wooded, and shrub savannas (natural land-cover classes). In fact, each one of these physiognomies presents its own flammability behavior, which, in turn, will directly affect the detection accuracy of burned areas (Moreira, 2000; Miranda et al., 2004; Tsela et al., 2010; Bastarrika et al., 2011b).

The second part of this work aimed at the detailed assessment of the MCD45A1 commission and omission errors, based on three Landsat and one ResourceSat images randomly selected (Table 3.2 and Figure 3.1).

Table 3.2 - Landsat TM and ResourceSat LISS images utilized for the assessment of the MCD45A1 commission and omission errors.

| Year | Sensor | State | Tiles | Date |
|------|--------|--------------------|--------|------------|
| 2003 | TM | Goiás | 221/70 | 20/09/2003 |
| 2004 | TM | Goiás/Minas Gerais | 221/71 | 22/09/2004 |
| 2004 | TM | Tocantins | 222/67 | 29/09/2004 |
| 2011 | LISS3 | Maranhão/Piauí | 329/82 | 26/09/2011 |

To this end, and due to the wide distribution of small fire scars over distinct landscapes and fragmentation patterns, each image was first segmented (based on scene-specific parameters). According to the color and texture of the resultant segmentation polygons over the

Landsat and Resourcesat 1 scenes (considering images from both previous and under analysis dates), burned area training samples, depicting a variety of burning intensities, were selected and used in a non-parametric supervised classification (i.e. discrimination between burned and non-burned classes) based on the Support Vector Machine (SVM) – Kernel Radial Basis Function (Cao et. al., 2009).

The extracted burned areas from each Landsat and ResourceSat scene, after being visually inspected and manually edited, were compared against the corresponding MCD45A1 polygons. For this analysis, MOD14 and MYD14 thermal anomaly data (active fire) (Justice et al., 2006), acquired from the Center of Weather Forecast and Climatic Studies (CPTEC-INPE), were also considered (available at: <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>).

All the methodological procedures involved in this study, including data acquisition, processing, sampling, and analysis, are described in the flowchart shown in Figure 3.3.

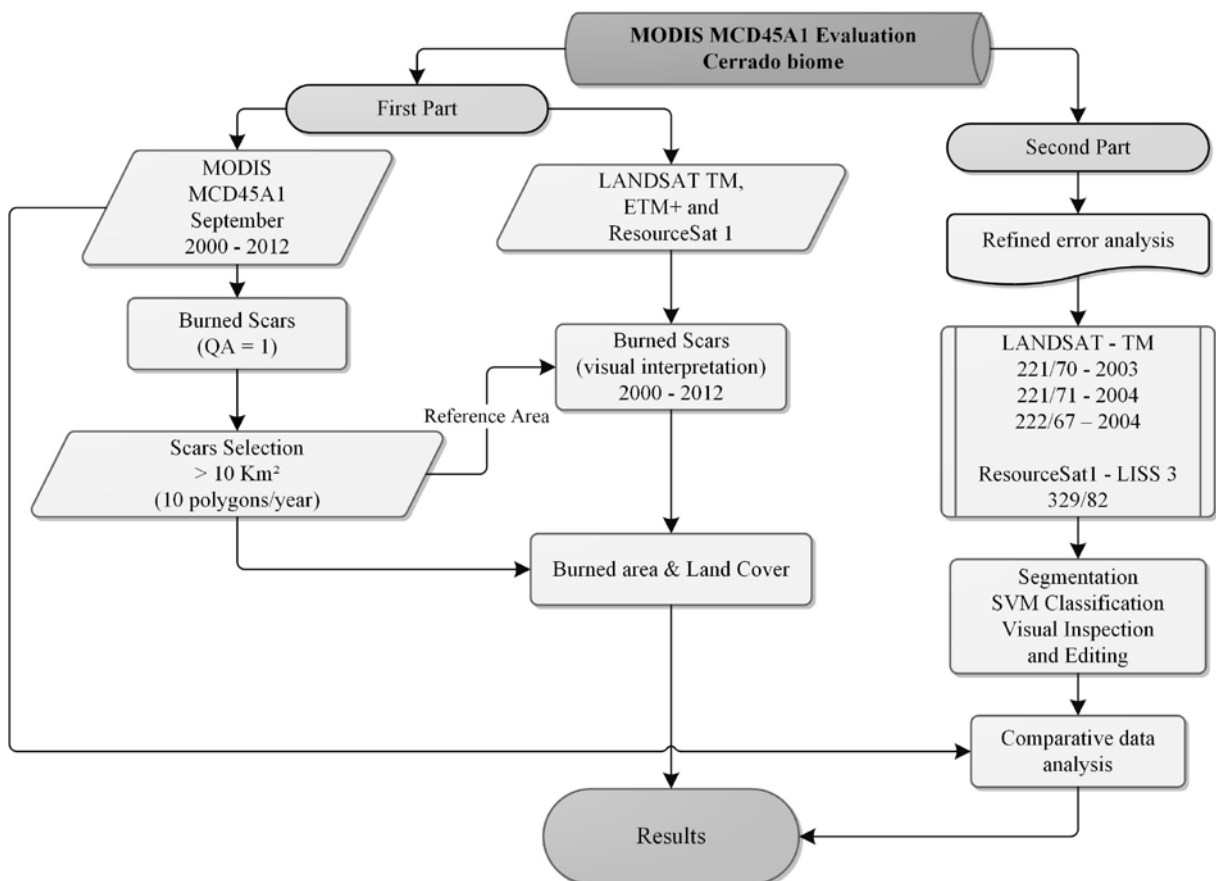


Figure 3.3 - Schematic flowchart depicting the main steps and approaches followed in this study.

3.3. Results

The annual distribution of the MCD45A1 burned areas over the entire Cerrado, for both September and the whole year, as well as the monthly distribution of burned areas detected from 2000 to 2012, are shown in Figure 3.4. As seen in Figure 3.4 (A), approximately 50% of the total burned areas detected in the period considered in our analysis were concentrated in the years 2010, 2007, and 2012, respectively. In contrast, 2009 was the year with the smallest registration of burned areas (only 1.5%). The month of September, after three months of very low precipitation, as estimated from TRMM data (Tropical Rainfall Measurement Mission) (NASA, 2009), had the largest concentration of burned areas, i.e., 39% (or 442,000 km²) (Figure 3.4B). It is worth mentioning the high correlation ($r^2 \sim 0.89$) between optical- and thermal-based detections; i.e., on a monthly basis, the total burned area is closely accompanied by MOD14 and MYD14 active fires.

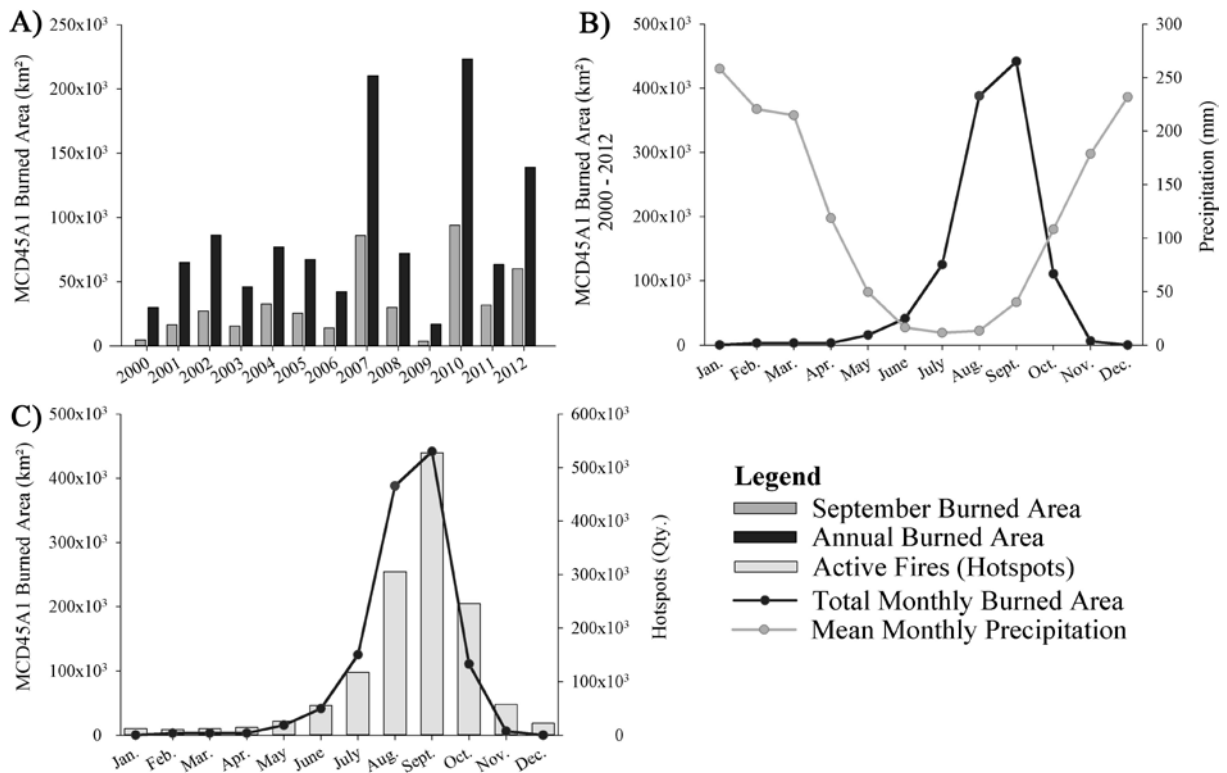


Figure 3.4 - Cerrado burned area (whole year and September only) registered by the MCD45A1 product (A), total monthly distribution (2000 to 2012 period) plotted against TRMM average monthly precipitation (B), and total monthly distribution of MOD14 and MYD14 active fires (C).

Specifically concerning the 130 randomly selected MCD45A1 polygons, all of them, according to the reference images, corresponded to actual burned areas. Nevertheless, the

precision and accuracy with which the MCD45A1 detections overlap the reference polygons was significantly affected by errors of commission and omission (Figure 3.5).

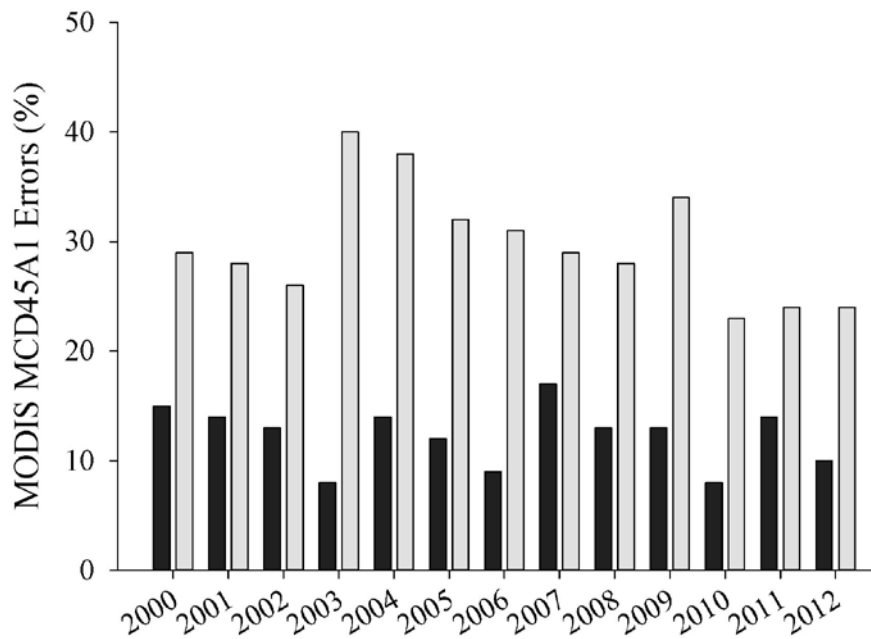


Figure 3.5 - Local MODIS MCD45A1 commission and omission errors relative to the TM, ETM+, and LISS3 reference scenes.

In spite of the difference in the burned area identified by the MODIS MCD45A1 product (4,192 km²) and the reference images (5,173 km²), a good overall correlation was observed between these two datasets ($r^2 = 0.92$) (Figure 3.6).

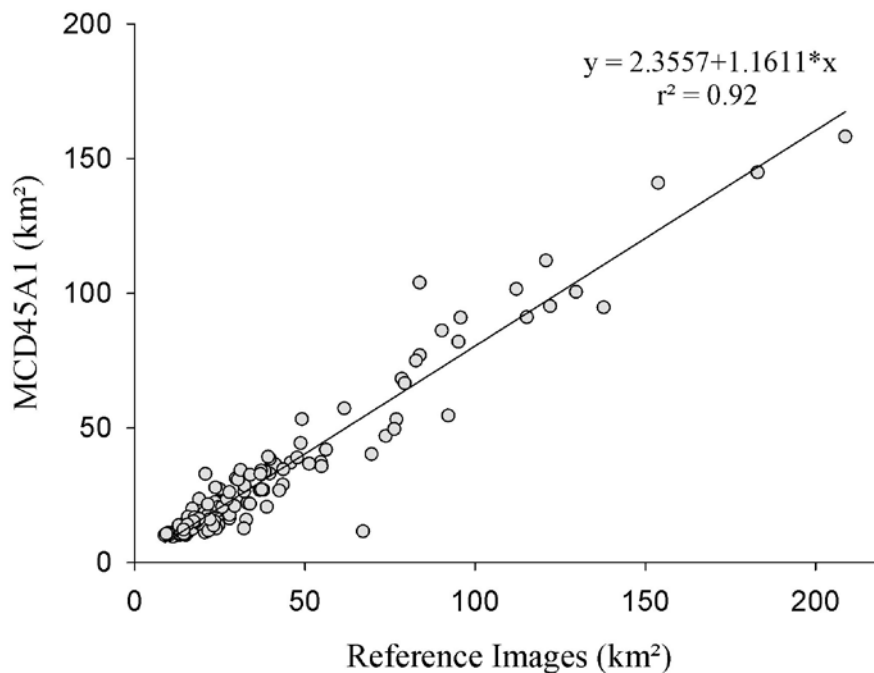


Figure 3.6 - Relationship between burned area identified by the MCD45A1 and the reference images (130 randomly selected polygons).

In order to evaluate the dependency of the MCD45A1 detection precision on the burned area size, the 130 polygons were separately according to five size classes (each with 26 polygons). While groups 1 through 4 (9.6–12 km²; 12.6–16.8 km²; 16.9–26.4 km², and 26.8–39.2 km², respectively) showed poor correlations, group 5, comprising much larger polygons (on average > 40 km²), correlated very well with the reference mapping ($r^2 = 0.85$).

Regarding the location of the 130 polygons relative to the major Cerrado land-cover / land-use classes, 86% of them occurred over natural remnant vegetation areas. The wooded and shrub Cerrado, with 45% and 23% of the samples, respectively, were the natural physiognomies most affected, followed by the Cerrado woodland and the Cerrado grassland (8% and 5% of the samples, respectively). For all these physiognomies, MCD45A1 detections compared well to the reference mapping ($r^2 = 0.92, 0.88, \text{ and } 0.98$, respectively). Regarding burnings over converted areas, the pasturelands, which encompass nearly 30% of the Cerrado biome (Sano et al., 2010), concentrated about 11% of the total MCD45A1 detections considered in this investigation, which were highly correlated to the reference polygons ($r^2 = 0.95$), with omissions at around 18%. Concerning the crop fields, only four polygons were identified, which presented higher omission error (~ 25%) relative to the Landsat-based burned areas.

In relation to the four randomly selected scenes (second phase of this study, for which only a single overpass was considered), the MCD45A1 product presented significantly high omission errors (at around 63% on average) (Table 3.3 and Figure 3.7). From table 3.3, it is interesting to observe that the larger the average size of the burned polygons in the reference images, higher tends to be the intersection between these polygons and those from the MCD45A1 product.

Table 3.3 - MODIS MCD45A1 burned area mapping and respective omission errors relative to the reference mapping (R.M).

| ResourceSat - LANDSAT | | Burned Area (km ²) | | | | Intersection MCD45A1 - R.M | |
|-----------------------|--------|--------------------------------|-------------|---------|-------------|----------------------------|----|
| Sensor | Scene | Visual inspection | Area (avg.) | MCD45A1 | Area (avg.) | Area (km ²) | % |
| LISS3 | 329/82 | 3,265 | 1.3 | 1,040 | 1.9 | 698 | 21 |
| TM | 221/71 | 2,351 | 0.38 | 894 | 2.4 | 470 | 20 |
| TM | 221/70 | 1,250 | 0.73 | 520 | 1.8 | 236 | 19 |
| TM | 222/67 | 5,071 | 0.94 | 1,849 | 3 | 1,265 | 25 |

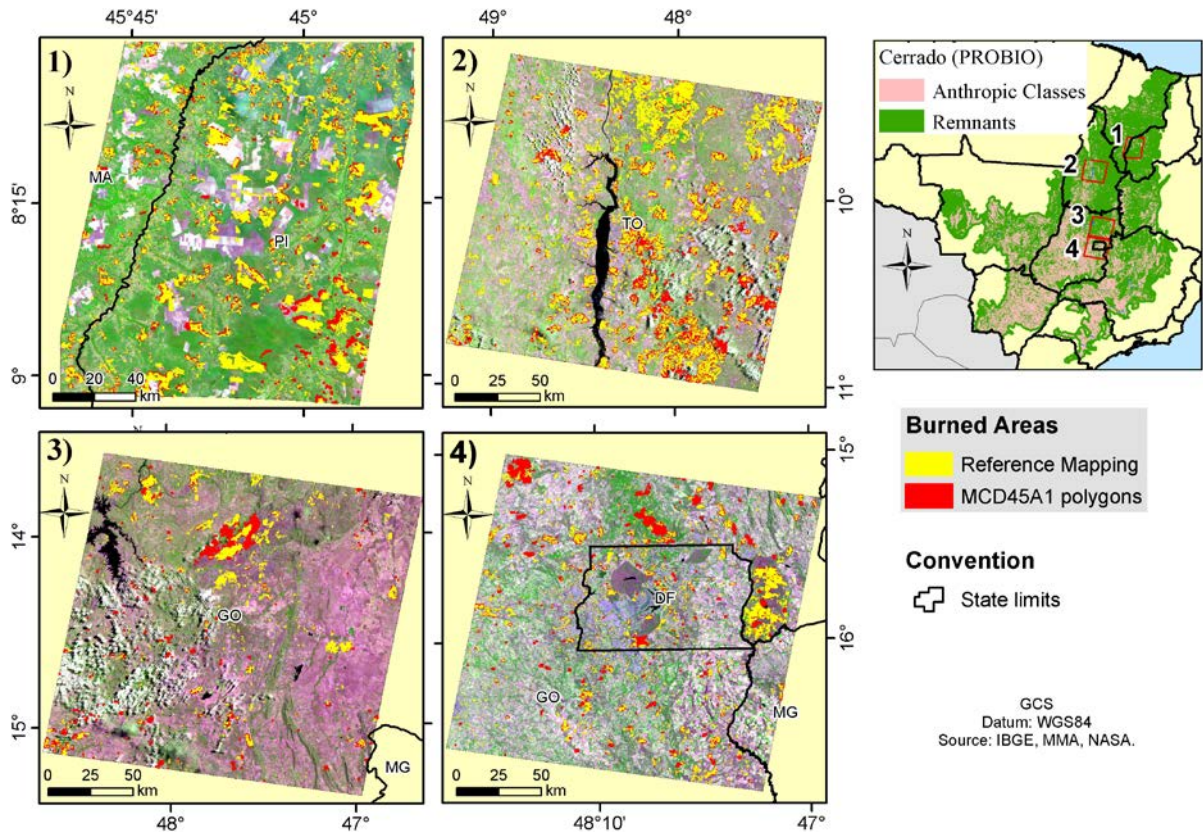


Figure 3.7 - Spatial distribution of burned area, according to the reference mapping: orbital images LISS3 329/82 (1), TM 222/67 (2), TM 221/70 (3), and. TM 221/71 (4) (yellow limits) and MCD45A1 detections (red polygons).

Figure 3.8 shows the intersection between burned areas (MCD45A1 and reference images) with thermal anomalies associated with active fires. On average, 40% and 25% of the hotspots (MOD14 and MYD14 products) intersect with the areas mapped, respectively. Within a 1 km buffer, these intersections increase, on average, to 80% and 63%, respectively. It is worth mentioning that these intersections are more frequent for the images showing larger burned vegetation fragments.

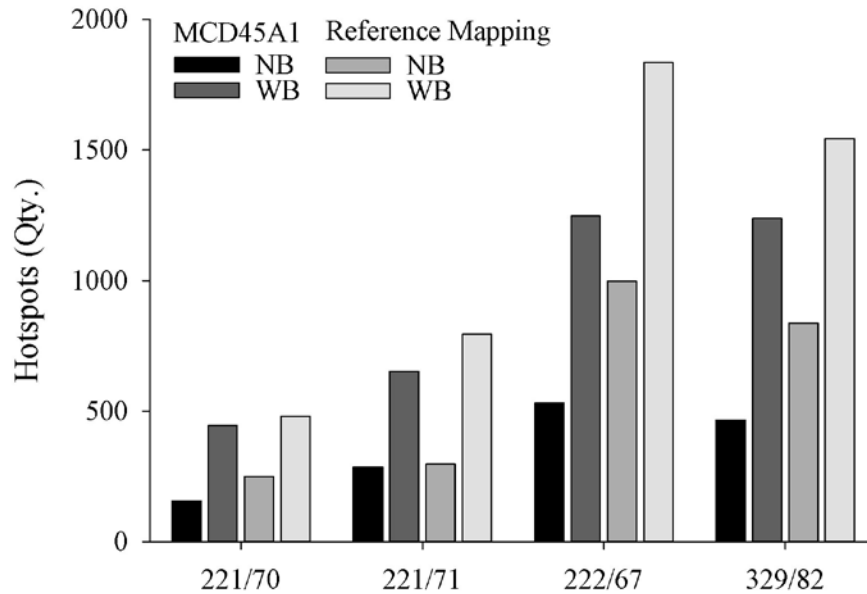


Figure 3.8 - Hotspot intersection (active fires) with the reference mapping and MCD45A1 burned areas (with – WB - and without – NB - buffer).

3.4. Discussion

The Cerrado, the main agricultural frontier in the country (Lambin et al., 2013), is marked by severe fire activity, particularly along the Amazon-Cerrado transition (in the so-called Arc of Deforestation region). Compared to the other biomes, the Cerrado also presents distinct vegetation burning patterns along the year, particularly during its dry season, due to the large landscape fragmentation in its south-central portion (South of Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, and São Paulo), comprised of large agricultural fields, and large vegetation remnants in its north-central region (Bahia, north of Goiás, Maranhão, Piauí, and Tocantins) (Araújo et al., 2012). As one could expect, the Cerrado fire regime is very close to that found in the African savannas, i.e. concentration of burnings between July and September, when there is a rapid increase in the dry herbaceous biomass, and the key role played by anthropogenic factors (Archibald et al., 2010). Therefore, the validation of global burned area products in savannic environments prioritize the dry season (as is the case in our study), when the prevalent high quality satellite observations coincide with the peak of the fire activity (Roy e Boschetti, 2009).

On the other hand, and as opposed to the numerous validation and monitoring exercises conducted in the African continent, the very few attempts to monitor burned areas in the Cerrado, at the landscape scale, have been based exclusively on the MODIS burned area product, for which very little is known regarding precision, accuracy, and detection limits. As our results show, the discrepancies in shape and size observed between overlapping MCD45A1

and reference polygons, in addition to considerable differences in Landsat and MODIS field-of-view (~ 276 times), can also be attributed to the delays between the occurrence of the fires and the satellite overpass (up to 30 days), a period sufficiently long for the spread of ashes to adjacent areas, fixing of nutrients in the soil and initial recovery of burned areas (Krug et al., 2004; Chuvieco et al., 2008; Tsela et al., 2010).

Regarding the clear dependency of the MCD45A1 detection precision on the burned area size, this is in agreement with different studies, which have indicated the limitation of global / continental burned area products in mapping areas smaller than 2 km² (Roy et al., 2005; Loboda et al., 2007; Giglio et al., 2009; Randerson et al., 2012). In fact, this seems to be the case behind the higher MCD45A1 omission error (observed over crop fields comparatively to cultivated pastures), i.e. burnings of crop residues tend to be better controlled and circumscribed to smaller locations, which makes the detection of fire scars more difficult and prone to errors (Hely et al., 2001; McCarty et al., 2009). Burned area size also seems to be the determining factor concerning the detection precision over natural Cerrado remnants, in spite of the significant differences in woody and herbaceous components found in the Cerrado woodland, wooded Cerrado, shrub Cerrado, and Cerrado grassland physiognomies.

The very high omission error of the MCD45A1 product (~ 63%, on average) relatively to the four randomly selected scenes (Table 3.3) seems to be directly dependent on the landscape patterns, structures, and overall conditions depicted in each reference image. Likewise, it is important to consider the detection limit of the MCD45A1 product (> 0.5 km²), which is very close to the average size of the reference burned polygons, which were based on supervised classification and detailed visual inspection and editing (Table 3.3). Thus, the largest omissions were associated with scenes 221/71, over highly fragmented landscapes, and 221/70, for which clouds and smoke plumes from active fires may have affected observations from both Landsat and MODIS overpasses. On the other hand, the MCD45A1 detections tended to be more accurate for scenes 222/67 and 329/82, in which larger and more connected remnant vegetation fragments predominate (Figure 3.7).

It should be emphasized that the development and improvements of global burned area algorithms are driven by reducing overestimation (i.e. commission errors), which is considered a critical factor in determining GHG emissions and other burning related environmental impacts. Such conservative approach in establishing detection thresholds, on the other hand, tends to result in high omission errors. As Roy e Boschetti (2009) demonstrated for the southern region of the African continent, the MODIS MCD45A1 product, compared to 11 Landsat scenes, was

much less affected by commission than by omission errors (~ 60%, on average, which is very close to the mean omission error found in our study).

Although underestimating the total burned area for the majority of its highest quality observations (pixels), the precision of the MCD45A1 product must be emphasized; i.e., the automated generated polygons are mostly coincident with areas that have been actually burned (Figure 3.9). In savannic environments, as is the case of the Brazilian Cerrado and African Miombo, the precision regarding the detection of burned areas depends on the severity of the burning, whereas medium to high intensity combustions and satellite overpasses closer in time to the fire front result in more accurate mappings (Figure 3.9C). On the other hand, the longer the interval between the occurrence of a given burning and the acquisition date, the less precise will be the image-based / automated identifications, as the regeneration and modifications of the affected areas start immediately after the fire front ceases.

Global products (available at moderate spatial resolutions) are not expected to provide data at nearly 100% accuracy. Instead, global datasets are primarily conceived and made available in support of consistent spatial-temporal mappings at regional scales. As in the case of the Cerrado, the 2000 – 2012 MCD45A1 burned area data allowed the identification of periods with most intensive fire activity, as well as the precise location of burnings over distinct territories and ecosystems.

Trigg e Roy (2007), via discussion groups (encompassing governmental decision makers, as well as stakeholders from the academic and private sectors) assessed how accuracy is perceived and valued by experts in remote sensing and end-users. While there was no agreement on what should be acceptable regarding the accuracy of satellite-based products for fire monitoring, a clear consensus was formed around the need of spatial-temporal consistency in the information from fire hotspots and burned area time-series.

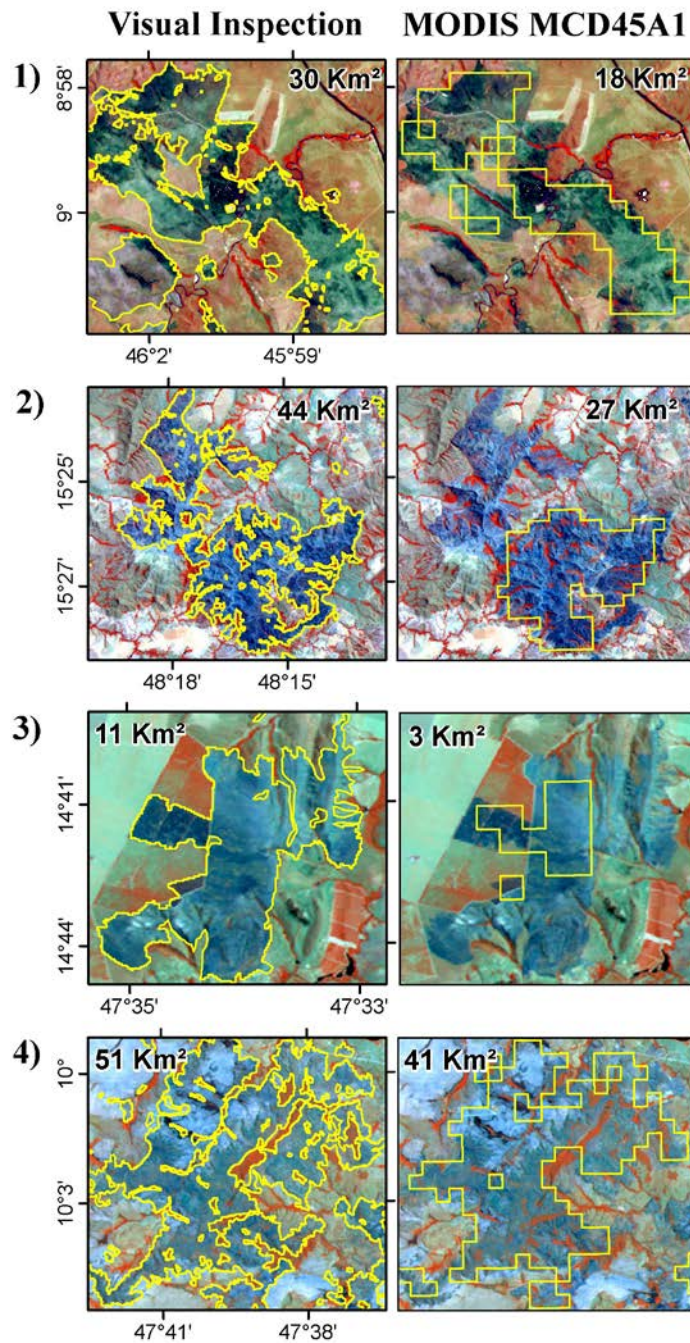


Figure 3.9 - Examples of the MCD45A1 product accuracy and precision relative to the reference mapping: orbital images LISS3 329/82 (A), TM 221/71 (B), TM 221/70 (C), and TM 222/67 (D).

Randerson et al. (2012) estimated that if the small burnings were properly accounted for, the total burned area at a global scale could increase from 24% to 54%, which would represent an increment of about 35% in the total emissions. These small burnings predominate at the beginning and end of the dry season, when high moisture levels, in both soil and vegetation, limit the spread of fire. In contrast, very low humidity values in the middle of the dry season favor optimum biomass combustion and the fast spread of fires over large regions (Laris, 2005).

On the other hand, the significant association between burned areas and thermal anomalies (Figure 3.8), particularly over larger vegetation patches, confirms what has been already observed in other studies, i.e. the combined use of optical and thermal data can be instrumental in reducing both omission and commission errors (Morissette et al., 2005; Chuvieco et al., 2008; Giglio et al., 2006; 2009; Randerson et al., 2012; McCarty et al., 2009), as might be the case in different Cerrado regions that are highly fragmented due to agricultural activities and urban growth.

3.5. Conclusions

The systematic detection of fire scars in the Brazilian central savanna biome is of fundamental importance for estimating regional carbon emissions to the atmosphere. So far, such large-scale mapping attempts, limited in number and of unknown accuracy and precision, have been based on the use of the MODIS burned area product (MCD45A1). Thus, this study focused on the first performance assessment of this global data product over the distinct Cerrado physiognomies and landscapes.

Compared to the Landsat-based reference mapping, the MCD45A1 product performed well regarding the detection of medium and large size areas, considering both the natural and anthropic Cerrado land-cover classes ($r^2 = 0.92$). On the other hand, significant omission errors (as much as 68%) were associated to the small burnings, which, related to the different levels of fragmentation that characterize the Cerrado landscapes, are, in general, below the MODIS detection limit ($\sim 0.5 \text{ km}^2$).

Among the several limitations that global burned area products present, the long composite cycles, such as the 30-day data acquisition period required by the MCD45A1 product, is a major constraint (Chuvieco et al., 2008). Nevertheless, the combined use of daily fire hotspots (e.g. MOD14 and MYD14) and optical-based area determination may result in more accurate burned scar estimations, as well as improved assessments of the omissions related to small area burnings. Specifically, our results confirmed a strong correlation ($r^2 = 0.89$) between burned scars and hotspots up to 1km distance.

In this perspective, we highlight the new MODIS collection 6 MCD64A1 product (based on the integration of optical and thermal data) (Giglio et al., 2009), which is anticipated to substantially improve burned area detection, specially in dense vegetated areas (e.g. dense Cerrado *stricto sensu* and Cerrado woodland physiognomies), where the overstory, in addition to the interference of smoke plumes and clouds, strongly attenuates the fire optical signal.

Likewise, the new Suomi NPP VIIRS 375m active fire product (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite, onboard the Suomi National Polar-orbiting Partnership) is expected to consistently increase the sensitivity to thermal anomalies, compared to MODIS, in about 25%, which should also result in more precise and accurate small burning detection and mapping (Schroeder et al., 2014). Thorough investigations on the performance of these new products, as soon as they become readily available, will be necessary in order to use them, in a fully operational manner, as the basis of a more systematic and spatially detailed mapping of natural and anthropogenic fire activity and impacts in the savanna environments of Brazil.

For now, it is important to emphasize the fact that the MCD45A1 product, in spite of its spatial limitations, has been instrumental for understanding the fire impacts on the Cerrado landscapes, regarding both scar distributions and fire behavior in support of more effective territorial and environmental governance of this threatened biome.

Acknowledgments

This study was conducted with support from the State of Goiás Science Foundation (PRONEX/FAPEG/CNPq, grant #471198/2009-9), the Brazilian Financing Agency for Studies and Projects (FINEP/CT-Hidro), and the NASA Land-Cover/Land-Use Change Program (grant #201200766130154). The authors also acknowledge the Brazilian Research Council (CNPq) for individual research grants.

3.6. References

ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution patterns of burned area in the Brazilian biomes: an analysis based on satellite data for the 2002-2010 period. **Remote Sensing**, vol. 4 (7), 2012. p. 1929–1946.

ARCHIBALD, S.; SCHOLES, R. J.; ROY, D. P.; ROBERTS, G.; BOSCHETTI, L. Southern African fire regimes as revealed by remote sensing. **International Journal Wildland Fire**, vol. 19(7), 2010. p. 861–878.

BASTARRIKA, A.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. **Remote Sensing of Environment**, vol. 115, 2011. p. 1003–1012.

BASTARRIKA, A.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, M. P. Automatic burned land mapping from MODIS time series images: assessment Mediterranean ecosystems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 49 (9), 2011. p. 3401–3413.

- BOSCHETTI, L.; ROY, D.; BARBOSA, P.; BOCA, R.; JUSTICE, C. A MODIS assessment of the summer 2007 extent burned in Greece. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 29 (8), 2008. p. 2433–2436.
- CAO, X.; CHEN, J.; MATSUSHITA, B.; IMURA, H.; WANG, L. An automatic method for burn scar mapping using support vector machines. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 30 (3), 2009, p. 577–594.
- CASTRO, L. H. R.; MOREIRA, A. M.; ASSAD, E. D. Definition and regionalization of pluviometric patterns in Brazilian Cerrado, in: Assad, E.D. (Ed.), **Chuva nos Cerradões: Análise e Espacialização**. Embrapa Cerrados, Brasília, 1994. p. 13–23.
- CHUVIECO, E.; OPAZO, S.; SIONE, W.; DEL VALLE, H.; ANAYA, J.; DI BELA, C.; CRUZ, I.; MANZO, L.; LÓPEZ, G.; MARI, N.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; et al. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data. **Ecological Applications**, vol. 18 (1), 2008. p. 64–79.
- FRANÇA, H.; SETZER, A. AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 22 (13), 2001. p. 2449–2461.
- GIGLIO, L.; DESCLOITRES, J.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol. 87, 2003. p. 273–282.
- GIGLIO, L.; VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. **Atmospheric Chemistry and Physics**, vol. 6, 2006. p. 957–974.
- GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D.P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C.O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. **Remote Sensing of Environment**, vol. 113, 2009. p. 408–420.
- HANTSON, S.; PADILLA, M.; CORTI, D.; CHUVIECO, E. Strengths and weaknesses of MODIS hotspots to characterize global fire occurrence. **Remote Sensing of Environment**, vol. 131, 2013. p. 152–159.
- HÉLY, C.; FLANNIGAN, M.; BERGERON, Y.; MCRAE, D. Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems. **Canadian Journal of Forest Research**, vol. 31 (3), 2001. p. 430–441.
- ICE, G. G.; NEARY, D. G.; ADAMS, P. W. Effects of wildfire on soils and watershed processes. **Journal of Forestry**, Vol. 102 (6), 2004. p. 16–20.
- JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 36 (4), 1998. p. 1228–47.

- JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. E.; SALEOUS, N.; ROY, D. P.; MORISETTE, J. T. 2002a. An overview of MODIS land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, 2002a. p. 3–15.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZIA, S.; OWENSA, J.; MORISETTE, J. T.; ROYA, D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUMED, S.; PETITCOLINE, F.; KAUFMAN, Y. 2002b. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, vol. 83, 2002b. p. 244–262.
- JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; CSISZAR, I.; MORISETTE, J.; KAUFMAN, Y. 2006. **MODIS Fire Products—Algorithm Technical Background Document, Version 2.3**. 2006. Available at: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf. Accessed: 17 Jan. 2012.
- KEELEY, J. E. Fire severity and plant age in postfire resprouting of woody plants in sage scrub and chaparral. **Madroño** 53, 2006. p. 373–379.
- KOUTSIAS, N.; KARTERIS, M. 1998. Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 19, 1998. p. 3499–3514.
- KEY, C. H. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. **Fire Ecology**, Vol. 2 (2), 2006. p. 34–59.
- KEY, C. H.; BENSON, N. C. Landscape assessment (LA): sampling and analysis methods, in: LUTES, D. C.; KEANE, R. E.; CARATTI, J. F.; KEY, C. H.; BENSON, N. C.; SUTHERLAND, S.; GANGI, L.J. (Org.); **FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system**. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006, p. LA1–LA51.
- KRUG, T.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; DOS SANTOS, J. R. Burned area, recurrence of fires and permanence of burnt scars in selected areas of the Brazilian Cerrado using TM-Landsat imagery. In **Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents**, Istanbul, Turkey, 2004, p. 243–246.
- LAMBIN, E. F.; GIBBS, H. K.; FERREIRA, L.; GRAU, R.; MAYAUX, P.; MEYFROIDT, P.; MORTON, D. C.; RUDEL, T. K.; GASPARRI, I.; MUNGER, J. Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. **Global Environmental Change**, vol. 23, 2013. p. 892-901.
- LARIS, P. S. Spatiotemporal problems with detecting and mapping mosaic fire regimes with coarse-resolution satellite data in savanna environments. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 99 (4), 2005, p. 412–424.
- LIBONATI, R., DACAMARA, C. C., PEREIRA, J. M. C., PERES, L. F. Retrieving middle-infrared reflectance for burned area mapping in tropical environments using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 114, 2010. p. 831–843.

LOBODA, T.; O'NEAL, K. J.; CSISZAR, I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 109 (4), 2007. p. 429–442.

LONGO, K.; FREITAS, S.R.; ANDREAE, M. O.; YOKELSON, R.; ARTAXO, P. Biomass burning in Amazonia: Emissions, long-range transport of smoke and its regional and remote impacts, in: Gash, J., Keller, M., Bustamante, M., Silva Dias, P. (Org.), **Amazonia and Global Change**. American Geophysical Union Press. 2009.

MCCARTY, J. L.; KORONTZI, S.; JUSTICE, C. O.; LOBODA, T. The spatial and temporal distribution of crop residue burning in the contiguous United States. **Science of the Total Environment**, Vol. 407, 2009. p. 5701–5712.

MENEZES, L. C. C. R.; ROSSI, M. N. Seed germination after fire: a study with a plant inhabiting non-fire-prone areas. **Phyton (B. Aires)**, Vicente López, vol. 80 (2), 2011. p. 153–160.

MERINO-DE-MIGUEL, S.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; HUESCA, M.; ARMENTERAS, D.; FRANCO, C. MODIS reflectance and active fire data for burn mapping in Colombia. **Earth Interactions**. Vol.15, 2011. p. 1–17.

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A.; HARUDASAN, M.; MORAIS, H. C. Queimadas de Cerrado: Caracterização e Impactos. **Cerrado: Ecologia e Caracterização**, in: Aguiar, L.M.S., Camargo, A.J.A. (Eds.), Embrapa Cerrados. Planaltina, Brasil, 2004. p. 69–123.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/MMA/SBF. **Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado, Relatório Final**; Edital Probio 02/2004; Projeto Executivo B.02.02.109, Brasília, Brasil. 2007.

MOREIRA, A. G. Effects of fire protection on savanna structure in Central Brazil. **Journal of Biogeography**, Vol. 27, 2000. p. 1021–1029.

MORISSETTE, J. T.; GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; SETZER, A.; SCHROEDER, W.; MORTON, D.; JUSTICE, C. O. Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms. **Earth Interactions**, Vol. 9 (9), 2005. p. 1–25.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Monthly 0.25 × 0.25 TRMM and Other Sources Rainfall**. NASA Distributed Active Archive Center. Goddard Space Flight Center Earth Science, Greenbelt, MD, USA, 2009. Available at: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/>. Accessed: 20 Dec. 2011.

PEREIRA, J. M.; SA, A. C.; SOUSA, A. M.; SILVA, J. M.; SANTOS, T. N.; CARREIRAS, J. M. Spectral characterization and discrimination of burnt areas; in: Chivieco, E. (Ed.), **Remote sensing of large fires**, 1999. p. 123–138.

PIVELLO, V. R.; OLIVEIRAS, I.; MIRANDA, H. S.; HARUDASAN, M.; SATO, M. N.; MEIRELLES, S. Effect off fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. **Plant Soil**, vol. 337, 2010. p. 111–123.

PIVELLO, V. R. The use of fire in the Cerrado and Amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, vol. 7 (1), 2011. p. 24-39.

RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; COLLATZ, G. J.; GIGLIO2005.; STILL, C. J.; KASIBHATLA, P.; MILLER, J. B.; WHITE, J. W. C.; DEFRIES, R. S.; KASISCHKE, E. S. Fire emissions from C₃ and C₄ vegetation and their influence on interannual variability of atmospheric CO₂ and δ¹³CO₂. **Global Biogeochemical Cycles**, vol 19 (GB2019), 2005. p. 1–13.

RANDERSON, J. T.; CHEN, Y.; VAN DER WERF, G. R.; ROGERS, B. M.; MORTON, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal Geophysical Research**, vol. 117 (G04012), 2012. p. 1–23.

ROMÁN-CUESTA, R. M.; RETANA, J.; GRACIA, M.; RODRIGUEZ; R. A quantitative comparison of methods for classifying burned areas with LISS-III imagery. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 26 (9), 2005. p. 1979–2003.

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**, vol. 83, 2002. p. 263–286.

ROY, D. P.; JIN, Y.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 97, 2005. p. 137–162.

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**, Vol. 112, 2008. p. 3690–3707.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. Southern Africa validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon burned-area products **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 47 (4), 2009. p. 1–13.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring Assessment**, Vol. 166, 2010. p. 113–124.

SCHROEDER, W.; PRINS, E.; GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; SCHMIDT, C.; MORISETTE, J. T.; MORTON; D. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data. **Remote Sensing of Environment**, vol. 112, 2008. p. 2711–2726.

SCHROEDER, E.; OLIVA, P.; GIGLIO, L.; CSISZAR, I. A. The new VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. **Remote Sensing of Environment**, vol. 143, 2014. p. 85-96.

SILVA, J. M. N.; SÁ, A. C. L.; PEREIRA, J. M. C. Comparison of burned area estimates derived from SPOT-VEGETATION and Landsat ETM+ data in Africa: Influence of spatial pattern and vegetation type. **Remote Sensing of Environment**, vol. 96 (2), 2005. p. 188–201.

SOJA, A. J.; SUKHININ, A. I.; CAHOON Jr, D. R.; SHUGART, H. H.; STACKHOUSE Jr, P. W. AVHRR-derived fire frequency, distribution and area burned in Siberia. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 25 (10), 2004. p. 1939–1960.

STROPPIANA, D.; BORDOGNA, G.; BOSCHETTI, M.; CARRARA, P.; BOSCHETTI, L.; BRIVIO, P. A. Positive and negative information for assessing and revising scores of burn evidence. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 9 (3), 2012. p. 363–367.

TANSEY, K.; GREGOIRE, J. M.; STROPPIANA, D.; SOUSA, A.; SILVA, J.; PEREIRA, J. M. C.; BOSCHETTI, L.; MAGGI, M.; BRIVIO, P. A.; FRASER, R.; FLASSE, S.; ERSHOV, D.; BINAGHI, E.; GRAETZ, D.; PEDUZZI, P. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT-VEGETATION data. *Journal Geophysical Research*, Vol. 109 (D14S03), 2004a. p. 1–22.

TANSEY, K.; GRÉGOIRE, J. M.; BINAGHI, E.; BOSCHETTI, L.; BRIVIO, P. A.; ERSHOV, D.; FLASSE, S.; FRASER, R.; GRAETZ, D.; MAGGI, M.; PEDUZZI, P.; PEREIRA, J. O.; SILVA, J.; SOUSA, A.; STROPPIANA, D. A global inventory of burned areas at 1 km resolution for the year 2000 derived from Spot Vegetation data. *Climatic Change*, vol. 67 (Ed. 2-3), 2004b. p. 345–377.

TSELA, P. L.; VAN HELDEN, P.; FROST, P.; WESSELS, K.; ARCHIBALD, S. Validation of the MODIS burned-area products across different biomes in South Africa. *Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010, p. 3652–3655.

4. Distribution Patterns of Burned Areas in the Brazilian Biomes: An Analysis Based on Satellite Data for the 2002–2010 Period

Fernando Moreira de Araújo
Universidade Federal de Goiás – UFG
fernandomsbl@gmail.com

Laerte Guimarães Ferreira Júnior
Universidade Federal de Goiás – UFG
laerte@ufg.br

Abstract

Fires modify the structure of vegetation communities, the carbon and water cycles, the soil's chemistry, and affect the climate system. Within this context, this work aimed to understand the distribution patterns of burned areas in Brazil, during the period of 2002 to 2010, taking into consideration each one of the six Brazilian biomes (Amazon, Caatinga, Cerrado, Atlantic Forest, Pampa and Pantanal) and the respective major land cover classes. Data from the MODIS MCD45A1 product (burned area), as well as thermal anomalies (MOD14 and MYD14) and precipitation (TRMM), were analyzed according to the 2002 Brazilian official land cover and land use map (PROBIO). The Brazilian savanna biome, known as Cerrado, presented the largest concentration of burned areas detected by MODIS (73%), followed by the Amazon (14%), Pantanal (6%), Atlantic Forest (4%), Caatinga (3%), and Pampa (0,06%) biomes. Indeed, in the years of 2007 and 2010, 90% and 92% of Brazil's burned areas were concentrated in the Cerrado and Amazon biomes, respectively. TRMM data indicated that during these two years there was a significant influence of La Niña, causing low rainfall in the Amazon, Cerrado, Caatinga, and Atlantic Forest biomes. Regarding the land cover classes, approximately 81% of the burned areas occurred over remnant vegetation areas. Although no unequivocal correlation can be established between burned areas and new land conversions, the conspicuous concentration of fire scars, particularly in Amazon–Cerrado transition (*i.e.*, the Arc of Deforestation) is certainly not a simple coincidence. Such patterns and trends corroborate the need of improved territorial governance, in addition to the implementation of systematic fire warning and preventive systems.

Keywords: burned areas; Brazilian biomes; MCD45A1; land cover change

4.1. Introduction

Fires, generally of anthropogenic origin, affect the distribution of global ecosystems by modifying the structure of vegetation communities and interfering with the reproduction and survival mechanisms of living species. Moreover, burns disturb the soil's chemistry, the carbon and water cycles, as well as the climate system through the release of greenhouse gases (Jin, 2010; Bond et al., 2005). According to van der Werf et al. (2004) and Bowman et al. (2009), during the period of 1997 to 2001, about two thirds of the emitted atmospheric CO₂ and

aerosols anomalies can be attributed to the increase in fire activity during the 1997 and 1998 El Niño years.

The rise of these gases, particularly CO₂, can induce stomatal closure, decreasing the transpiration of the canopy and the latent heat flow of the landscape (Field et al., 1995). Also, the increase in the concentration of aerosols from fires reduces the amount of solar radiation that reaches the surface, in a process called solar-dimming, reducing pan evaporation (Roderic e Farquhar, 2002). Indeed, the release of black carbon aerosols from biomass burning is the second most important factor impacting the climate system, as the increase in black carbon aerosols disturbs the atmospheric vertical wind circulation and hinders the formation of clouds, subsequently decreasing rainfall (Ramanathan e Carmichael, 2008; Freitas et al., 2005). In addition, fires, by inducing changes in the land cover and leaf area, cause both a reduction in the canopy evaporation and transpiration, as well as an increase in the soil evaporation, as a result of the greater incidence of sunlight.

The factors controlling the occurrence and spread of fire are high temperatures, which trigger a greater degree of evapotranspiration and, in turn, reduces the moisture content of vegetation, the duration of the dry season, which determines the amount of fuel to be used, as well as the burning perimeter, the frequency of lightning, and high winds that prompt abrupt shifts in fire direction and speed (Jin, 2010). On the other hand, anthropogenic related variables, such as land tenure structure, land use and management, and road network density, while significantly contributing to fire incidence, also impose, via landscape fragmentation and grazing intensity, constraints to its spreading (Archibald et al., 2009). The integrated knowledge of these factors is of fundamental importance for the development of warning systems to prevent large fires from spreading to rural and urban areas, where biomass burning pose great health risks, such as the development of ophthalmic, dermatological, heart, and lung conditions (Mims, 1997; Kunii, 1999; Ribeiro e Assunção, 2002; Cançado, 2003; Arbex et al, 2003; Mascarenhas et al., 2008; Mendonça et al., 2004; Ribeiro, 2008).

Between 2001 and 2002, the total estimated global burned area was 3.7 million km² (Roy et al., 2008). South America responded to at least 172,000 km² (Roy et al., 2008; Chang et al., 2009), e.g., 5% of the total burned area, from which, 63% were concentrated in Brazil (Bella et al, 2006). The concentration of fires in South America, as well as in Africa and Australia (1.4 million km² between 2001–2002), is associated with their vast savanna ecosystems (Bond et al., 2005), characterized by long dry seasons, high temperatures, and low precipitation. In contrast, the diversity and size of plant species found in tropical forests, as well as its shorter

dry period, tend to reduce fire frequency and spread (Uhl e Kauffman, 1990; Ratter, 1992; Kauffman et al., 1993).

Among the six Brazilian biomes (Cerrado, Amazon, Atlantic Forest, Pantanal, Caatinga, and the Pampas), the Cerrado, a humid savanna with an average annual rainfall ranging from 800 to 2000 mm (Ratter et al., 1997; Silva et al., 2008), is the most adapted to fires. In fact, germination and flourishing of many endemic species, and soil nutrients recycling, depend on the occurrence of natural fires (França e Setzer, 2001; Coutinho, 2006). However, the continued slash-and-burn practices, through high temperature fires in order to open new areas for agriculture and pasture, also leads to the loss of nutrients, soil compaction and erosion, and loss of flora and fauna (Klink e Machado, 2005; Certini, 2005).

In this study, based on moderate resolution satellite data encompassing the 2002–2010 period, we investigated, as a preliminary and exploratory approach, the overall temporal and spatial distribution patterns of burned areas in the entire Brazilian territory, according to its major land cover types.

4.2. Experimental Design

This study, at the biome scale, and in agreement with the limits proposed by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and the Ministry of the Environment (MMA), mainly relies on the map of natural vegetation coverage and land usage (PROBIO) (Conservation and Sustainable Use of Brazilian Biological Diversity Project—shapefiles and Landsat images freely available at: <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>), based on the classification and visual interpretation of 450 Landsat—ETM scenes from 2002 (MMA, 2007), and on burned area data obtained from the MODIS MCD45A1 product (collection 5), which is freely available through REVERB (<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb>), with a spatial resolution of 500 m and temporal resolution of 30 days (Roy et al., 2008; Rivera-Lombardi, 2009; Boschetti et al., 2009). Using the MRT tool (MODIS Reprojection Tools) (USGS, 2011), all the images acquired for Brazil between 2002 and 2010 were converted to GeoTIFF format, re-projected to geographic coordinates, and mosaicked.

Among the eight MCD45A1 sub-products, in our analysis, we specifically selected the Burn Date images, screened on a pixel basis according to the burned area quality assurance flags, so that only highly reliable observations were considered. Regarding the MCD45A1 validation, Boschetti *et al.* (2008) confirmed it to be highly accurate relative to the data generated under the EFFIS (The European Forest Fires Information Service), as both products mapped a

common area of 2,429 km², which represents 83% and 89% of the total burned area, respectively (e.g. MCD45A1 2,927 km² and EFFIS 2,722 km²). In another study (Roy et al., 2009), the MCD451A presented a more accurate mapping of smaller fragments of burn scars compared to the L3JRC products (Developed in collaboration between the University of Leicester, UK, Université Catholique de Louvain, Belgium, the Institute of Tropical Research, Portugal, and the Joint Research Centre of the European Commission, Italy) and GlobCarbon (Burned area product developed by the European Space Agency-ESA), due to factors such as more precise calibration and geolocation, improved atmospheric correction and cloud masking, and a higher spatial resolution.

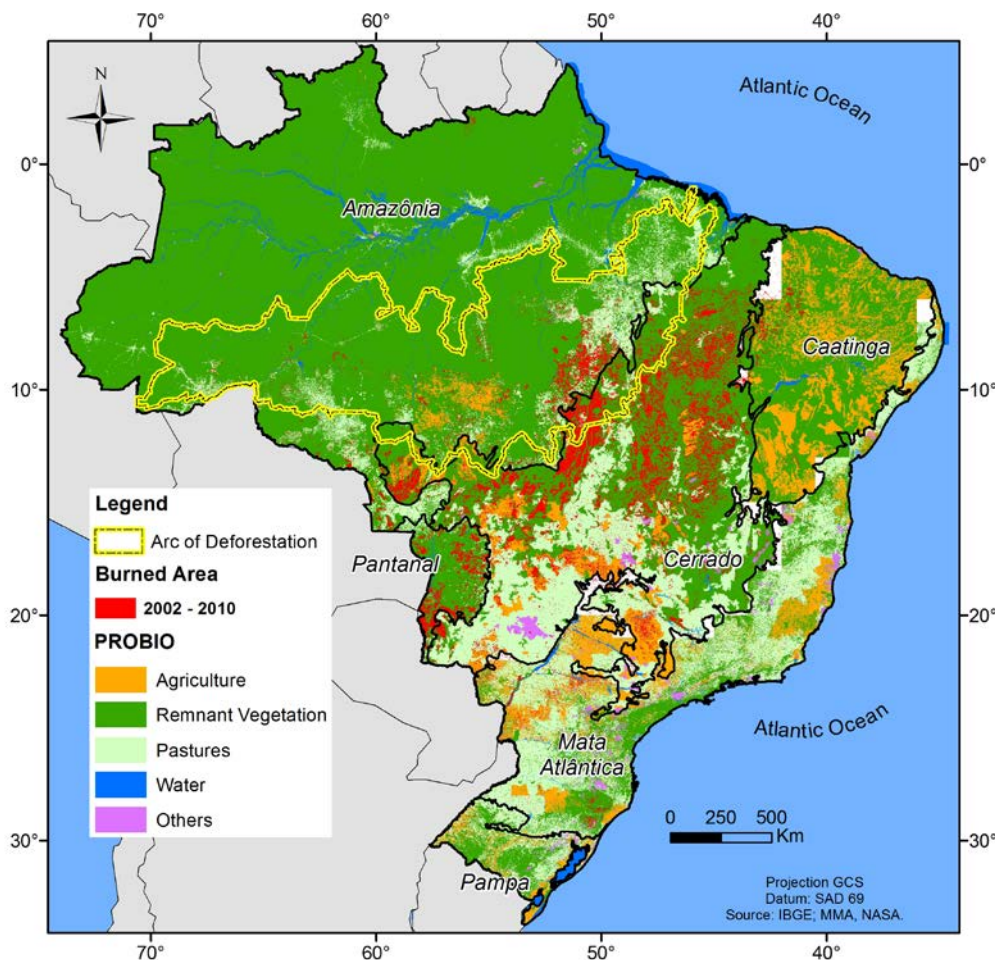


Figure 4.1 - Spatial distribution of the total burned area (2002–2010) within the six Brazilian biomes, relative to the major land cover and land use classes (PROBIO) (Arc of deforestation limits provided by the Brazilian Environmental Agency (IBAMA)).

Based on the intersection of the MCD45A1 burn scars with the limits of each biome (Amazon, Caatinga, Cerrado, Atlantic Forest, Pampa, and Pantanal), it was possible to quantify

the proportion of burned area between 2002 and 2010, in relation to the respective land cover and land use classes (Figure 4.1).

At each biome, the PROBIO natural vegetation physiognomies were grouped into a single class, designated remnant vegetation (Figure 4.1). Concerning the converted areas, three classes were considered: agriculture, pasture, and others (urban perimeter, reforestation, mining areas, and water) (Arc of deforestation limits provided by the Brazilian Environmental Agency (IBAMA)).

For comparative purposes, concurrently with the MCD45A1 data analysis, we also evaluated, relative to the biome limits and for the 2002–2010 period, the (collection 5) MOD14 and MYD14 fire hotspots, based on the Terra (10:30 and 22:30 overpasses) and Aqua (13:30 and 01:30 overpasses) MODIS data (Data available for download through the CPTEC-INPE (Center of Weather Forecast and Climatic Studies): <http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueima/das/>). The daily active fire product (e.g. MOD14 and MYD14 hotspots), at 1 km spatial resolution, is based on the brightness temperatures derived from bands 21 (centered at 3.9 μm) and 22 (centered at 11 μm), which saturate at approximately 500 K and 331 K, respectively (Justice et al., 2006). False fire detections are screened with the use of the optical red (centered at 0.65 μm) and near infrared (centered at 0.86 μm) MODIS bands, resampled to 1 km (Rivera-Lombardi, 2009; Justice et al., 2006).

As the amount of precipitation during the year, which determines the humidity deficit of the fuel material, especially during the dry season, plays a key role in understanding the intensity and extension of burned areas, TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) monthly precipitation, with spatial resolution of 25 km (0.25°), was also included in the analysis (Kummerow et al., 2000; NASA, 2009).

Precipitation anomaly curves, according to the Armenteras-Pascual et al. (2011) parameters, were derived as follow:

$$\text{PPT anomaly in year}_i = \frac{\text{mean PPT in year}_i - \text{mean PPT (2002 to 2010)}}{\text{mean standard deviation (2002 to 2010)}} \quad (1)$$

where positive anomaly values indicate years with above average rainfall for the period, while negative anomaly values indicate years with rainfall below the average for the period.

All the methodological procedures involved in this study, including data acquisition, processing, sampling, and analysis are detailed in the flowchart shown in Figure 4.2.

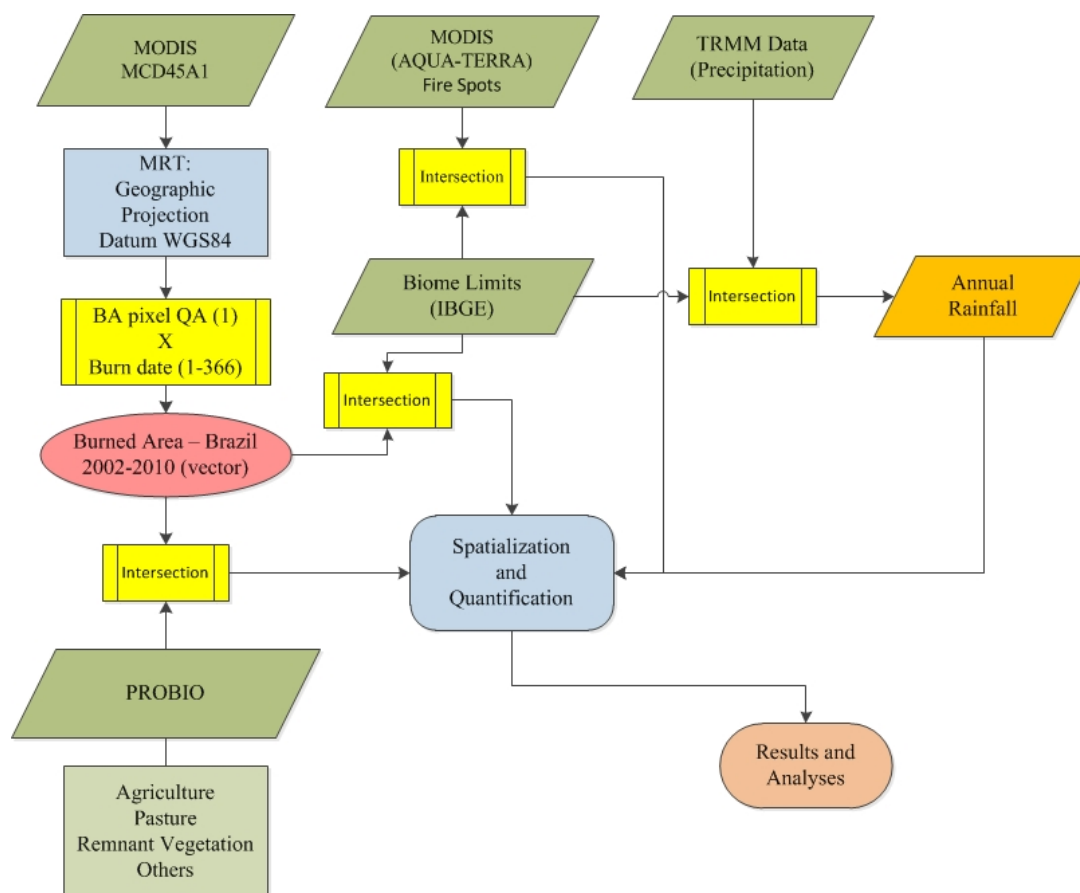


Figure 4.2 - Schematic flowchart depicting the main steps and approaches followed in this study.

4.3. Results and Discussion

The total burned area, by period and for each biome, is shown in Table 4.1 and Figure 4.3. For all the years considered, it is interesting to observe the concentration of burned areas in the Cerrado biome, was nearly 73%, followed by the Amazon biome (14%), and Pantanal (6%). In relation to the Pampa and Atlantic Forest biomes, the incidence of fires is significantly less, considering the greater precipitation regime throughout the year and the predominance of wet grasslands and arboreal canopies.

Table 4.1 - Annual extension of the total burned area (in 1,000 km²) in the Brazilian territory (biomes) for the 2002–2010 period.

| Biomes | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | Total |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Amazon | 10 | 8 | 11 | 13 | 6 | 25 | 6 | 2 | 27 | 108 |
| Caatinga | 1 | 1 | 1 | 2 | 0.6 | 5 | 1 | 0.4 | 4 | 17 |
| Cerrado | 60 | 32 | 47 | 47 | 28 | 129 | 46 | 11 | 147 | 545 |
| Atlantic Forest | 3 | 5 | 3 | 2 | 2 | 4 | 2 | 1 | 5 | 27 |
| Pampa | 0.3 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 3 |

| Biomes | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | Total |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Pantanal | 8 | 1 | 6 | 14 | 1 | 8 | 2 | 2 | 6 | 48 |
| Total | 82 | 48 | 69 | 78 | 38 | 170 | 57 | 17 | 189 | 748 |

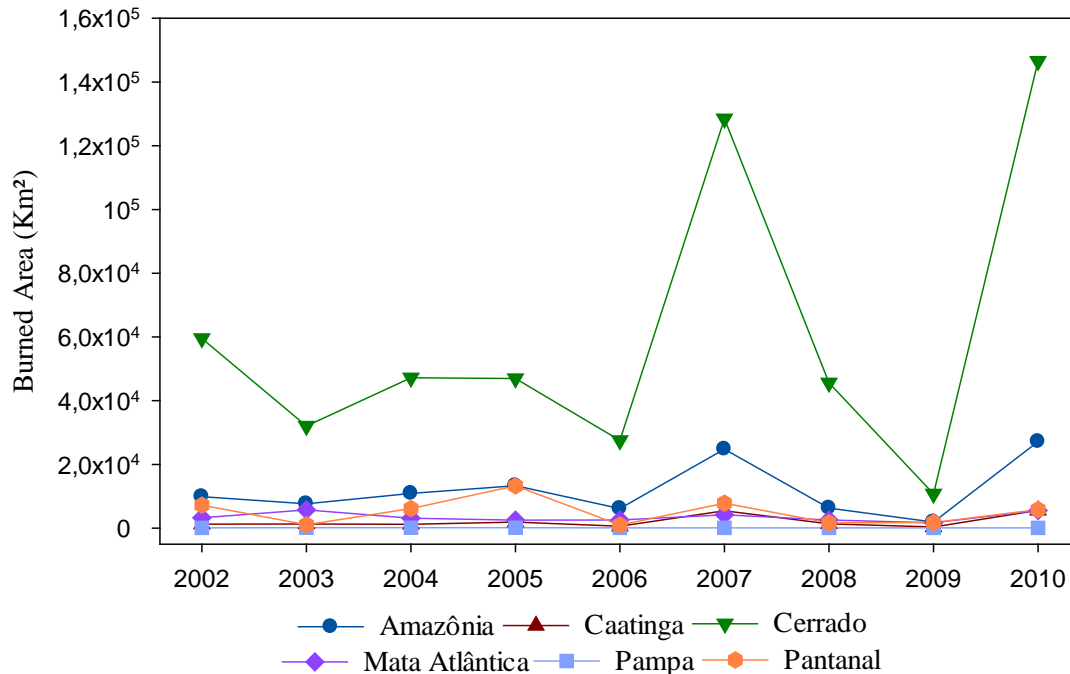


Figure 4.3 - Distribution of the burned areas in the Brazilian biomes, between 2002 and 2010.

Similarly, in the Caatinga, burnings are less pronounced (~3%), considering the rather irregular extensive dry period, and the litter material being less susceptible to complete combustion in fires of less intensity (Kauffman et al., 1993; Barbos et al., 2006).

It is worth noting (Table 4.1 and Figure 4.3) the increase in burned area, particularly in the Cerrado and Amazon, in the years of 2007 and 2010. In fact, in these two years, characterized by strong La Niña events (WMO, 2011), these biomes concentrated 90% and 92% of the total burned area in Brazil, respectively, as well as 87% of the total burned area in Brazil during the whole period considered in our analysis. Another relevant point that draws attention in Table 6 is the comparatively much lower figures, across biomes, in 2009, which demands further investigation concerning both sensor overall performance and specific MCD45A1 related issues, as well as local circumstances and peculiarities.

Although the Cerrado biome, between 2002 and 2010, presented, at every year, the largest burned area (Figure 4.3), the Amazon showed the highest record of hotspots in its domain, followed by the Cerrado (Figure 4.4). Interestingly, while in the Cerrado the distribution pattern of these hotspots tends to closely follow that observed for the burned areas, in the Amazon, the

amount of hotspots and burned areas describe opposite trends (Figures 4.3 and 4.4), e.g., in 2009, the year with the smallest burned area (1,931 km²), the recorded hotspots were 30% larger than those observed in 2010, the year with the largest burned area (27,251 km²).

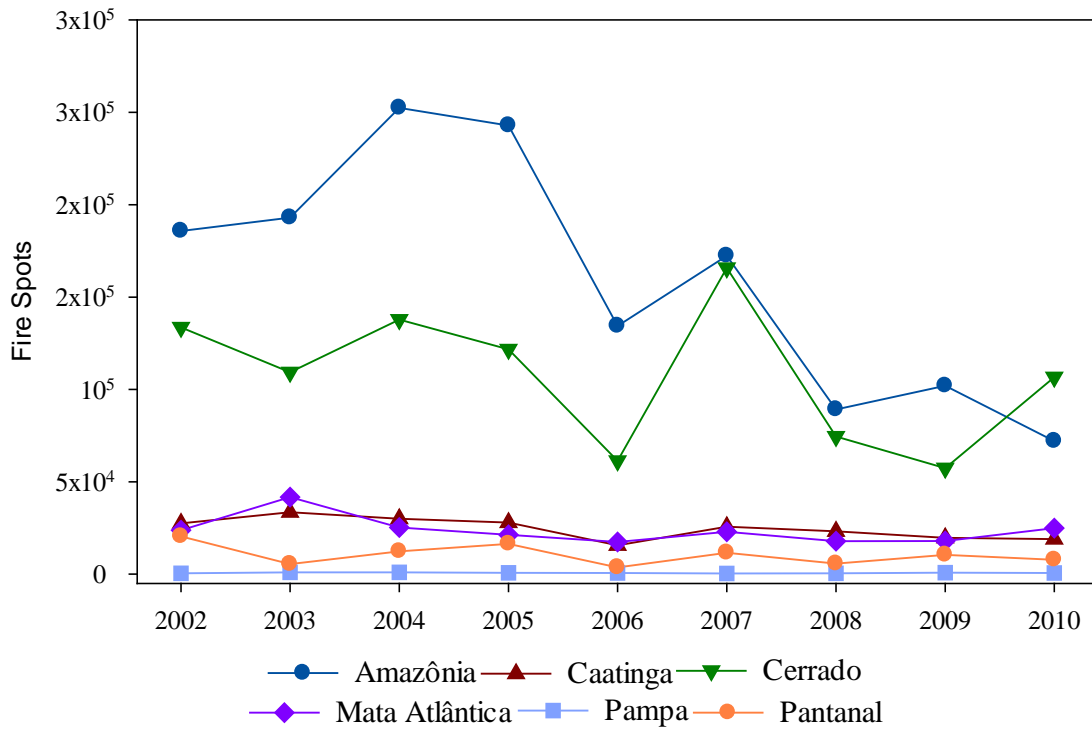


Figure 4.4 - Distribution of thermal anomalies (fire hotspots) in the Brazilian biomes, between 2002 and 2010.

In part, these differences in behavior reflect a lower accuracy of the MCD45A1 in dense vegetation areas, like in the Amazon region (Cardozo et al., 2011), where omission errors are more likely to occur due to the interference of clouds and plumes (optical depth), accidental fires with low chance of propagation, obscuration of fires by the overstory vegetation, and the average size of burns, usually smaller than the spatial resolution of the sensor (500 m) (Roy et al., 2008). Likewise, the MOD14, though very effective in the discrimination of fires with different intensities, is also subject to omission errors, as in the case of fires not coincident with the satellite overpass or too small to be detectable, and limited regarding area determination (Giglio et al., 2006; Giglio et al., 2003). Nevertheless, in the Arc of Deforestation, marked by severe fire activity, thermal anomalies detections are twofold higher than anywhere in the world (Giglio et al., 2006). This accentuated fire intensity, along the Amazon–Cerrado transition, is clearly seen in both the MCD45A1 and MOD14/MYD14 products (Figure 4.5).

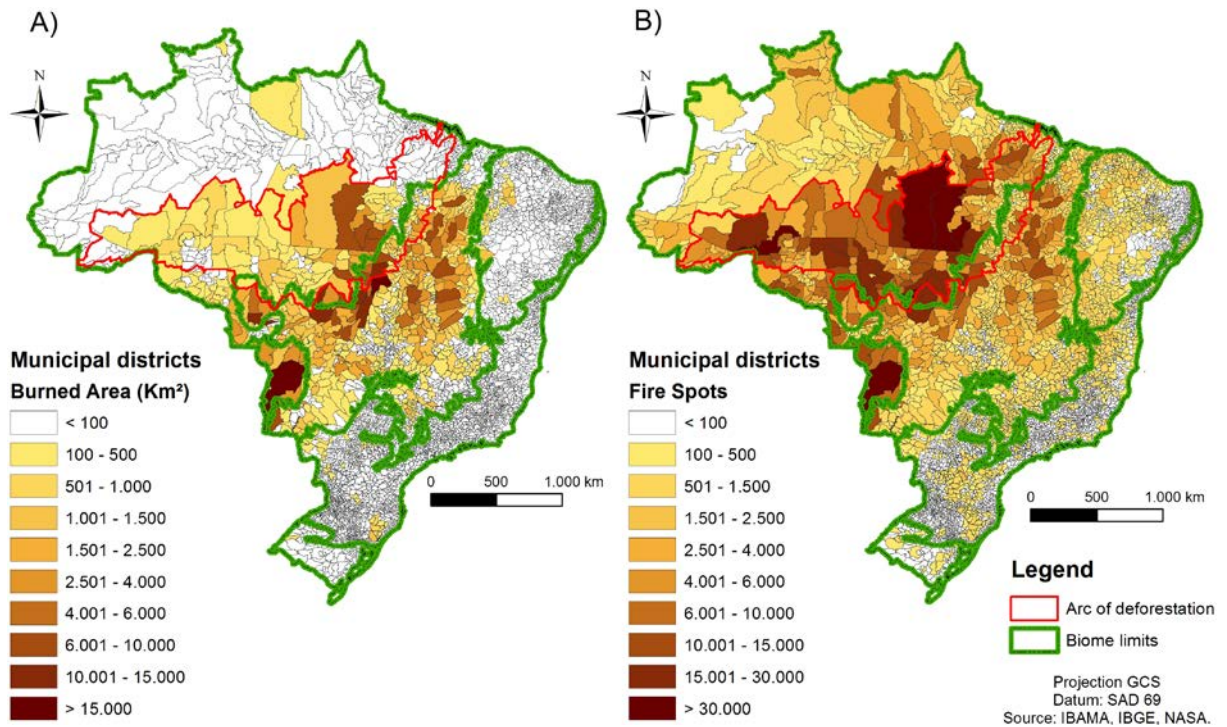


Figure 4.5 - (A) Total burned area (MCD45A1); and (B) fire hotspots (MOD14 and MYD14), between 2002 and 2010, according to the Brazilian municipalities.

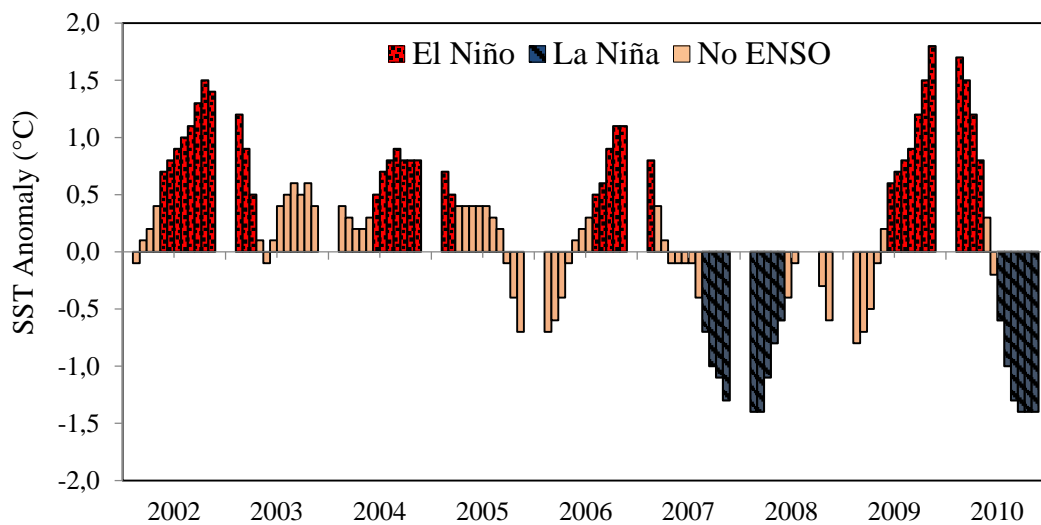


Figure 4.6 - Distribution of El Niño and La Niña events between 2002 and 2010 (ENSO = El Niño Southern Oscillation). Source: NOAA (2012).

According to the World Meteorological Organization (WMO) data, the 2001–2010 decade was the hottest, globally, since 1850 (beginning of the temperature records), and the year 2010, with temperatures much above the average in the north region of South America, was the second hottest year since 1998. Likewise, for the years of 2007 and 2010, the effects of La Niña were stronger than those presented by El Niño, mainly in August (WMO, 2011). Data

from CPTEC–INPE also shows that the 2004–2005 and 2006–2007 periods had the weakest El Niño events, not significantly contributing to the occurrence of severe droughts, which are one of the drivers of fire. Nevertheless, August 2007 marked the beginning of a strong La Niña event, during the 2007–2008 period (Figure 4.6).

In relation to the precipitation for the 2003, 2007, and 2010 years, the Amazon, Cerrado, Caatinga, and Atlantic Forest biomes presented a lower annual mean relative to both the previous year and to the total period. For the Cerrado, the year of 2007 was, on average, 32 mm drier than 2006, and had the strongest negative anomaly (−1.13 mm) (Figure 4.7), while 2010 showed a mean annual precipitation 29 mm less than 2009, and had the second strongest negative anomaly (−0.51 mm). In this same year, the Amazon had a negative anomaly of −0.41 mm.

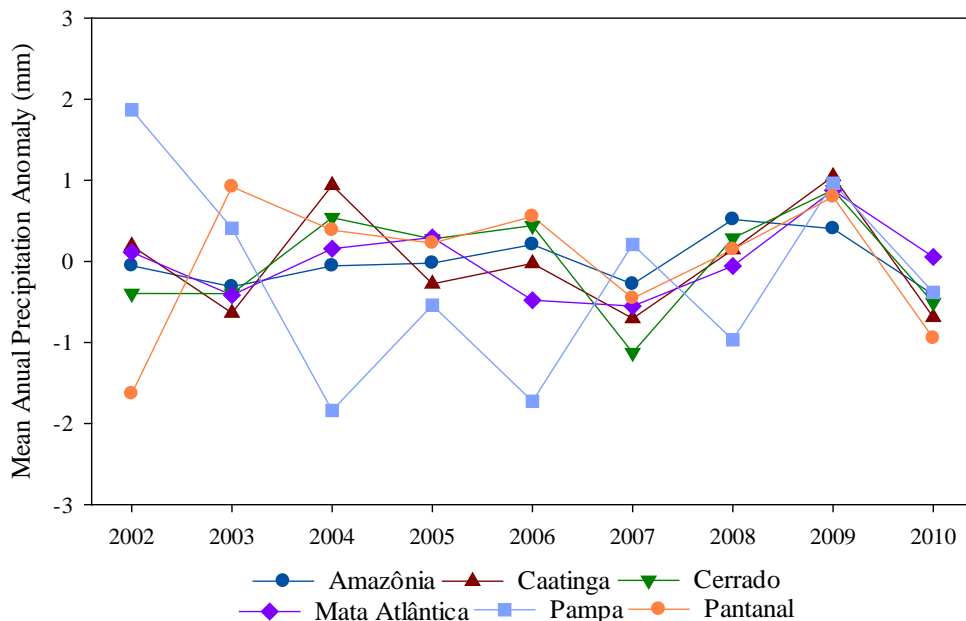


Figure 4.7 - Annual mean precipitation anomalies (2002 to 2010) in the Brazilian biomes.

According to (Marengo e Oliveira, 1998), negative anomalies of monthly precipitation during a La Niña event are observed mostly in the Southeastern, Central-Western, and in the Northeastern (Southern portion) regions of the country, particularly in the months of January and February. Though the effects of the El Niño and La Niña phenomenon tend to be less pronounced in the Cerrado biome, the precipitation increase in the months of January and February 2010, related to an El Niño, followed by a La Niña event started in March, caused both a substantial increment in biomass, as well as a prolonged and more intensive than usual

dry season. These conditions, favoring abundant fuel and propagation, induced burns of great proportions in 2010.

Regarding the concentration of burned areas in the year 2005 in the Amazon biome, this was the result of high SST (sea surface temperatures) in the North Atlantic, in both 2005 and 2010, which reduced the moist air masses in the Amazon (Marengo et al., 2008; Malhi et al., 2008; Lewis et al., 2011). As a matter of fact, the drought of 2010 in the Amazon was spatially more extensive, and more severe, than in 2005, with two epicenters, one in the southwestern region of the Amazon, and the other in the state of Mato Grosso, in its Central-Western portion (Lewis et al., 2011).

Fires in the Brazilian territory show a period of greater intensification, particularly in the Cerrado, during the months of July, August, and September. The period between May and September in the Cerrado records the lowest values of relative air humidity due to a drastic drop in rainfall, elevation of the relative air temperature, and the increase in the amount of incident solar radiation throughout the day. These favorable environmental conditions, in conjunction with a larger amount of thin combustible material (grasses and leaves, alive or dead, and thin branches, with diameter around 6 mm) available in the environment, both from the herbaceous layer and from exotic species (e.g., *Brachiaria Decumbens*), promotes the occurrence of fires (Figure 4.8) (Miranda et al., 2004).

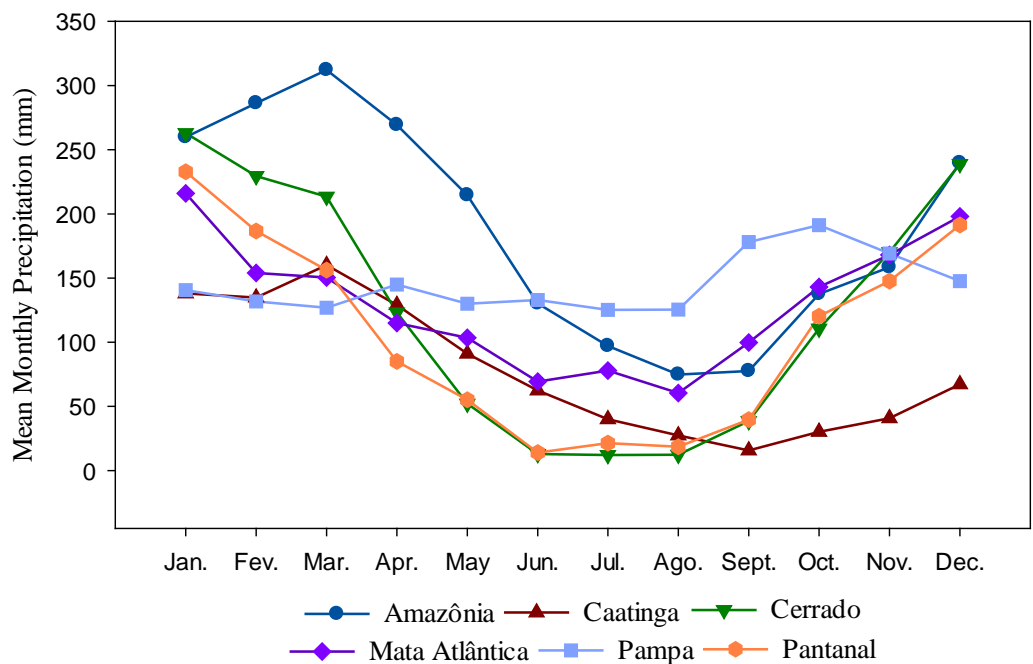


Figure 4.8 - Distribution of monthly mean precipitation (2002 to 2010) in the Brazilian biomes (TRMM data).

As depicted in Figure 4.8, a clear similarity in the distribution of mean monthly precipitation (mm) throughout the year is observed between the Cerrado and Pantanal biomes, with the largest occurrences of precipitation concentrated in the November to March period, due to the increased activity of the Continental Equatorial (cE) air mass, which is composed of moist air masses with high temperatures that cause abundant rainfall in the summer. However, in the winter, the cE air mass retreats to the northern region of the Amazon, along with the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), resulting in the drop of both temperature and moisture content (Ayoade, 2003; Mendonça e Danni-Oliveira, 2007).

4.3.1. Burned Areas & Land Cover Classes

As suggested in Figure 4.9, during the nine years investigated, and according to the PROBIO data, the remnant vegetation cover was the most affected by burns (~81%), while only 19% of the burned areas were directly associated with land already in use, especially in the Cerrado and Amazon regions, with the purpose of agriculture management, reclaiming of abandoned land, or the consolidation of occupation frontiers (Mendonça et al., 2004; Uhl et al., 1988; Kauffman et al., 1998; Davidson et al., 2004; Krug et al., 2004; Ramos-Neto e Pivello, 2000; Pivello, 2006; Morton, 2008; Cardoso et al., 2009).

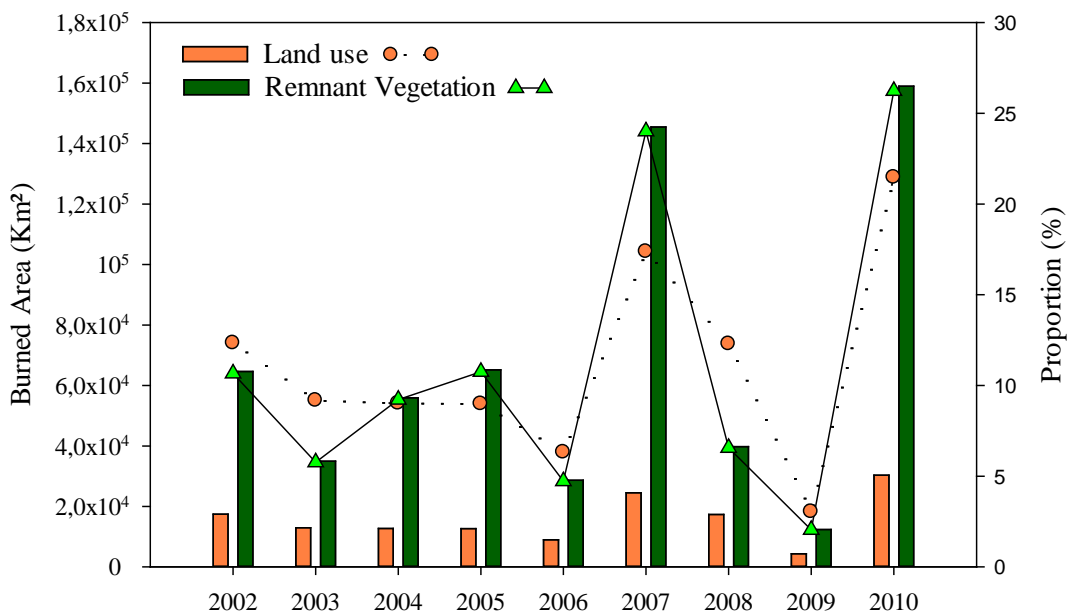


Figure 4.9 - Distribution and proportion of burned areas in the Brazilian territory, between 2002 and 2010, according to the remnant vegetation and major land use classes.

Although no unequivocal relationship can be established between burned areas and new land conversions, the conspicuous concentration of burns in the Arc of Deforestation and in the Cerrado northeastern portion should not be taken as a simple coincidence (Figures 4.1 and 4.5). In these two most prominent agricultural frontiers, in addition to recurrent and naturally occurring fires, human induced burning, strengthened by peculiar climatic circumstances, certainly plays a major role and accounts, directly or indirectly, for most of the fire-affected area.

Specifically, approximately 80% of the total annual burned area in the Cerrado, Caatinga, and Pantanal occurs in landscapes dominated by remnant vegetation. In the case of the Caatinga (Figure 4.10B), the low incidence of fires in anthropic areas is mainly due to the intermittent and scattered character of its cattle ranching activity. In the Pantanal (Figure 4.10D), though cattle ranching is prominent, the dominance of moist and green grasslands, coupled with management practices less dependent on fire, help to explain the concentration of burns over remnant vegetation areas, especially among the savanna physiognomies undergoing conversion.

In the Cerrado, the main agricultural frontier of the country, the prevalence of fires over remnant vegetation is associated with the still very active and significant clearings (Ferreira et al., 2009; Rocha et al., 2011; Diniz-Filho et al., 2009; Jepson, 2005), although the intensity and spreading of fires, over both natural and converted areas, are also dependent on the severity of the climatic events, as previously discussed. In fact, the occurrence of fires in the Cerrado is highly seasonal. During October to April (wet season), there is a substantial increase in the amount of biomass, while in the dry season (May to September), the biomass becomes highly flammable and susceptible to a rapid spread of fire over great extensions of natural vegetation. Nevertheless, it is important to emphasize that 2010, the year with the largest detection of fire scars in the Cerrado, had 19,121 km² of burned areas over pastures and 11,315 km² over agriculture, corresponding to 10% and 6% of the total burned areas in the country in that year, respectively (Figure 4.10F).

Significant areas of pastures (>20%) are also annually burned in the Amazon, Pampa, and Atlantic Forest (Figure 4.10). In the Pampa (Figure 4.10A), which is characterized by extensive grazing over natural and cultivated pastures, from 2005 on, the total burned area over both pastures and remnant vegetation tended to become closer, with the exception of 2010, which had the largest burned area over pastures (45.6%).

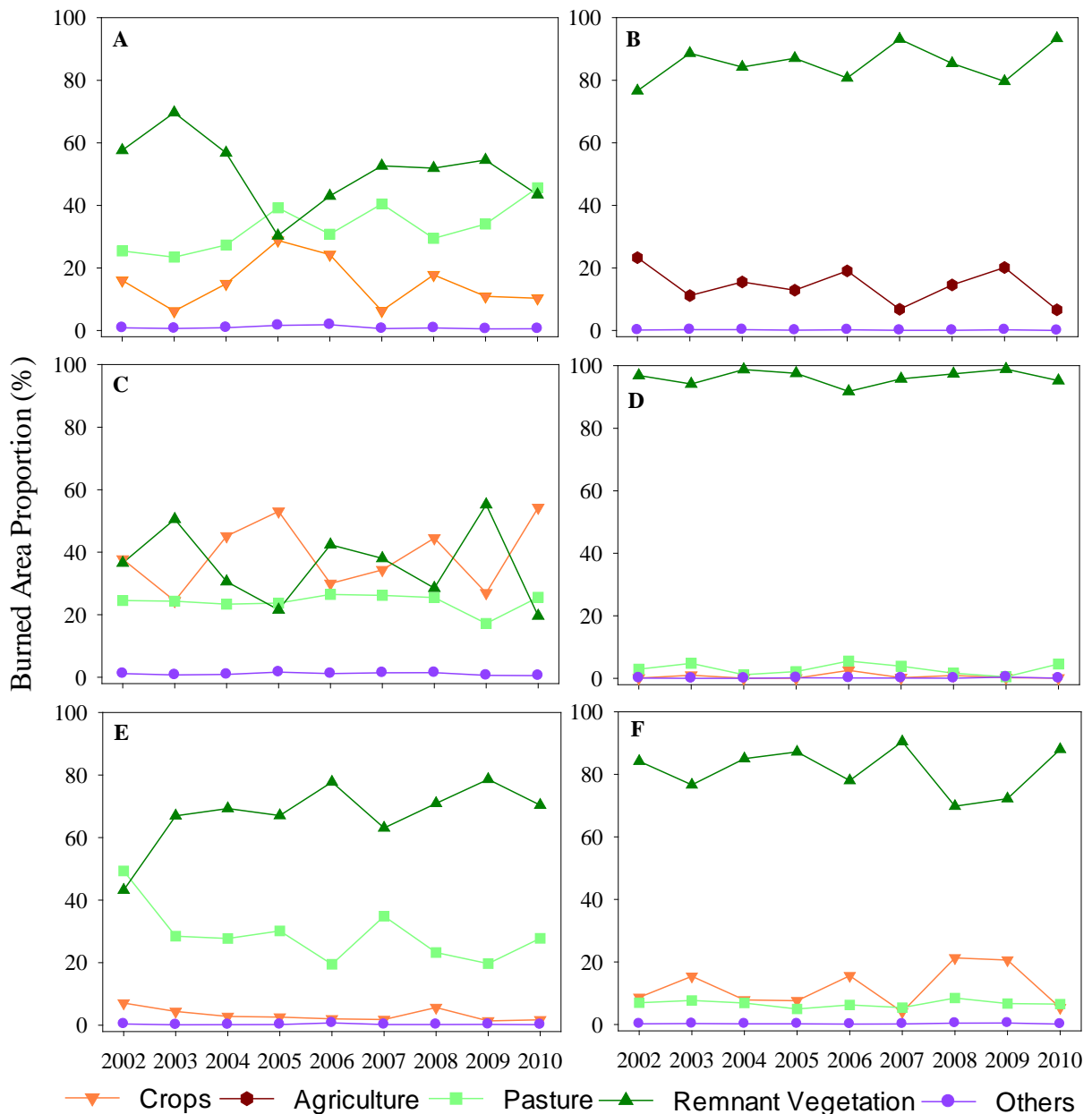


Figure 4.10 - Distribution of burned areas (%), according to the major land cover classes, in the six Brazilian biomes (2002 to 2010): (a) Pampa; (b) Caatinga; (c) Atlantic Forest; (d) Pantanal; (e) Amazon, and (f) Cerrado.

In the Amazon (Figure 4.10E), a large amount of fires serves the purpose of recovering old pastures taken by invading species and secondary growth (Krug et al., 2004; Ramos-Neto e Pivello, 2000; Pivello e Coutinho, 1992; Pivello e Coutinho, 1996). Indeed, pasture management in Amazon is the main cause behind the spread of fire to primary and secondary forests, particularly near areas already converted for human activities, where reduced and discontinued vegetation canopy allow for more sunlight to reach the forest floor, consequently increasing the amount of dry biomass and the forest flammability (Nepstad et al., 1999). In

Figure 4.10E it is also interesting to note the symmetric and complementary pattern of burned areas over pasture and remnant vegetation, suggesting that years of intensive pasture use correspond to lower pressure over the natural vegetation. Such trends and patterns take place mostly at the transition zone with the Cerrado biome (e.g. the Arc of Deforestation), characterized by intense anthropic occupation (Malhi et al., 2008; Morton et al., 2007; Ferreira et al., 2005; Fearnside, 2005; Nogueira et al., 2007; Silvestrini et al., 2011; Costa et al., 2010).

In relation to the Atlantic Forest (Figure 4.10C), it is noteworthy the well distributed occurrence of burned areas over the remnant vegetation (35% or 9,617 km²), pastures (25% or 6,651 km²), and agricultural fields (39% or 10,553 km²), as the sugarcane plantations, mostly found in this biome, still use fire to assist in the harvest (Ribeiro, 2008; Lara et al., 2005; Carvalho et al., 2010; Ribeiro e Ficarelli, 2010). It should be emphasized, however, that these numbers do not reflect the real magnitude of the agricultural area subject to fires in the Atlantic Forest domains, as the spatial resolution of the MCD45A1 product is often too coarse to capture the mean patch size and fragmentation of the cultivated fields, and large omission errors are also likely to occur due to the prevalent cloudy conditions in April, when most of the harvest begins. Indeed, only in the State of São Paulo, around 20,000 km² of sugarcane plantations are submitted to the straw burning practice every harvesting season (Rudorff et al., 2010; Aguiar et al., 2010). Based on an agreement between the government of São Paulo and the Sugarcane Industry (UNICA), supported by the state legislation N° 11.241/2002, the expectation is that, as of 2017, all sugarcane harvesting will be mechanized, which should significantly contribute to reduce fires in the Atlantic Forest (Ribeiro e Ficarelli, 2010).

4.4. Conclusions

In this study, based on the use of the MODIS MCD45A1 product, we investigated the spatial and temporal distribution patterns of burned areas in Brazil, according to its six main ecological regions. Overall, between 2002 and 2010, approximately 73% of the burned areas occurred in the Cerrado biome, followed by 15% in the Amazon region, 6% in the Pantanal, 4% in the Atlantic Forest, 0.4% in the Pampa, and 2% in the Caatinga. Concerning the thermal anomalies (hotspots), 49% and 33% of them, for the total period considered, were detected in the Amazon and Cerrado, respectively. Despite the observed discrepancies between the MOD14/MYD14 and MCD45A1, regarding the relative concentration of fire scars and hotspots, both products were able to clearly depict the severe fire activity along the Amazon–

Cerrado transition, an area of intensive land-use and land-cover change known as Arc of Deforestation.

Regarding the main land cover types (based on the 2002 PROBIO map), with the exception of the Atlantic Forest, which is, proportionally, the most converted biome in Brazil, fire scars, for the period investigated, occurred predominately over remnant vegetation (81%) and, to a less extent, over pastures (11%). Although caution is definitely required when attempting to interpret these figures, due to both data constraints and to the fact that no unequivocal correlation can be established between burned areas and new land conversions, they do suggest that fire, regardless of its serious environmental impact, is still an important instrument for the occupation of new areas, as well as for the management and clearing of pastures.

The evaluation, in a systematic and preventive manner, of the vulnerability of the distinct landscapes to the occurrence of fires is a critical issue in Brazil. To this end, the combined use of different remote sensing products is instrumental. While different studies show the ability of the MCD45A1 product for detecting burned areas at landscape scale, the use of other satellite data, such as precipitation (e.g., TRMM) and evapotranspiration (e.g., MOD16), associated with vegetation indices (e.g. MOD13), certainly can contribute in modeling susceptible areas based on biomass availability under favorable climatic conditions.

Acknowledgments

This study was conducted with support from the Brazilian Research Council (CNPq/grant number 471198/2009-9), the NASA Terrestrial Ecology Program (grant number NNX08AI24G), and the NASA Land-Cover/Land-Use Change Program (grant number NNX11AE56G). Fernando Moreira de Araújo and Laerte Guimarães Ferreira also acknowledge CAPES and CNPq for individual research grants, respectively. We are also grateful to the three anonymous reviewers for their useful comments and suggestions on the manuscript.

4.5. References

AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. CANASAT Project: Monitoring the Sugarcane Harvest Type in the State of São Paulo, Brazil. In **Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS) TC VII Symposium—100 Years ISPRS**, Vienna, Austria, 5–7 July 2010; Volume 38. p.10–15.

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L.; SALDIVA, P. H. N. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, vol. 30, 2004. p.158–175.

ARCHIBALD, S.; ROY, D. P.; VAN WILGEN, B. W.; SCHOLES, R. J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. **Global Change Biology**, vol. 15, 2009. p. 613–630.

ARMENTERAS-PASCUAL, D.; RETANA-ALUMBREROS, J.; MOLOWNY-HORAS, R.; ROMAN-CUESTA, R. M.; GONZALEZ-ALONSO, F.; MORALES-RIVAS, M. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 151, 2011. p. 279–289.

AYOADE, J. O. **Introdução a Climatologia Para os Trópicos**, 9th ed.; Rio de Janeiro: Bertrand, Brazil, 2003. 322p.

BARBOSA, H. A.; HUETE, A. R.; BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, vol. 67, 2006. p. 288–307.

BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, vol. 165, 2005, p. 525–538.

BELLA, C. M.; JOBBÁGY, E. G.; PARUELO J. M.; PINNOCK, S. Continental fire density patterns in South America. **Global Ecology and Biogeography**, vol. 15, 2006. p. 192–199.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; BARBOSA, P.; BOCA, R.; JUSTICE, C. A MODIS assessment of the summer 2007 extent burned in Greece. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 29, 2008. p. 2433–2436.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A. A. **MODIS Collection 5 Burned Area Product—MCD45 User’s Guide**, Version 2.0; University of Maryland: College Park, MD, USA, 2009.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W.J .; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D’ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; *et al.* Fire in the earth system. **Science**, vol. 324, 2009. p. 481–484.

CANÇADO, J. E. D. A poluição Atmosférica e sua Relação com a Saúde Humana na Região Canavieira de Piracicaba—SP. Ph.D. **Dissertação**, Faculdade de Medicina/USP, São Paulo, Brazil, 2003.

CARDOSO, M. F.; NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; HIROTA, M.; VALERIANO, D.; CÂMARA, G. Long-term potential for tropical-forest degradation due to deforestation and fires in the Brazilian Amazon. **Biologia**, vol. 64, 2009. p. 433–437.

CARDOZO, F. S.; LIMA, A.; PEREIRA, G.; SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; TAKEDA, M. M. G.; MORAES, E. C. Avaliação das Imagens do Produto MCD45 do Sensor MODIS Para a Identificação de Áreas Queimadas. In **Proceedings of 15th Brazilian**

Symposium on Remote Sensing (SBSR), Curitiba, Brazil, 30 April–5 May 5 2011. p. 7942–7949.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 34, 2010. p. 277–289

CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. **Oecologia**, vol. 143, 2005. p. 1-10. doi:10.1007/s00442-004-1788-8.

CHANG, D.; SONG, Y. Comparison of L3HRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007. **Journal Geophysical Research**, vol. 114, 2009. doi:10.1029/2008JD011361.

COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, vol. 30, 2010. p. 1970–1979.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**, vol. 20, 2006. p. 13–23.

DAVIDSON, E. A.; NEILL, C.; KRUSCH, A. V.; BALLESTER, V. V. R.; MARKEWITZ, D.; FIGUEIREDO, R. O. Loss of Nutrients from Terrestrial Ecosystems to Streams and the Atmosphere Following Land Use Change in Amazonia. In **Ecosystems and Land Use Change**; DeFries, R.; Asner, G.; Houghton, R., Eds.; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, 2004. p. 147-158.

DINIZ-FILHO, J. A. F.; OLIVEIRA, G.; LOBO, F.; FERREIRA, L. G.; BINI, L. M.; RANGEL, T. F. V. L. B. Agriculture, habitat loss and spatial patterns of human occupation in a biodiversity hotspot. **Scientia Agricola**, vol. 66, 2009. p. 764–771.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: História, índices e conseqüências. **Megadiversidade**, vol. 1, 2005. p. 113–123.

FERREIRA, L. V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. O. desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. **Estudos Avançados**, vol. 19, 2005. p. 1–10.

FERREIRA, L. G.; FERREIRA, M. E.; ROCHA, G. F.; NEMAYER, M.; FERREIRA, N. C. Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de Cerrado: Uma análise a partir de dados censitários e imagens de resolução moderada. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 61, 2009. p. 117–127.

FIELD, C. B.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A. Stomatal responses to increased CO₂: Implications from the plant to the global scale. **Plant, Cell & Environment**, vol. 18, 1995. p. 1214–1225.

FRANÇA, H.; SETZER, A. W. AVHRR analysis of a savana site through a fire season in Brazil. *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 22, 2001. p.2449–2461.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L. Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul. **Estudos Avançados**, vol. 19, 2005. p. 167–186.

JEPSON, W. A disappearing biome? Reconsidering land cover change in the Brazilian savanna. **The Geographical Journal**, vol. 17, 2005. p. 99–111.

JIN, H. Drivers of Global Wildfires—Statistical Analyses. Ph.D. **Dissertação**, University of Lund, Lund, Sweden, 2010.

GIGLIO, L.; DESCLOITRES, J.; JUSTICE, C. O.; KAUFMAN, Y. J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, vol. 87, 2003. p. 273–282.

GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; JUSTICE, C. O. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. **Journal of Geophysical Research**, vol. 111, 2006. doi:10.1029/2005JG000142.

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. Available online: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf. Acessado em 17 Jan. 2012.

KAUFFMAN, J. B.; SANFORD, J. R.; CUMMINGS, D. L.; SALCEDO, I. H.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomass and nutrients dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. **Ecology**, vol. 74, 1993. p.140–151.

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Fire in the Brazilian Amazon 2. Biomass, nutrient pools, and losses in cattle pastures. **Oecologia**, vol. 113, 1998. p. 415–427.

KLINK, A. C.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, vol. 1, 2005. p. 147–155.

KRUG, T.; RIVERA-LOMBARDI, R. J.; DOS SANTOS, J. R. Burned area, Recurrence of Fires and Permanence of Burnt scars in Selected Areas of the Brazilian Cerrado Using TM-Landsat Imagery. In **Proceedings of the XXth ISPRS Congress: Geo-Imagery Bridging Continents**, Istanbul, Turkey, 12–23 July 2004. p. 243–246.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E.; ADLER, R. F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; *et al.* The status of the tropical rainfall measuring mission (TRMM) after two years in orbit. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, 2000. p. 1965–1982.

KUNII, O. **Health Guidelines for Vegetation Fire Events: Background Papers**, Goh, K., Schwela, D., Goldammer, J.G., Simpson, O., Eds.; World Health Organ: Geneva, Switzerland, 1999.

- LARA, L. L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; FERRAZ E. S. B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. **Atmospheric Environment**, vol. 39, 2005. p. 4627–4637.
- LEWIS, S. L.; BRANDO, P. M.; PHILLIPS, O. L.; VAN DER HEIJDEN, G. M. F.; NEPSTAD, D. The 2010 Amazon drought. **Science**, vol. 331, 2011. doi:10.1126/science.1200807.
- MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. **Science**, vol. 19, 2008. p. 169–172.
- MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, G. S. Impactos do Fenômeno La Niña no Tempo e Clima do Brasil: Desenvolvimento e Intensificação do La Niña 1998/1999. In **Proceedings of 10th Brazilian Congresso of Meteorology**, Brasilia, Brazil, October 1998; CD-ROM.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J. The Drought of Amazonia in 2005. **American Meteorological Society**, vol. 21, 2008. p. 1–6.
- MASCARENHAS, M. D.; VIEIRA, L. C.; LANZIERI, T. M.; LEAL, A. P.; DUARTE, A. F.; HACTH, D. L. Anthropogenic air pollution and respiratory disease-related emergency room visits in Rio Branco, Brazil—September, 2005. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, vol. 34, 2008. p. 42–46.
- MENDONÇA, M. J. C.; VERA DIAZ, M. D. C.; DANIEL, D. C.; SEROA, R.; ALENCAR, A.; GOMES, J. C.; ORTIZ, R. A. The economic cost of the use of fire in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, vol. 49, 2004. p. 89–105.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: Noções Básicas e Climas do Brasil**, 1st ed.; Oficina de textos: São Paulo, Brazil, 2007. 208p.
- MIMS, F. M. Health effects of tropical smoke. **Nature**, vol. 390, 1997. p. 222–223.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/SBF. **Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado, Relatório Final**. Edital Probio 02/2004; Projeto Executivo B.02.02.109, Brasília, Brazil, 2007.
- MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A.; HARUDASAN, M.; MORAIS, H. C. Queimadas de Cerrado: Caracterização e Impactos. In **Cerrado: Ecologia e Caracterização**. Aguiar, L.M.S., Camargo, A.J.A., Eds.; Embrapa Cerrados: Planaltina, Brazil, 2004. p. 69–123.
- Morton, D. C.; Shimabukuro, Y. E.; Rudorff, B. F. T.; Lima, A. ; Freitas, R. M.; DeFries, R. S.** Conservation challenge at the agricultural frontier: Deforestation, fire, and land use dynamics in Mato Grosso. **Ambi-Agua**, vol. 2, 2007. p. 5–20, doi:10.4136/ambi-agua.16.
- Morton, D. C.** Changes in Amazon Forest Structure from Land-Use Fires: Integrating Satellite Remote Sensing and Ecosystem Modeling. Ph.D. **Dissertação**, University of Maryland, College Park, MD, USA, 2008.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Monthly 0.25 × 0.25 TRMM and Other Sources Rainfall. NASA Distributed Active Archive Center, Goddard Space Flight Center Earth Science, Greenbelt, MD, USA, 2009. Available online: <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation>. Acessado em 20 Dez. 2011.

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. G.; ALENCAR, A. A. **Floresta em Chamas: Origens, Impactos e Prevenção do Fogo na Amazônia**. Programa Piloto para Proteção das Florestas Tropicais do Brasil: Brasília, Brasil, 1999. p. 202.

NOAA's **El Niño Page**. February 2012. Available online: <http://www.elnino.noaa.gov/> (accessed on 15 February 2012).

NOGUEIRA, E. M.; FEARNSIDE, P. M.; NELSON, B. W.; FRANCA, M. B. Wood density in forests of Brazil's "arc of deforestation": Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. **Forest Ecology and Management**, vol. 248, 2007. p. 119–135.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in a open cerrado (Brazilian savanna). **J. Trop. Ecol.** **1992**, 8, 457–497. Pivello, V.R.; Coutinho, L.M. A qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. **Forest Ecology and Management**, vol. 127, 1996. p. 127–138.

PIVELLO, V. R. Fire Management for Biological Conservation in the Brazilian Cerrado. In **Savanna and Dry Forests—Linking People with Nature**. Mistry, J., Berardi, A., Eds.; Ashgate: Farnham, UK, 2006. p. 129–154.

RAMANATHAN, V. Carmichael, G. Global and regional climate changes due to black carbon. **Nature Geoscience**, vol. 1, 2008. p. 221–227.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: Rethinking management strategies. **Environment Management**, vol. 26, 2000. p. 675–684.

RATTER, J. A. Transitions between Cerrado and Forest Vegetation in Brazil. In **Nature and Dynamics of Forest-Savanna Boundaries**. Chapman and Hall: New York, NY, USA, 1992. p. 616.

RATTER, J. A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, vol. 80, 1997. p. 223–230.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, vol. 16, 2002. p. 125–148.

RIBEIRO, H. Queimadas de cana-de-açúcar no Brasil: Efeitos à saúde respiratória. **Revista de Saúde Pública**, vol. 42, 2008. p. 370–376.

RIBEIRO, H.; FICARELLI, T. R. A. Queimadas nos canaviais e perspectivas dos cortadores de cana-de-açúcar em Macatuba, São Paulo. **Saúde e Sociedade**, vol. 19, 2010. p. 48–63.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estimativa de Áreas Queimadas com Produtos MODIS como Subsídio à Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa pela Queima de Biomassa na

Amazônia e Cerrado Brasileiros. Ph.D. **Dissertação** (Mestrado em sensoriamento remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brazil, 2009.

ROCHA, G. F.; FERREIRA JR. L. G.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, M. E. Detecção de desmatamentos no bioma Cerrado entre 2002 e 2009: Padrões, tendências e impactos. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 63, 2011. p. 341–349.

RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. **Science**, vol. 298, 2002. p. 1410–1411.

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**, vol. 112, 2008. p. 3690–3707.

ROY, D. P.; BOSCHETTI, L. Southern Africa Validation of the MODIS, L3JRC and GlobCarbon Burned Area Products. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 47, 2009. p. 1032–1044.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo (Brazil) using landsat data. **Remote Sensing**, vol. 2, 2010. p. 1057–1076.

SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização Climática do Bioma Cerrado. In **Cerrado: Ecologia e Flora**, 1st ed.; Sano, S.M., Almeida, S.P., Ribeiro, J.F., Eds.; Embrapa Informação Tecnológica: Brasília, Brazil, 2008. p. 69–88.

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

UHL, C.; BUSCHBACHER, R.; SERRÃO, E. A. S. Abandoned pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of plant succession. **Journal of Ecology**, vol. 76, 1988. p. 663–681.

UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in Eastern Amazon. **Ecology**, vol. 71, 1990. p. 437–449.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **MODIS Reprojection Tool V4.1**, modis reprojection tool, 2011. Available online: <http://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/tools/>. Accessed on 28 Jun. 2011.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO, A. F.; OLSEN, S. C. KASISCHKE, E. S. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period. **Science**, vol. 303, 2004. p. 73–75.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO statement on the status of the global climate in 2010. **World Meteorological Organization**, n. 1074, 2011. 20p.

5. Recorrência das áreas queimadas no bioma Cerrado: padrões biofísicos e espaço-temporais

Fernando Moreira de Araújo
Universidade Federal de Goiás – UFG
fernandomsbl@gmail.com

Laerte Guimarães Ferreira Júnior
Universidade Federal de Goiás – UFG
laerte@ufg.br

5.1. Introdução

As queimadas, importante fator ecológico (Sugihara et al., 2006) e de perturbação ambiental (Miranda et al., 2004), constituem uma questão extremamente complexa, de difícil mitigação e monitoramento (Chuvieco et al., 2008), sofrendo influência de fatores climáticos, ecológicos, culturais e econômicos. Da mesma forma, seus danos não implicam somente na redução da cobertura vegetal lenhosa (Sato, 2003), mas na perda da biodiversidade, na sustentabilidade dos ecossistemas e na emissão de gases para a atmosfera, os quais trazem efeitos para a saúde da população e para as mudanças climáticas (Tansey et al., 2004; Randerson et al., 2005; Longo et al., 2009; Dias e Miranda, 2010; Pivello et al., 2010).

Segundo Van Der Werf et al. (2004), de 1997 a 2001, dois terços da concentração de CO₂ atmosférico emitidos podem ser atribuídos às áreas queimadas, o que corresponderia a 50% de todas as emissões provenientes de combustíveis fósseis (Bowman *et al.* 2009). Da mesma forma, os gases traços e aerossóis emitidos para a atmosfera reduzem de forma significativa a habilidade da terra de fixar CO₂ (Kauffman et al., 1990).

De acordo com os dados do produto MODIS área queimada (Roy et al., 2002; 2005; 2008), entre 2000 e 2012, aproximadamente 18% do território brasileiro sofreram com a ação do fogo (i.e. 1.531.611 km²), tendo sido o Cerrado, marcado por forte sazonalidade climática e solos pobres (ácidos) em nutrientes, o bioma que apresentou a maior concentração de áreas queimadas em relação aos demais biomas, 74% (1.139.140 km²) (Ramos-Neto e Pivello, 2000; Miranda et al., 2010; Lehmann et al., 2011; Araújo et al., 2012)

A frequência e/ou recorrência das queimadas no bioma Cerrado influencia na estrutura das comunidades (Lehmann et al., 2011), na dinâmica de nutrientes dos solos e nas fontes de gases traços, assim como no material particulado e carbono emitidos para a atmosfera (Kauffman et al., 1994). Coutinho (1990) aponta duas grandes causas para a recorrência das queimadas no cerrado, relacionadas à renovação da pastagem na segunda metade da estação

seca (agosto-setembro) e ao desmatamento e limpeza das áreas para o cultivo de novas culturas. Estas queimadas se intensificam no final da estação seca (setembro) quando o estrato herbáceo-subarbusivo encontra-se bastante inflamável (Ramos-Neto e Pivello, 2000). Em fato, é este o regime de queima com maior impacto, pois nesse período temos o padrão fenológico da vegetação voltado para a renovação das copas e reprodução (Oliveira, 1998; Dias e Miranda, 2010; Pivello et al., 2010).

A pastagem no Cerrado ocupa cerca de 30% de seus limites (Sano et al., 2010) e se encontra bastante distribuída entre as suas regiões. Estudos apontam que a alta densidade das pastagens, sobretudo as exóticas invasivas (ex. *Brachiaria* sp., *melinis minutiflora* – capim gordura), contribuem para a frequência das queimadas e grandes incêndios (Miranda et al., 2002; Barbosa e Fearnside, 2005; Beckage et al., 2009; Bond e Keeley, 2005; Lehmann et al., 2011), sendo que a vegetação do estrato herbáceo representa mais de 90% do combustível durante as queimadas (Miranda et al., 2004). Quanto a eficiência destas queimadas, esta varia entre 75% a 98%, apresentando valores bastante altos em áreas de campo sujo (Castro e Kauffman, 1998). Por sua vez, as espécies invasoras em ecossistemas naturais afetam na mudança das propriedades do material combustível, conseqüentemente no comportamento do fogo alterando o seu regime, frequência, intensidade, extensão e sazonalidade do fogo (Brooks et al., 2004).

A utilização de séries temporais satelitárias é de fundamental importância para se entender a dinâmica funcional e estrutural das paisagens naturais e antrópicas (Sellers et al., 1997; Jönsson e Eklundh, 2002; 2004). Especificamente no que diz respeito à ocorrência e recorrência de queimadas, o uso de séries temporais de produtos biofísicos (ex. índice de vegetação, evapotranspiração), ao evidenciarem distintos padrões de resiliência e crescimento da vegetação, podem indicar a distribuição espacial de áreas mais ou menos suscetíveis à propagação do fogo.

O objetivo deste estudo foi o de avaliar os padrões (espaciais e temporais) e as frequências de recorrências das queimadas para o bioma Cerrado, bem como entender como a sazonalidade e variação interanual climática determinam os diferentes regimes de queima das diferentes classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente.

5.2. Materiais e Métodos

Para a análise do padrão de distribuição espacial de recorrência das áreas queimadas no bioma Cerrado foi utilizado como referência o produto MODIS MCD45A1, cujas cicatrizes de queimadas selecionadas foram as de máxima confiabilidade (i.e. valor 1) (Roy, 2008; Boschetti et al., 2006). O recorte temporal da análise se restringiu ao período entre 2002 a 2013, tendo sido o ano de 2002 selecionado como referência/base para a análise da recorrência / frequência do fogo para os anos subsequentes até 2013.

A partir das cicatrizes de queimadas MCD45A1 de máxima confiabilidade entre 2002 a 2013, foram selecionados polígonos maiores ou iguais a 2 km², correspondendo a 1.078.004 km², 80% do total mapeado no bioma Cerrado durante este período (i.e. 1.344.731 km²). Para o ano de referência (i.e. 2002) foram selecionados 4.375 polígonos de cicatrizes de queimadas, os quais foram intersectados com os dados subsequentes de 2003 a 2013. Considerando apenas os polígonos com interseção maior ou igual a 50%, foram identificadas 2.400 amostras de área queimadas com recorrência. Para estes polígonos com algum nível de recorrência, procedeu-se à análise da fragmentação espacial das áreas queimadas, conforme as diferentes paisagens do bioma Cerrado, por meio da métrica de isolamento do índice de distância do vizinho mais próximo (i.e. distância média entre os fragmentos mais próximos), estimada através do software gratuito V. LATE (*Vector-based Landscape Analysis Tools Extension*) (Lang e Blaschke, 2009). Para a caracterização da cobertura e uso da terra destas 2.400 amostras utilizou-se o mapeamento do PROBIO Cerrado (MMA, 2007), cujas classes foram agrupadas em agricultura, campo limpo, campo sujo, cerrado senso stricto, formação florestal, pastagem e outras coberturas (Figura 5.1). Para a classe “outras coberturas” foram agrupadas os usos referente as áreas urbanas, mineração, reflorestamento e vegetação secundária.

Com vistas à análise dos padrões biofísicos e climáticos dos polígonos de queimada recorrentes (em relação às áreas detectadas em 2002), estes foram divididos em quatro grupos: grupo A - polígonos que não voltaram a queimar até 2012; grupo B - polígonos que voltaram a queimar em 2010; grupo C - polígonos que voltaram a queimar em 2006; e grupo D - polígonos que voltaram a queimar em 2006 e 2010.

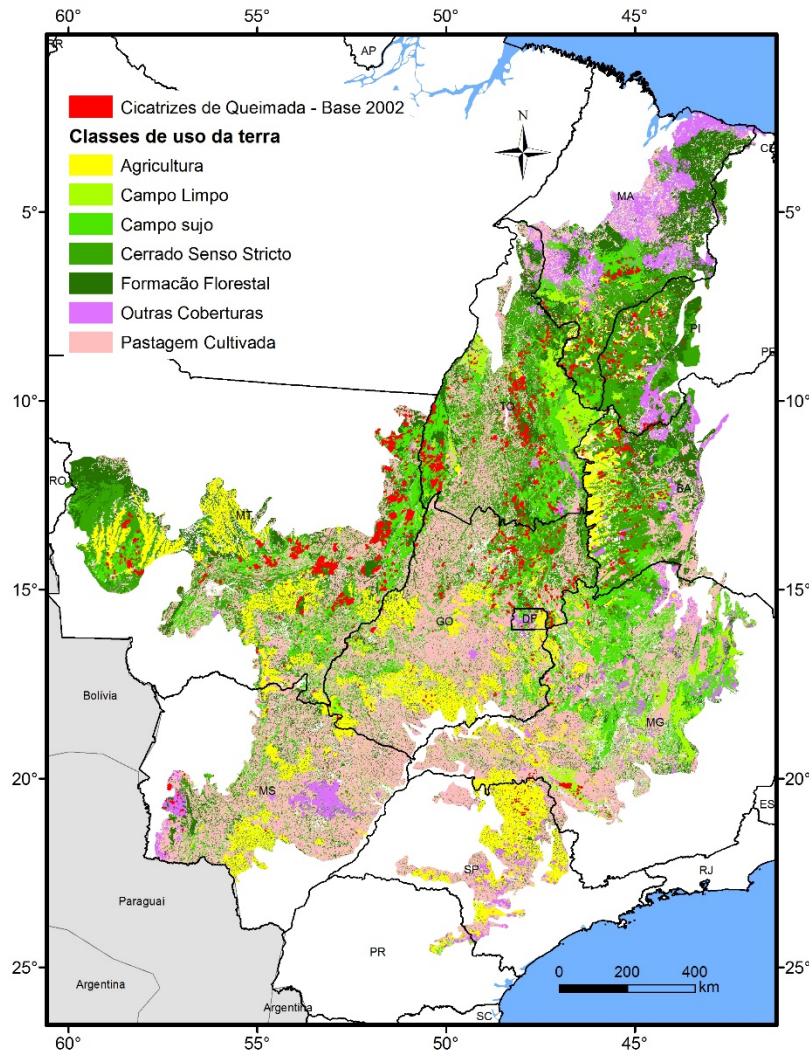


Figura 5.1 - Localização espacial dos 2.400 polígonos de recorrências de cicatrizes de queimadas (intersecção $\geq 50\%$) sobre o bioma Cerrado.

Especificamente, a análise da estrutura biofísica da vegetação (pré e pós-fogo) teve por base os dados do índice espectral da vegetação realçada - EVI, evapotranspiração – MOD16 e precipitação pluviométrica – TRMM. O produto índice de vegetação MOD13Q1 (*Enhanced Vegetation Index – EVI*), com 250m de resolução espacial e disponível à cada 16 dias, permite avaliar a variação de biomassa fotossinteticamente ativa ao longo do ciclo hidrológico e entre eventos sucessivos de queima (Huete et al., 2002). Já o produto MOD16A2 (*Evapotranspiration*) permite avaliar a variabilidade de umidade presente na vegetação, sob diferentes regimes e frequência de fogo, tanto durante o período de crescimento vegetativo quanto durante a senescência (e acúmulo de material inflamável) ao longo da estação seca (Mu et al., 2007; 2011). Por sua vez, o produto TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission – TRMM*) (Kummerow et al., 2000) fornece estimativas de precipitação ao longo do ciclo hidrológico, permitindo avaliar o padrão de distribuição sazonal e espacial das chuvas e,

principalmente, a ocorrência de anomalias climáticas, as quais influenciam o funcionamento e potencial inflamável dos diferentes ecossistemas do bioma Cerrado. Especificamente em relação ao produto MOD13Q1, bastante suscetível à contaminação atmosférica residual, a análise dos dados foi precedida de filtragem pixel a pixel, conforme a rotina de interpolação Savitzky-Golay (e uma janela de quatro observações) implementada no programa (livre) TIMESAT (Jönsson e Eklundh, 2002; 2004).

Uma das questões mais críticas para determinar o início da estação de fogo utilizando índices de vegetação é identificar o limiar de deslocamento ou início da redução do vigor vegetativo por meio da ação do fogo (Chuvieco et al., 1999; Verbesselt et al., 2006). Para este estudo, contudo, a utilização de métricas não esteve direcionada à definição do início ou do final da estação do fogo, mas sim centrada em analisar o comportamento do vigor vegetativo das áreas atingidas pelo fogo para os períodos de pré-queimada (2000 e 2001), queimada (2002, 2006 e 2010) e pós-queimada (2003 a 2005, 2007 a 2009 e 2011 a 2012).

5.3. Resultados

5.3.1. Distribuição espacial da recorrência das queimadas

No total, foram analisados 1.333 polígonos de áreas queimadas no Cerrado, os quais, para os quatro períodos analisados, ocorrem predominantemente sobre as classes de cerrado sensu stricto (26%), campo sujo (20%), pastagem cultivada (20%), agricultura (19%), formação Florestal (9%), campo limpo (4%) e outras coberturas (2%) (Figura 20). A tabela 5.1 demonstra a quantidade de polígonos de áreas queimadas de acordo com cada classe de uso da terra e cobertura vegetal remanescente considerada para essa análise de recorrência.

Tabela 5.1 - Distribuição das amostras de recorrência de queimadas de acordo com as classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescente para o bioma Cerrado.

| Classes | 2002-12 (A) | 2002-10 (B) | 2002-06 (C) | 2002-06-10 (D) |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| Agricultura | 215 | 17 | 19 | 1 |
| Campo limpo | 27 | 20 | 6 | 3 |
| Campo sujo | 121 | 96 | 43 | 10 |
| Cerrado SS | 140 | 152 | 37 | 12 |
| Formação Florestal | 51 | 55 | 10 | 3 |
| Outras Coberturas | 20 | 6 | 4 | 0 |
| Pastagem Cultivada | 223 | 31 | 10 | 1 |

Os anos de 2007, 2010 e 2012 apresentaram os maiores registros de recorrências de queimadas no Cerrado em comparação com o ano de 2002 (base da análise), concentrando 59% de toda recorrência registrada, i.e. 1.028 (22%), 1.067 (23%) e 646 (14%) cicatrizes de queimada, respectivamente. Em média, as áreas queimadas registradas em 2002 que retornaram a queimar entre 2003 a 2013 (considerando somente intersecções a partir de 50%) tiveram 74% de sua área perturbada pelo fogo novamente. O tamanho médio da área das amostras com recorrências, entre 2003 a 2013, foi de 9 km² (com coeficiente de variação médio de 2,4 km²).

A figura 5.2 mostra a extensão da área queimada entre 2003 a 2013 interseccionada com o mapeamento base (qualquer nível de intersecção), bem como a proporção (%) das queimadas de 2002 que voltaram a queimar nos anos posteriores (no mínimo 50% de sua extensão).

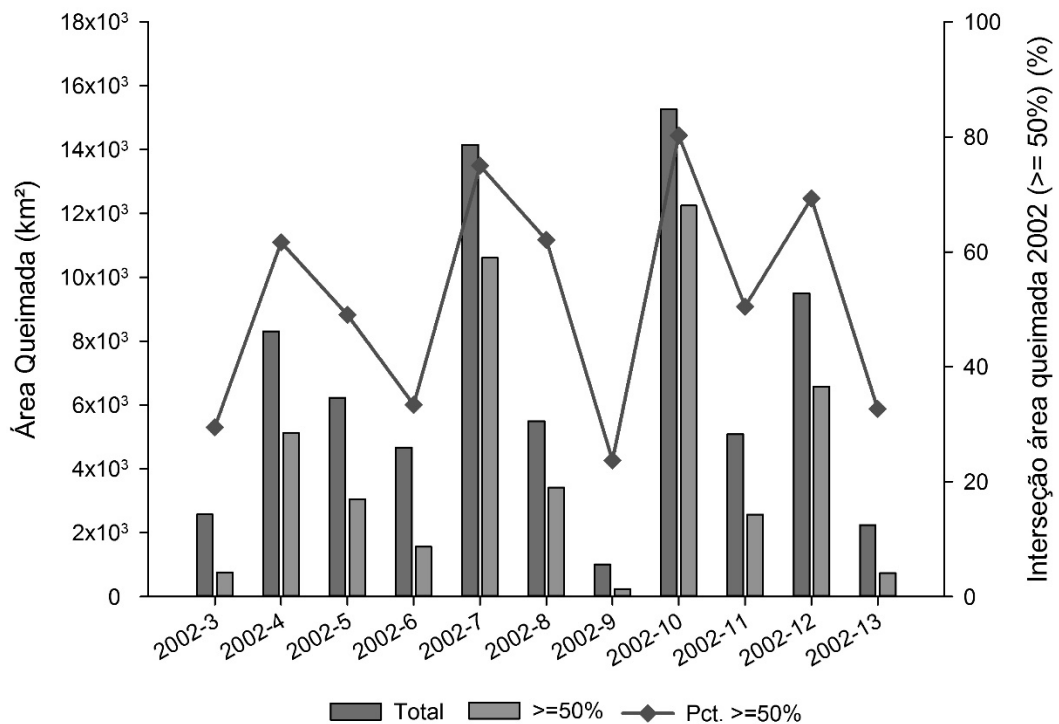


Figura 5.2 - Distribuição das áreas queimadas interseccionadas (total) e >= 50% em relação ao ano de 2002 (base) e a respectiva proporção das intersecções >= 50% (linha) referente ao total interseccionado entre 2003 a 2013 para o bioma Cerrado.

Ao analisarmos o gráfico apresentado na figura 5.2, podemos realizar três recortes para as recorrências de queimadas no bioma Cerrado, sendo o primeiro referente aos períodos de 2002-07, 2002-10 e 2002-12, i.e. maiores registros de queimadas no território brasileiro, consequentemente, com as maiores recorrências (i.e. >= 50%), em média 74%; o segundo recorte é formado pelos períodos de 2002-04, 2002-08 e 2002-11, cuja a média de recorrência

(>= 50%) fica em 58%; quanto ao terceiro recorte, este diz respeito às recorrências observadas para os períodos 2002-03, 2002-06, 2002-09 e 2002-13, com área média intersectada de 30%. Os padrões apresentados mostram que eventos extremos de queimadas aumentam a proporção das recorrências de queimadas no Cerrado, e que os mesmos ocorrem no intervalo de 1 a 2 anos, sobretudo para recorrências que atingem mais de 50% da área perturbada anteriormente pelo fogo. Outro padrão notado, é que os anos de extremas ocorrências das queimadas são precedidos por recorrências menores (em relação às áreas intersectadas), abaixo de 35%.

Basicamente para os 2.400 polígonos de queimadas (28.605 km²) do mapeamento base (2002), as maiores proporções de recorrências estão localizadas sobre os estados da Mato Grosso (37%), Tocantins (24%), Goiás (13%), Bahia (9%), Maranhão (6%) e Piauí (5%), respectivamente. Em média, a extensão das áreas que voltaram a queimar após 2002 entre os Estados é de 9 km², enquanto, individualmente, Mato Grosso, Tocantins, Goiás e Minas Gerais apresentaram as maiores extensões, sendo 24 km², 11 km² e 9 km² para os dois últimos, respectivamente.

A Figura 5.3 mostra a espacialização da frequência da recorrência das áreas queimadas para o bioma Cerrado (em relação às detecções de 2002). Ao analisarmos a frequência da recorrência de queima da biomassa para as amostras do mapeamento base, cerca de 90% destas apresentam até 3 registros, sendo que, 47% das amostras apresentaram uma recorrência (1.134 amostras), 28% duas recorrências (681 amostras) e 14% três recorrências (336 amostras). As amostras de áreas queimadas com recorrência igual ou superior a quatro correspondem a 10% do total: quatro recorrências, 133 amostras, cinco recorrências, 62 amostras, e seis recorrências, 30 amostras, ressaltando que foram registradas até nove recorrências (2 amostras).

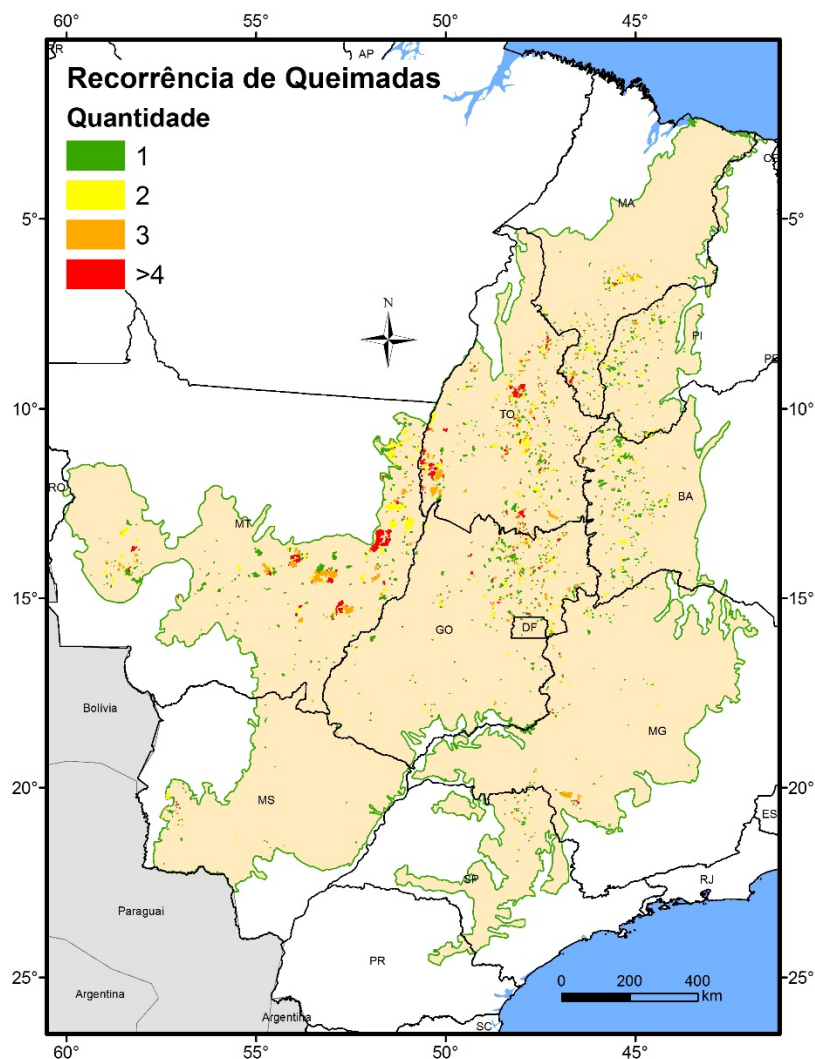


Figura 5.3 - Distribuição da frequência de recorrência das áreas queimadas no bioma Cerrado, segundo o mapeamento base (2.400 amostras).

A análise de distância do vizinho mais próximo revela que as recorrências de queimadas no bioma Cerrado ocorrem, em sua maioria (75% ou 1.804 amostras), entre 1 km a 6 km de distância em relação a outro fragmento de recorrência, enquanto 25% (596 amostras) ocorrem à distâncias superiores a 6 km (Figura 5.4). Dos 75%, a distância até 1 km é a que apresenta maior frequência, i.e. 42% (1.008), seguida da distâncias mínimas de 1 a 2 km (11% - 255), 2 a 3 km (6,8% - 164), 3 a 4 km (6,7% - 160), 4 a 5 km (6% - 138) e 5 a 6 km (3% - 79). Os fragmentos de recorrências de queimadas que se encontram em distâncias superiores a 6 km estão localizados, em sua maioria, em regiões fragmentas, com o predomínio da pastagem.

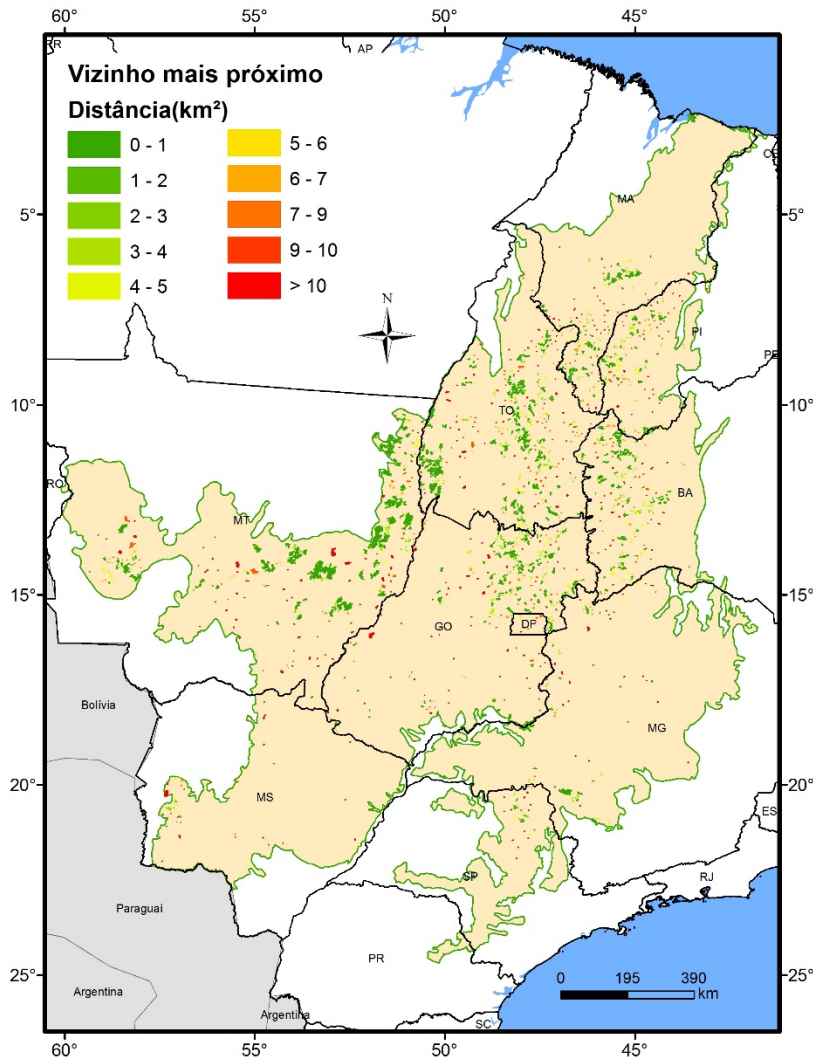


Figura 5.4 - Distâncias entre as áreas com queimadas recorrentes (em relação às detecções de 2002), conforme a análise de distância do vizinho mais próximo.

5.3.2. Análise do comportamento temporal e biofísico das áreas queimadas

5.3.2.1. Índice da Vegetação Realçado (EVI)

As áreas queimadas, conforme os quatro recortes de recorrências considerados, apresentam dinâmicas diferenciadas em relação aos valores da série temporal EVI entre 2000 a 2012. Como era esperado, os grupos A e B, devido ao longo período sem o registro de novos focos de incêndio, apresentam os maiores valores médios, i.e. 0,37 e 0,35, respectivamente. Por outro lado, para os grupos C e D, caracterizados por períodos menores de recorrência, os valores são ligeiramente próximos, de 0,34 e 0,33, respectivamente. Ao considerarmos o período de pré-fogo (2000-01), as áreas queimadas dos grupos A (0,39) e B (0,37) apresentaram, em média, maior vigor vegetativo em comparação aos grupos C (0,35) e D (0,34). Para o ano de 2002, ano

base de registro para a análise de recorrência das queimadas, os valores médios de EVI seguem a mesma ordem, i.e. significativamente menores para as áreas sujeitas à maior severidade e recorrência do fogo (Figura 5.5).

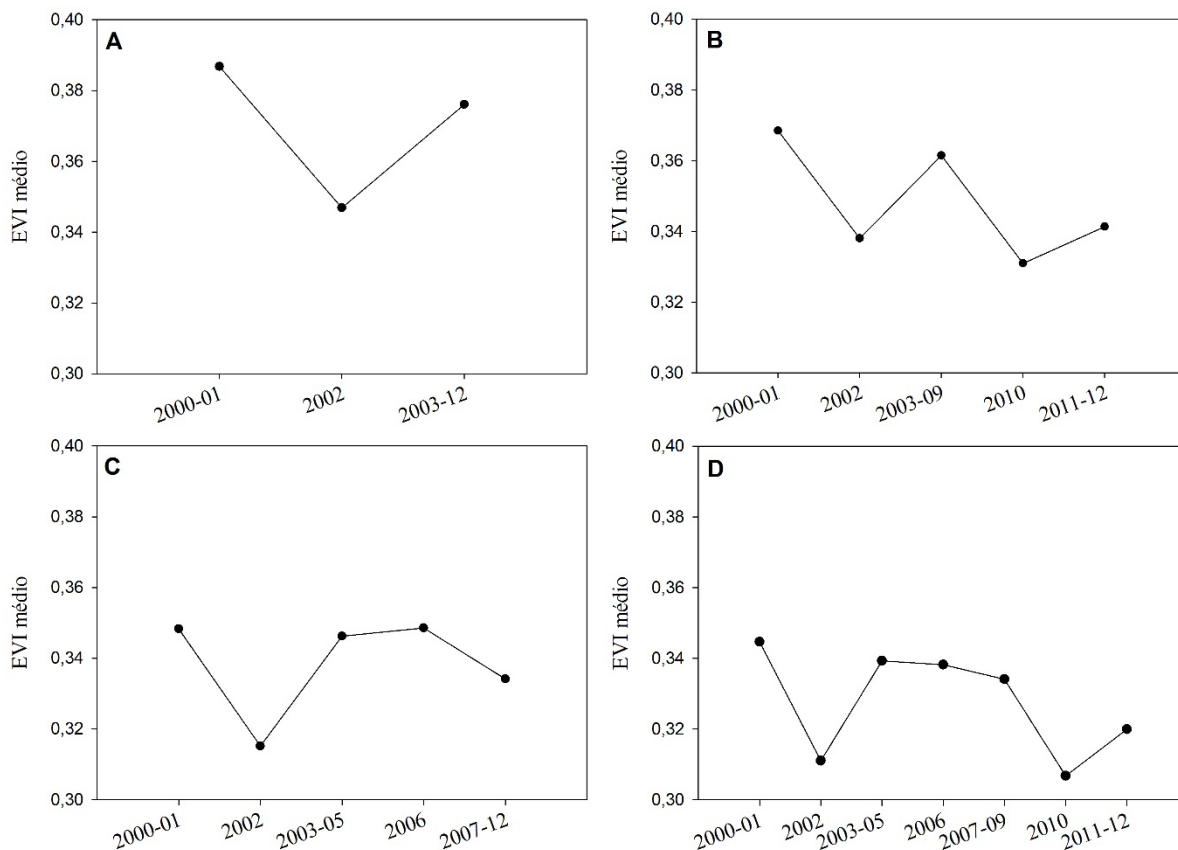


Figura 5.5 - Distribuição dos valores de EVI médio para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada, conforme os quatro grupos de recorrências (A, B, C e D).

Os recortes temporais de recorrência dos grupos C e D para os períodos pós-queimada (2003 a 2005) e de recorrência em 2006 apresentam valores próximos (0,35 e 0,34, respectivamente). Observa-se que no período pós-queimada de 2006, os grupos C e D registraram, em média, o mesmo vigor vegetativo (EVI de 0,33). Cabe ressaltar que o período pós-recorrência de queimadas é mais restrito para o grupo D, i.e. 2007 a 2009, comparativamente ao grupo C (entre 2007 a 2012) (Figura 5.5).

Ao analisarmos os grupos B e D para o período de 2010 e pós-recorrência, verifica-se que as áreas que queimaram duas ou mais vezes apresentaram queda na produção da biomassa nos anos subsequentes, pois as queimadas do grupo B entre 2003 a 2009 registraram, em média, valores de EVI de 0,36, em 2010 de 0,33 e entre 2011 e 2012, um aumento para 0,34. Para as

amostras do grupo D, os valores encontrados para os períodos citados foram de 0,34, 0,31 e 0,32, respectivamente (Figura 5.5).

As áreas queimadas do grupo A, por sua vez, as quais registraram um único período de queima da biomassa, apresentaram vigor vegetativo superior aos demais grupos analisados. Para o período pós-queimada, registra-se aumento expressivo da produção de biomassa em relação ao período da única ocorrência de fogo (EVI médio de 0,38), mas que se mostra inferior ao período de pré-queimada (EVI médio de 0,39) (Figura 5.5).

5.3.2.2. Evapotranspiração (ET) e Precipitação (PPT)

Entre os quatro grupos de recorrência analisados, os valores de evapotranspiração (ET) e precipitação (PPT), em média, são próximos, i.e. 59 mm e 122 mm, respectivamente. Para o período de pré-queimada, o grupo C apresentou os maiores valores médios de PPT, 126 mm, mas os menores valores de ET, em média 50 mm, enquanto o grupo B apresentou os maiores valores de ET para esse período, 58 mm, seguido do grupo D, com 56 mm (Figura 5.6).

Para 2002, os valores médios de PPT entre os grupos é de 109 mm, enquanto a ET apresenta maior variação nesse período, pois as áreas queimadas dos grupos B e D registraram, em média, 49 mm e 48 mm, respectivamente, seguidas dos grupos A (47 mm) e C (43 mm). O período pós-queimada é caracterizado pelo aumento significativo da ET para todos os grupos, sobretudo para os grupos C e D, marcados por recorrências de queima da biomassa com intervalo de quatro anos, os quais, até o último ano de recorrência (2006 e 2010, respectivamente), foram marcados por um aumento de 34% e 38% em comparação com o ano base de recorrência (Figura 5.6).

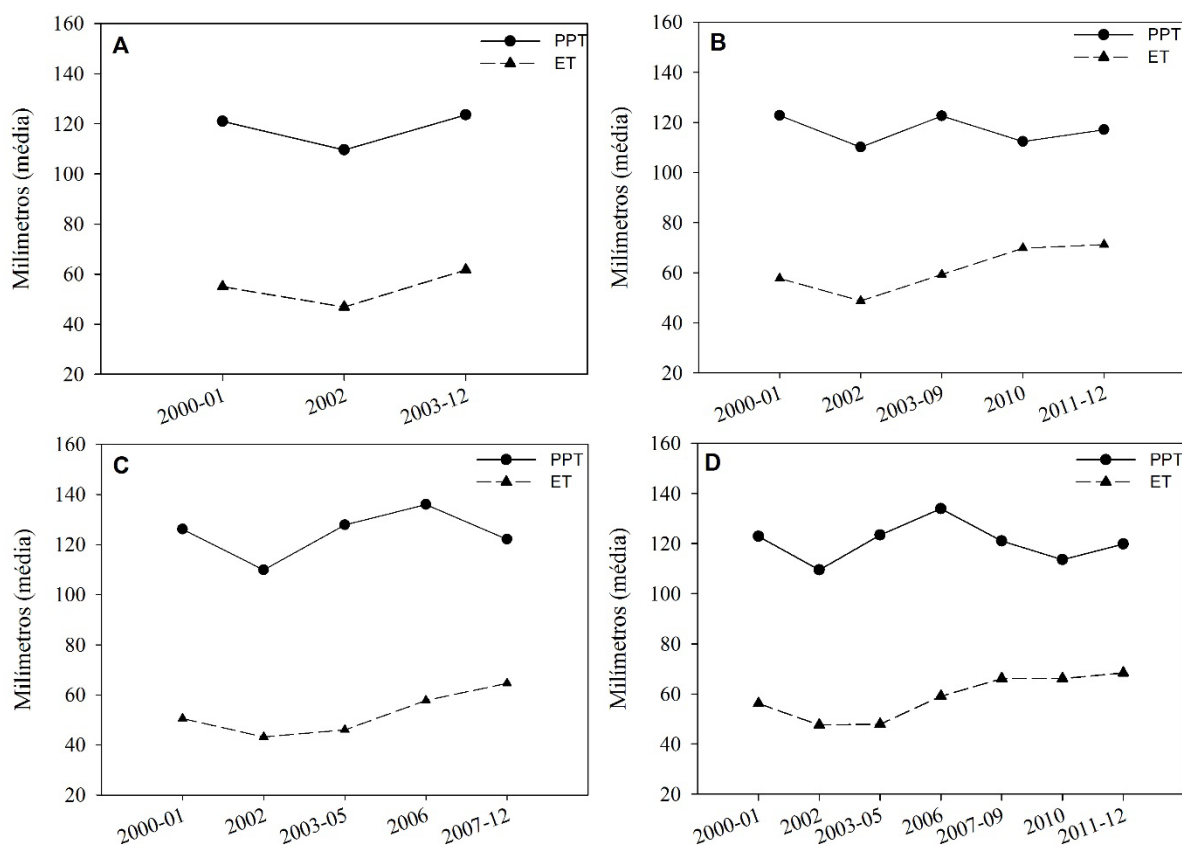


Figura 5.6 - Distribuição dos valores médios de precipitação (PPT) e evapotranspiração (ET) para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada, conforme os quatro grupos de recorrência (A, B, C e D).

O grupo B, por sua vez, registrou o maior aumento dos valores de ET após o período pós-queimada (base) (43%), sendo que, após 2010, a ET média foi de 71 mm. O grupo A registrou o menor aumento percentual da ET (31%), ainda que superior ao do período de pré-queimada. A PPT registrada para os quatros grupos também é superior aos períodos de pré-queimada, sobretudo para os grupos C e D em relação a 2006, onde foi registrado, respectivamente, 136 mm e 134 mm, enquanto em 2010, ano de maior registro de queimadas no Brasil e no Cerrado, temos uma queda na PPT, mas superior aos valores médios de 2002, seja para o grupo B (112 mm) ou grupo D (114 mm) (Figura 5.6).

5.3.2.3. Uso da terra e cobertura vegetal remanescente

As áreas queimadas analisadas de acordo com as classes de uso da terra e vegetação remanescente, entre os quatros grupos de recorrência, registraram valores diferenciados para a produção de biomassa (i.e. dados EVI), e entre os dados climáticos, precipitação e evapotranspiração, para os períodos de pré-queimada, queimada e pós-queimada, sobretudo

entre as classes de estrutura gramínea (estruturalmente semelhantes em relação ao material combustível fino).

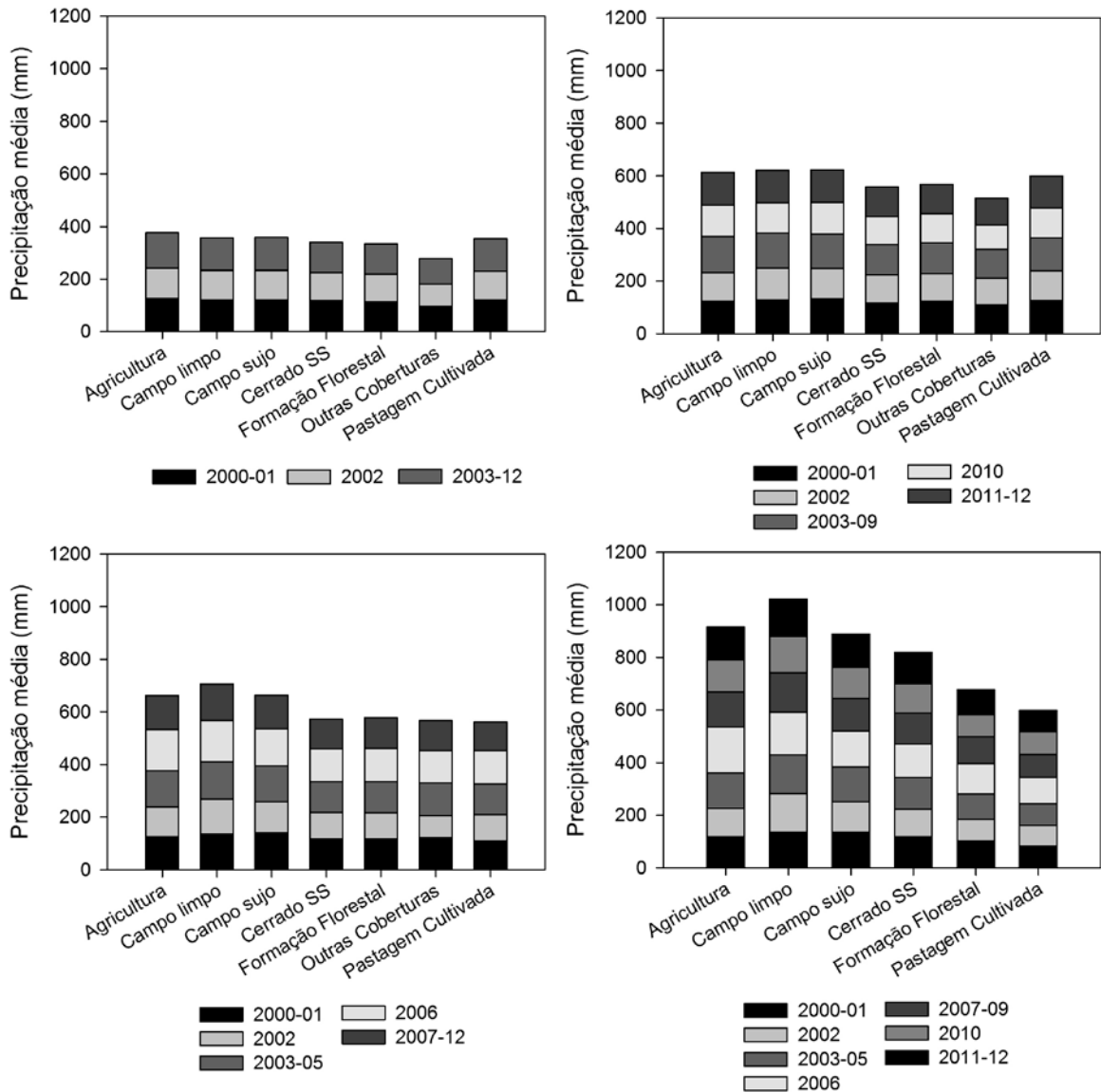


Figura 5.7 - Distribuição dos valores médios de precipitação para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente.

Entre as classes de estrutura gramínea, i.e. campo limpo, campo sujo e pastagem cultivada, temos uma dinâmica diferenciada para a quantidade de chuva registrada entre os grupos analisados. As áreas de recorrências de queimadas sobre a pastagem cultivada registrou, do grupo A ao D, nessa ordem, queda nos valores de precipitação totais para todo o período analisado, cuja a diferença entre a máxima e mínima PPT foi de 38 mm. Para as classes campo limpo e campo sujo observou-se o inverso, i.e. aumentos de 23 mm e 9 mm, respectivamente

(Figura 5.7). Em relação aos valores de ET registrados para as áreas de pastagens nos grupos A e C, estes se mostraram baixos (i.e. média de 55,5 mm), comparativamente aos grupos B e D, com valor médio para 64 mm; entre 2010 (ano de maior severidade de queimadas no Cerrado) a 2012, a ET média registrada foi de 71 mm. Para esse último período, as recorrências sobre as classes de campo limpo e campo sujo registraram valores inferiores ao da pastagem, em média 64 mm e 63 mm, respectivamente (Figura 5.8).

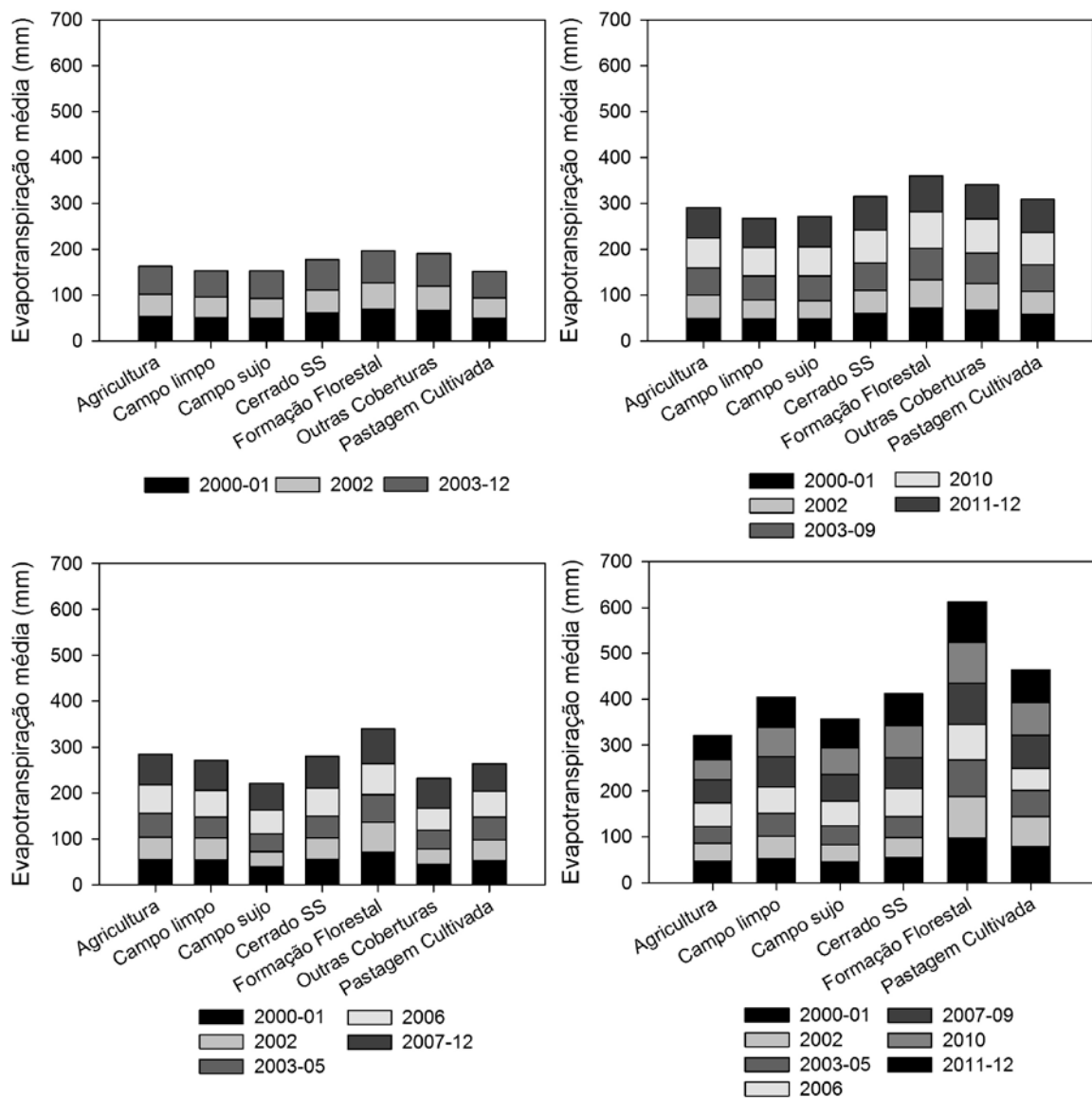


Figura 5.8 - Distribuição dos valores médios de evapotranspiração para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente.

Para as recorrências em regiões de agricultura, temos uma estabilidade da PPT para os quatro grupos (Figura 5.7), com uma variação entre os períodos da ordem de 2,5 mm. Quanto

a variação da ET entre os grupos A, B e C, esta é de 0,8 mm (59 mm em média), destacando-se uma queda acentuada para essa classe no grupo D (45 mm em média) (Figura 5.8). Contudo, como as regiões de agricultura possuem controle de manejo, sobretudo as áreas de grande produção de grãos (ex. soja), a recorrência de queimadas é pequena, como o registrado para essa classe no grupo D, somente um registro.

Diferentemente das classes de estrutura graminóide e de produção agrícola, os valores de PPT e ET são, em média, inferiores para as demais classes analisadas, pois para regiões de recorrência sobre o Cerrado Senso Stricto, a PPT entre os grupos apresenta uma pequena variação de 3,4 mm (mínimo no grupo B, 114,3 mm, e máximo para o grupo D, 117,7 mm), cuja a média para os períodos totais é de 115,5 mm, enquanto para os valores de ET, registra-se queda de 5,5 mm entre o grupo A ao D para as queimadas (máximo de 64 mm e mínimo de 59 mm (com média de 61 mm entre os períodos) (Figuras 5.7 e 5.8).

Para a classe de formação Florestal temos um cenário inverso, ou seja, aumento da ET, principalmente para as amostras do grupo D, que registraram, em média, 87,5 mm (período), enquanto registrou-se os menores valores de PPT (i.e. 98 mm em média), com destaque para 2002 (81 mm) e 2010 (83 mm). Os valores de ET registrados para a classe Formação Florestal foram superiores em média 35% em relação as demais classes analisadas e entre os grupos de recorrência (Figura 5.8).

Os valores de EVI, assim como os de PPT e ET, apresentam significativas oscilações entre os períodos temporais para as queimadas, sobretudo para as recorrências de maior frequência, como o grupo C que, após ano base, registrou aumento dos valores EVI, entre 2003 a 2005, de aproximadamente 9%, enquanto para 2006, primeira recorrência de queimada, os aumentos dos valores de EVI de 5% (agricultura), 1,2% (campo limpo), 2,3% (campo sujo) e 0,5% (formação florestal); ao contrário, para as classes cerrado sentido stricto e pastagem cultivada ocorreu uma queda de 1% e 6%, respectivamente (Figura 5.9).

Após 2006, para o período de pós-queimada, 2007 a 2012, temos uma queda do vigor vegetativo, ainda que não de forma pronunciada, as classes de vegetação remanescente registraram quedas nos valores EVI de aproximadamente 4%, com destaque para a fitofisionomia campo sujo (5%). Quanto as classes antrópicas, a agricultura teve a maior queda, de 4,3%, seguido das áreas de pastagens cultivadas, de 2,7%. As recorrências no grupo D pós-2006 seguem os ciclos de pequenos aumentos do EVI para as classes de agricultura, campo limpo e pastagem, sendo que para essa última, temos o maior aumento no período, aproximadamente 21% (0,28 para 0,34), enquanto para as classes remanescentes de campo sujo,

cerrado sensu stricto e formação florestal, foram registradas pequenas quedas, sendo de 5%, 1% e 0,5%, respectivamente. Pós 2010, período entre 2011 e 2012, são registrados aumento nos valores EVI para a maioria das classes analisadas, mas inferiores a 2006, ou seja, é registrado queda na produtividade de biomassa. A pastagem cultivada, por sua vez, a única classe que não apresentou aumento do EVI pós 2010, registrou uma queda de aproximadamente 10% e o menor valor de EVI entre os quatro grupos e entre períodos, i.e. 0,28 (Figura 5.9).

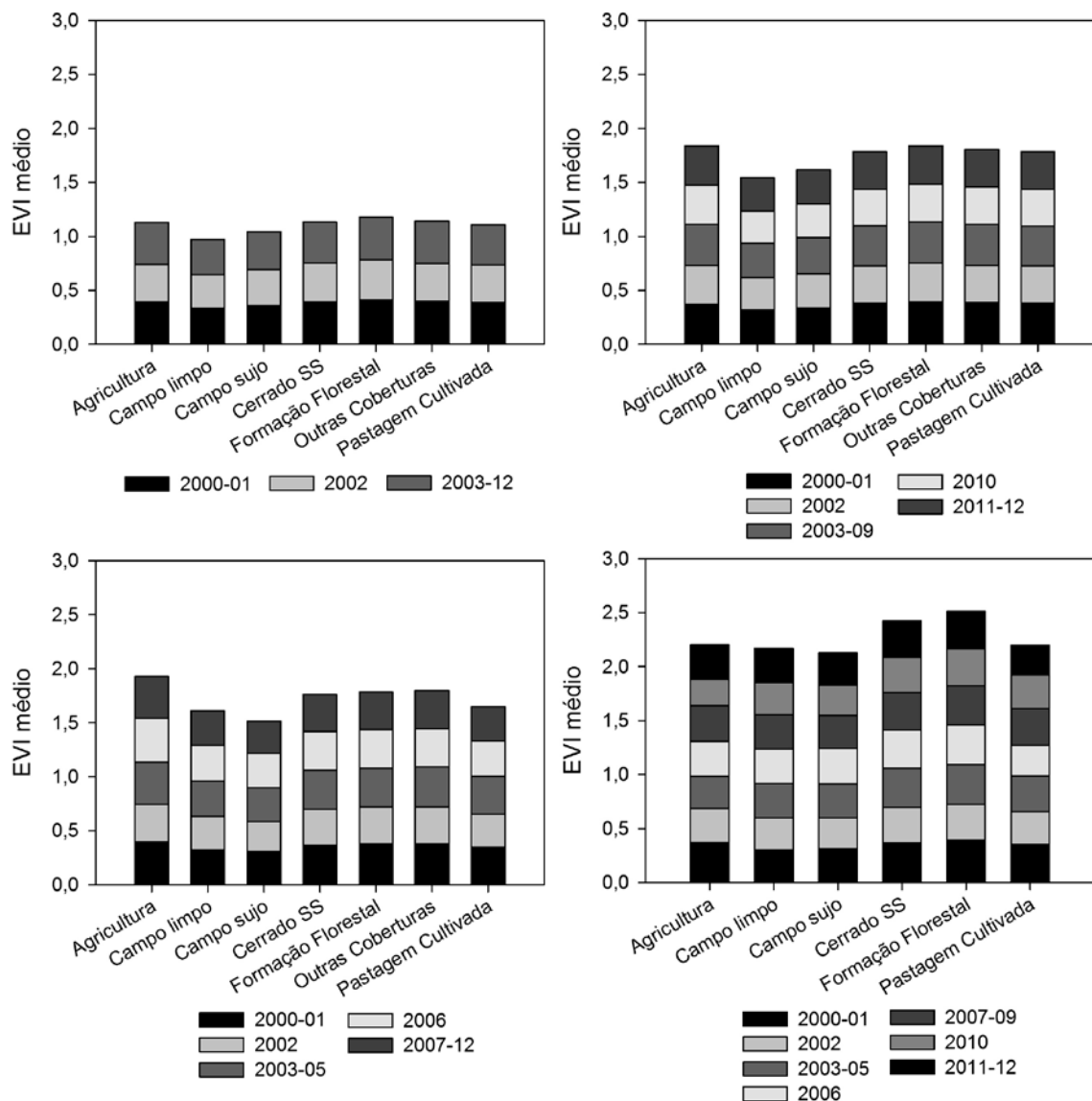


Figura 5.9 - Distribuição dos valores médios índice de vegetação (EVI) para os períodos de pré queimada, queimada e pós-queimada em relação aos quatro grupos de recorrência (A, B, C e D) e conforme as classes de uso do solo e remanescente.

Esse padrão de queda dos valores de EVI após a primeira queimada também é apresentando para os grupos A e B, pois entre os períodos pré-queimada e pós queimada (i.e.

após 2002 (A) e 2010 (B)), os valores registrados entre as classes apresentaram queda em média 2,7% no grupo A, enquanto para o grupo B, queda de 6,7%, com destaques para as classes formação florestal (-9,3%), cerrado senso stricto (-8,1%) e pastagem (-8,4%).

5.3.3. Discussão

Para os períodos secos mais pronunciados foram registradas as maiores extensões de áreas queimadas no Cerrado, bem como a maior quantidade de recorrências, as quais se concentraram basicamente sobre as classes de cobertura vegetal remanescente, mais propriamente em áreas de campo sujo, cerrado senso stricto e formações florestais, localizadas principalmente nas regiões centro-norte do bioma (Figura 5.10); enquanto a região centro-sul temos os menores registros devido a maior fragmentação da paisagem e com áreas mais bem manejadas de produção agropecuária. Com a expansão da fronteira agrícola no cerrado para os estados do Maranhão e Piauí é nítida a concentração das queimadas entre 2011 a 2013, as quais em maior proporção estão localizadas sobre as fitofisionomias supracitadas.

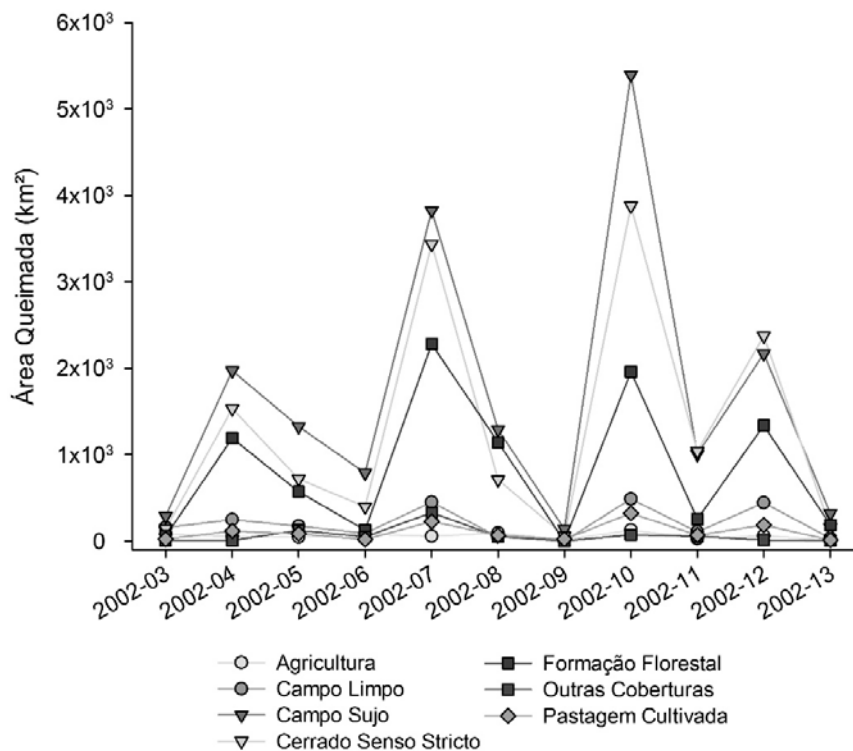


Figura 5.10 - Distribuição da recorrência de áreas queimadas (entre 2003 a 2013), a partir do mapeamento base de 2002, conforme as classes de uso da terra e cobertura remanescente.

Estudos apontam que para determinadas espécies naturais, o fogo é benéfico em relação a quebra da dormência de sementes, obtenção de nutrientes e renovação da vegetação

(Coutinho, 1977; Miranda et al., 2004; Medeiros e Miranda, 2005). No entanto, recorrências de queimadas anuais até trienais causam modificações na estrutura lenhosa, abrindo espaço para gramíneas e, em particular, espécies invasoras invasivas, as quais apresentam grande produção de biomassa e potencializam durante a estação do fogo queimadas mais intensas e com alto grau de severidade (devido ao calor liberado), e, conseqüentemente, maior dano às nativas (Hoffmann, 1996; Miranda et al., 2002; Rositer et al., 2003).

Além dos efeitos sobre a flora, as queimadas, com frequência de queimadas de 1 a 3 anos, apresentam efeitos consideráveis à fauna, dentre os quais, a diminuição da riqueza de pequenos mamíferos (taxa de crescimento populacional); queimadas recorrentes, contudo, também podem fornecer a manutenção ou aumento da produção de alimentos (Miranda, 2004; Henriques, 2010).

A frequência da recorrência das queimadas se mostrou baixa para as 2.400 amostras em relação ao mapeamento base (2002) e período analisado (2003 a 2013), com o predomínio de uma recorrência (Figura 5.11). Partindo do princípio que as áreas de pastagens cultivadas são responsáveis por grandes incêndios e, conseqüentemente, pelos maiores registros de recorrências no bioma Cerrado devido a maior disponibilidade de material combustível fino com elevada flamabilidade durante a estação seca, a frequência de recorrência sobre esta classe deveria ser alta, ou seja, igual ou maior que 3. Contudo, esta classe não se mostrou, com base nos dados analisados, como a principal classe em registros de recorrências, ainda que superior às classes de agricultura e campo limpo. Ressalta-se que esta análise foi realizada com base em dados de resolução espacial moderada (500m), e com mapeamento de uso da terra na escala de 1:250.000.

Especificamente, 68% e 64% das amostras de recorrências sobre as áreas de agricultura e pastagem cultivada, nessa ordem, apresentaram somente uma recorrência. As recorrências sobre áreas de pastagem e agricultura ocorrem espacialmente mais bem distribuídas no território do Cerrado, uma vez que, na ordem apresentada, a distância média destas classes em relação aos fragmentos mais próximos é de 7 km e 12 km. O padrão de apenas uma recorrência (maior proporção), como as classes antrópicas, também é identificado para as classes de vegetação remanescente de campo sujo (38%), cerrado sensu stricto (47%) e formações florestais (41%), as quais apresentam distâncias de 5 km, 4 km e 4,5 km, respectivamente, em relação as recorrências de queimadas mais próximas (Figura 5.11).

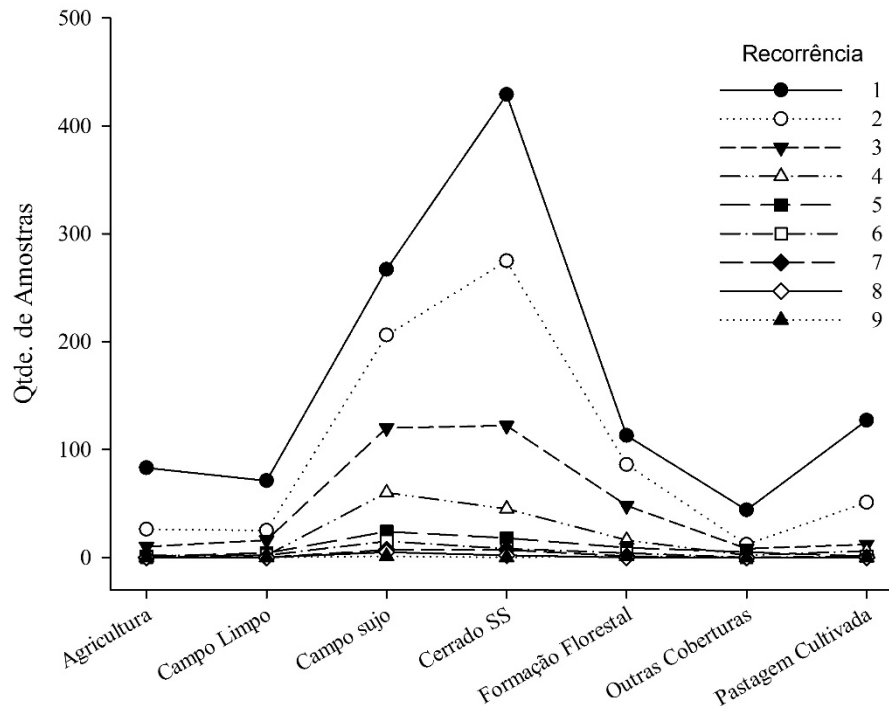


Figura 5.11 - Distribuição da frequência de recorrência (2003 a 2013) das áreas queimadas segundo as principais classes de uso da terra e cobertura vegetal remanescentes encontradas no bioma Cerrado.

Os dados encontrados corroboram estudos de Eiten (1972), segundo os quais, o bioma Cerrado apresenta queimadas recorrentes, em média, a intervalos de 1 a 3 anos, e que estas aumentaram consideravelmente devido as atividades humanas (Ramos-Neto e Pivello, 2000). A frequência de recorrências do fogo afeta diretamente a produção da biomassa e a severidade das queimadas, sendo que, de modo geral, a alta frequência de queimadas provoca a queda na intensidade do fogo, pois não há tempo para acúmulo de material combustível, já que favorecem a vegetação herbácea; ao contrário, a baixa frequência das queimadas permite o grande acúmulo de material combustível, o que pode gerar grandes incêndios, os quais são mais severos para espécies naturais e para a fauna (Kauffman et al, 1994; Ramos-Neto e Pivello, 2000).

Ao analisarmos o vigor vegetativo, considerando os quatro grupos (A ao D) de recorrências, a partir dos períodos de pré-queimada, queimada e pós-queimada, constata-se padrões diferenciados de intensidade da ação do fogo no bioma Cerrado. Em situações em que não há recorrência (grupo A), ou somente após quatro anos (grupo B), os valores de EVI para as amostras nos períodos de pré e pós-queimada (período de rebrota) se mostraram altos em relação as amostras cujos os períodos de recorrência são de quatro anos (grupos C e D). Esse padrão observado está relacionado com a remoção da parte aérea e efeito de poda, aumento da

disponibilidade de nutrientes, alterações nas condições microclimáticas e sazonalidade da PPT (Rosa, 1990).

Podemos ainda creditar esse vigor vegetativo superior do grupo A devido à grande concentração de amostras de formação gramínea, tais como a pastagem cultivada que apresenta grande produção de biomassa, e da agricultura (ciclos de produção). O ano de 2010 se mostrou um período de queimadas particularmente severas, pois entre os três períodos de ocorrência do fogo, este registrou os menores valores médios de EVI.

Os dados de PPT e ET nos revelam dinâmicas próximas entre os grupos, sendo registrado para o ano de 2002 os menores valores para essas variáveis. O período pós-queimada (em relação ao mapeamento base) é marcado pelo aumento nos níveis de PPT e ET, sobretudo para a PPT em 2006; é interessante observar que mesmo apresentando maior oscilação do vigor vegetativo (EVI) e de PPT pós 2006, os valores de ET permanecem constantes, sobretudo para 2010. A ET, de modo geral, depende de quatro variáveis meteorológicas (temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) (Allen et al., 1998), das características das áreas queimadas (amostras) e da capacidades destas se recuperarem rapidamente o vigor vegetativo após evento extremo do fogo, sobretudo as formações herbáceas (Coutinho, 1990; Miranda et al., 2004). Há também que se considerar a disponibilidade hídrica, sendo que os valores de PPT, em média, ficaram acima de 100 mm, o que explica, em parte, o aumento da ET observado.

Ao analisarmos o comportamento por classes do uso da terra e cobertura remanescente, as classes herbáceas apresentaram maior variação no vigor vegetativo, com tendência de queda após sucessivas queimadas, apesar do aumento na ET, como é o caso das amostras sobre as áreas de pastagem cultivada, campo sujo, cerrado sensu stricto e formação florestal após o período de 2010. Estudos apontam no Cerrado que, mesmo para espécies mais adaptadas, o aumento da frequência de queimadas contribui para a diminuição da capacidade de rebrota (Ramos, 2004; Medeiros e Miranda, 2008).

Essa queda do vigor vegetativo pode estar ligada a oscilação da PPT entre o período de pós-queimada de 2002, o qual registra aumento até 2006 e uma queda gradual após esse período, sobretudo após 2010. Se analisarmos os valores médios de PPT para os grupos B, C e D, considerando os dois últimos períodos de pós-queimada, registra-se queda entre as classes analisadas de 7 mm, 6mm e 4 mm, respectivamente. Essa queda da PPT média no período se mostra mais severa para as classes herbáceas, já que o sistema radicular é superficial, enquanto

para os sistemas arbóreos, cujo o sistema radicular é mais profundo, essa variação é menos pronunciada para curtos períodos, como demonstrado pelos dados EVI.

5.4. Conclusões

A análise de recorrência das áreas queimadas mostra que essa dinâmica ocorre com grande frequência no bioma Cerrado, sobretudo para os anos onde a estação seca ou do fogo se apresenta mais severa devido aos baixos níveis de umidade relativa do ar, altas temperaturas e grande disponibilidade de material combustível fino para os diferentes ecossistemas, como observado para os anos de 2007 e 2010.

A partir do mapeamento base das áreas queimadas, constata-se que a frequência das recorrências no Cerrado é alta, as quais apresentam padrões espaciais de localização no território bem definidos, uma vez que apenas 18% das queimadas registradas em 2002 (> 2 km²) não voltaram a queimar até 2012. A análise de distância mínima entre as recorrências mostra a proximidade destas, principalmente entre as classes de cobertura vegetal remanescente, como campo sujo, cerrado sensu stricto e formação florestal, indicando que essa recorrência está localizada também em áreas de proteção ambiental da biodiversidade, o que torna a situação ainda mais crítica devido a supressão de espécies da vegetação natural (principalmente espécies menos adaptadas ao ciclo do fogo) e da fauna (mamíferos, insetos, etc.).

Por meio da análise de séries temporais evidencia-se a queda do vigor vegetativo após ciclos de queimadas com frequência igual ou maior a 2 ocorrências, as quais, no último ciclo de pós-queimada, passam a registrar valores próximos ou abaixo aos registrados da primeira queimada, exceto para as áreas de agricultura. A queda do vigor vegetativo está associada à diminuição dos valores médios da PPT entre os períodos, os quais são significativamente menores nos períodos com registros de grandes queimadas (área) e aumento do registro de recorrências.

A ET, após o primeiro ciclo de queimadas para as amostras analisadas, registrou aumento significativo até o último período de pós-queimada, mesmo com queda dos valores médios de PPT média e EVI, sendo que esse aumento tendeu a ser mais significativo para as classes de cerrado sensu stricto e formação florestal, as quais apresentam sistema radiculares profundos, estando localizadas sobre solos mais desenvolvidos, com maior capacidade físico-química para retenção de água.

Com vistas ao melhor entendimento dos padrões espaço-temporais detectados a partir de dados satelitários, a análise do comportamento de severidade das recorrências em três recortes temporais se faz necessária, sendo queima bienal precoce (início da estação seca), queima bienal modal (meados da estação seca) e queima bienal tardia (final da estação seca) (Dias e Miranda, 2010). Da mesma forma, se faz necessário a obtenção sistemática de dados de campo, de tal forma que seja possível modelar intensidade, padrões de recorrência e os impactos do fogo para os diferentes ecossistemas do bioma Cerrado.

5.5. Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**. FAO, Rome, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e04.htm#evapotranspiration%20%28et%29>>. Acessado em: 15 dez. 2014.

ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution Patterns of Burned Area in the Brazilian Biomes: A Analysis Based on Satellite Data for the 2002-2010 Period. *Remote Sensing*, vol. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Fire frequency and area burned in the Roraima savannas of Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, vol. 204, 2005. p. 371-384.

BECKAGE, B.; PLATT, W. J.; GROSS, L. T. Vegetation, fire, and feedbacks: a disturbance-mediated model of savannas. **American Naturalist**, Vol. 174, 2009. p. 805–818.

BOND, W. J.; WOODWARD, F. I.; MIDGLEY, G. F. 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire. **New Phytologist**, vol.165(2), 2005. p. 525-538.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, vol. 20(7), 2005. p. 387-394.

BROOKS, M.L.; D’ANTONIO, C.M.; RICHARDSON, D.M.; GRACE, J.B.; KEELEY, J.E.; DITOMASO, J.M.; HOBBS, R.J.; PELLANT, M.; PIKE, D. Effects of invasive alien plants on fire regimes. **BioScience**, 54(7), 2004. p. 677-688.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J. K.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; CARLSON, J. M.; COCHRANE, M. A.; D’ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R. S.; DOYLE, J. C.; HARRISON, S. P.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUCK, M. A.; KULL, C. A.; MARSTON, J. B.; MORITZ, M. A.; PRENTICE, I. C.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SWETNAM, T. W.; VAN DER WERF, G. R.; PYNE, S. J. Fire in the Earth System. **Science**, v. 324, no. 5926, 2009. p. 481-484.

CHUVIECO, E.; DESHAYES, M.; AGUADO, I.; STACH, N.; COCERO, D.; RIAÑO, D. Short-term fire risk: Foliage moisture content estimation from satellite data. In **Remote Sensing**

of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Chuvieco, E. (Ed). New York: Springer-Verlag, 1999, p. 17–38.

CHUVIECO, E.; OPAZO, S.; SIONE, W.; DEL VALLE, H.; ANAYA, J.; DI BELA, C.; CRUZ, I.; MANZO, L.; LÓPEZ, G.; MARI, N.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; et al. Global burned-land estimation in latin america using MODIS composite data. **Ecological Applications**, Vol. 18, no. 1, p. 64-79, 2008.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Goldammer, J.G.(ed.). Fire in the tropical biota. **New York: Springer-Verlag**, 1990. Cap. 6, p. 82-105. (Ecological Studies, 84).

DIAS, B. F. S.; MIRANDA, H. S. O Projeto Fogo. In **Efeitos do regime de fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: projeto fogo**. Miranda, H. S. (Org). Brasília: IBAMA, 2010. p. 15-22.

HENRIQUES, R. P. B. Efeito do fogo na fauna de mamíferos do cerrado. In **Efeitos do regime do fogo sobre a estrutura de comunidades de cerrado: Resultados do Projeto Fogo**. Miranda, H. S. (Org.). Brasília: Ibama, 2010. p. 133-144.

HOFFMANN, W.A. The effects of fire and cover on seedling establishment in a neotropical savanna. **Journal of Ecology**, v. 84, 1996. p. 383-393.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing**, vol. 40, no. 8, 2002. p. 1824–1832.

JÖNSSON, P.; EKLUNDH, L. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Computers Geosciences**, vol. 30, 2004. p. 833–845.

KAUFMAN, Y. J.; SETZER, A.; JUSTICE, C.; TUCKER, C. J.; PEREIRA, M. C.; FUNG, I. The Contribution of Remote Sensing to the Global Monitoring of Fires in Tropical and Subtropical Ecosystems. *In: Fire in Tropical Biota Ecosystem Processes and Global Challenges*. ed. Goldammer, J.G. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990. pp. 337-368

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. **Journal of Ecology**, vol. 82, 1994. p.519–531.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A.T.C.; STOCKER, E.; ADLER, R.F.; HOU, A.; KAKAR, R.; WENTZ, F.; ASHCROFT, P.; KOZU, T.; HONG, Y.; OKAMOTO, K.; IGUCHI, T.; KUROIWA, H.; IM, E.; HADDAD, Z.; HUFFMAN, G.; FERRIER, B.; OLSON, W.S.; ZIPSER, E.; SMITH, E.A.; WILHEIT, T.T.; NORTH, G.; KRISHNAMURTI, T.; NAKAMURA, K. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal Applied Meteorology**, Vol. 39, 2000. p.1965–1982.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da Paisagem com SIG**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2009. 405p.

LONGO, K.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; YOKELSON, R.; ARTAXO, P. Biomass Burning in Amazonia: Emissions, Long-Range Transport of Smoke and Its Regional and Remote Impacts. In: John Gash; Michael Keller; Mercedes Bustamante; Pedro Silva Dias. (Org.). **Amazonia and Global Change**: American Geophysical Union Press, 2009.

MEDEIROS, M. B.; Miranda, H. S. Mortalidade pós-fogo em espécies lenhosas de campo sujo submetido a três queimadas prescritas anuais. **Acta Botânica Brasileira**, v. 19, 2005. p. 493-500.

MEDEIROS, M. B.; MIRANDA, H. S. Post-fire resprouting and mortality in Cerrado woody plant specie. **Edinburgh Journal Botany**, v. 65, 2008. p.1-16.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M.M.C.; MIRANDA, A. C. The Fire Factor. In **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. Oliveira, P. S.; Marquis, R. J. (Eds); Columbia University Press: New York, USA, 2002. p. 51-68.

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A.; HARUDASAN, M.; MORAIS, H. C. Queimadas de Cerrado: Caracterização e Impactos. In **Cerrado: Ecologia e Caracterização**; Aguiar, L. M. S., Camargo, A. J. A. (Eds.); Embrapa Cerrados: Planaltina, Brazil, 2004. p. 69–123.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/MMA/SBF. **Mapeamento da Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado, Relatório Final**; Edital Probio 02/2004; Projeto Executivo B.02.02.109, Brasília, Brazil, 2007.

OLIVEIRA, P. E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In Sano, S. M.; Almeida, S. P. (Org.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa, 1998. p. 193-230.

PIVELLO, V.R.; Oliveras, I.; Miranda, H.S.; Haridasan, M.; Sato, M.N.; Meirelles, S.T. 2010. Effect of fires on soil nutrient availability in an open savanna in Central Brazil. **Plant and Soil**, vol. 337(1-2), 2010. p. 111–123.

RAMOS, A. E. Efeito do fogo bienal e quadrienal na estrutura populacional e reprodução de quatro espécies vegetais do Cerrado Sensu Stricto. **Tese (Doutorado)**. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

RAMOS-NETO, M. B. e PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna National Park: rethinking management strategies. **Environmental Management** Vol. 26, No. 6. 2000. p. 675-684.

RANDERSON, J. T.; CHEN, Y.; VAN DER WERF, G. R.; ROGERS, B. M.; MORTON, D. C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal of Geophysical Research**, vol. 117, G04012, p. 1-23, 2012.

ROSA, C. M. M. Recuperação pós-fogo do estrato rasteiro de um campo sujo de cerrado. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade de Brasília, Brasília, 1990. 144p.

ROSSITER, N. A.; SETTERFIELD, S. A.; DOUGLAS, M. M. e HUTLEY, L. B. Testing the grass-fire cycle: alien grass invasion in the tropical savannas of northern Australia. **Diversity and Distributions**, v. 9, 2003. p. 169-176.

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**, Vol. 83, 2002. p. 263-286.

ROY, D. P.; JIN, Y.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. **Remote Sensing of Environment**, Vol. 97, 2005. p. 137-162.

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**, Vo. 112, 2008. p. 3690-3707.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, Vol. 166, p. 113-124, 2010.

SATO, M. N. Efeito a longo prazo de queimadas na estrutura da comunidade de lenhosas da vegetação do cerrado sensu stricto. **Tese de Doutorado**, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

SELLERS, P. J.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, vol. 275, 1997. p. 502-509.

SUGIHARA, N.G.; J.W. VAN WAGTENDONK, AND J. FITES-KAUFMAN. Fire as an ecological process. in: N.G. Sugihara, J.W. van Wagtendonk, K.E. Shaffer, J. Fites-Kaufman, and A.E. Thode, editors. **Fire in California's ecosystems**. University of California Press, Berkeley, USA. 2006. p. 58-74.

TAN, B.; MORISETTE, J. T.; WOLFE, R. E.; GAO, F.; EDERER, G. A.; NIGHTINGALE, J.; PEDELTY, J. A. An enhanced TIMESAT algorithm for estimating vegetation phenology metric from MODIS data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Vol. 4, n. 2, 2011. p. 361-371.

TANSEY, K.; GREGOIRE, J. M.; STROPPIANA, D.; SOUSA, A.; SILVA, J.; PEREIRA, J. M. C.; BOSCHETTI, L.; MAGGI, M.; BRIVIO, P. A.; FRASER, R.; FLASSE, S.; ERSHOV, D.; BINAGHI, E.; GRAETZ, D.; PEDUZZI, P. Vegetation burning in the year 2000: Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data. **Journal of Geophysical Research**, Vol. 109, D14S03, p. 1-22, 2004.

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO, A. F.; OLSEN, S. C. KASISCHKE, E. S. Continental-

Scale Partitioning of Fire Emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña Period, **Science**, v. 303, 2004. p. 73-75.

VERBESSELT, J.; JÖNSSON, P.; LHERMITTE, S.; AARDT, J. V.; COPPIN, P. Evaluating satellite and climate data-derived Indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. **IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Vol. 44, n. 6, 2006. p. 1622-1632.

6. Considerações Finais

Os registros de áreas queimadas no bioma Cerrado entre 2000 a 2013 se intensificaram, principalmente sobre o extrato vegetal remanescente, como o herbáceo-gramíneo, que apresenta grande produção de material combustível fino durante a estação chuvosa e rápida recuperação da vegetação após a supressão do fogo na estação seca. Dessa forma, a detecção sistemática das cicatrizes de queimadas nesse ecossistema savânico é de fundamental importância, seja para o monitoramento da perda das espécies da fauna e da flora após a ocorrência, ou devido à alta frequência do fogo sobre determinada área, bem como estimar a emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, um dos principais componentes das mudanças climáticas globais.

A dinâmica da ocorrência das queimadas no bioma Cerrado é bastante conhecida, pois o período da estação do fogo, ou seca, está delimitada entre os meses de maio (início) a meados de outubro (final), sendo os meses de agosto e setembro os mais críticos para a ocorrência, confirmado com os dados trabalhados nessa pesquisa, quando o material combustível fino registra os menores valores de umidade e temperaturas altas devido à grande incidência solar ao longo dos dias, associado a estes a ação do vento, que condiciona o rápido espalhamento do fogo sobre a paisagem. No entanto, a extensão territorial das áreas queimadas se faz importante, pois permite localizar espacialmente os diferentes ecossistemas atingidos pelo fogo e a sua resposta de recuperação no período pós-queimada.

O produto MODIS MCD45A1 área queimada, ainda que um produto global e com resolução espacial moderada (500 m), oferece boa performance para o monitoramento sobre o Cerrado, já que os dados apresentam alta consistência temporal e espacial ao longo das séries analisadas, mesmo apresentando erro de omissão alto, sobretudo para as regiões que apresentam maior fragmentação da paisagem, as quais registram pequenas queimadas abaixo do limite de detecção. Como exemplo da consistência temporal e espacial temos a região nordeste do bioma, ou MATOPIBA, especificamente entre os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, atualmente zona da nova fronteira agrícola, a qual desde 2011 registra-se o aumento da ocorrência e extensão das áreas queimadas, sobretudo sobre áreas remanescentes.

Ainda que os mapeamentos de uso da terra e cobertura vegetal remanescente sejam confeccionados na escala de 1:250.000 e não apresentem atualizações anuais, as queimadas no território brasileiro entre 2002 a 2013 estão localizadas sobre as áreas de vegetação remanescente, sobretudo localizadas em áreas destinadas para conservação da biodiversidade, ainda que essa proporção aponte variação entre os anos, sobretudo para os biomas da Amazônia,

Cerrado e Pantanal, os quais registram uma sazonalidade climática mais pronunciada entre as estações seca e chuvosa.

A recorrência das queimadas no Cerrado apresenta padrões de localização em seu limite territorial com base na série temporal analisada, especificamente, estas se encontram em maior proporção entre os estados da Bahia, Goiás (norte), Mato Grosso, Maranhão, Piauí e Tocantins. A frequência da recorrência, por sua vez, assim como em estudos já realizados no Cerrado, registra maior proporção entre 1 a 3 anos para a mesma área queimada ($\geq 50\%$), as quais conferem queda no vigor vegetativo, principalmente para as classes remanescentes (campo limpo, campo sujo e cerrado *sensu stricto*), como também para a classe pastagem sem a presença de técnicas de manejo.

Ainda que a evapotranspiração para as amostras de áreas queimadas analisadas registrem aumento no período de pós-queimada, é evidente a queda dos valores de precipitação para o período analisado, principalmente para as regiões que apresentam maior frequência de recorrência, sobretudo após 2006. Os períodos de extremos eventos de queimadas no Cerrado, i.e. 2007, 2010 e 2012, foram marcados por períodos de queda da precipitação e pelos maiores registros de recorrência do fogo na paisagem, o que demonstra que as recorrências, sobretudo os grandes incêndios, possuem padrões espaciais de localização no Cerrado, o que facilita, a princípio, o monitoramento e a implementação de manejos, como os aceiros preventivos.

O combate ou o monitoramento das queimadas é desafiador, seja na logística de campo (grande custo econômico) ou na utilização de dados orbitais, já que estamos tratando de um bioma com mais de 2 milhões km² e que apresenta diferentes características edafoclimáticas ao longo de sua variação latitudinal. Com o avanço dos satélites e sensores orbitais com temporalidade menor e maior resolução espacial, bem como novos produtos orbitais, como o *Soil Moisture Active Passive* (SMAP), medição da umidade do solo, que auxiliará em uma maior compreensão das diferentes regiões naturais em função de períodos de secas mais severos e o comportamento da ocorrência das queimadas, que aliado ao conhecimento de campo, auxiliará na maior compreensão dos seus efeitos para o sistema Cerrado.

APÊNDICE A

Artigo submetido ao Boletim Goiano de Geografia no âmbito da disciplina de Oficinas do programa de doutorado em Ciências Ambientais – CIAMB.

Análise da ocorrência das morbidades respiratórias e sua relação com a incidência de áreas queimadas para o Estado de Goiás
Analysis of the occurrence of respiratory morbidity and its relationship with the incidence of burned areas for the State of Goiás
Analyse de l'occurrence de la morbidité respiratoire et sa relation avec l'incidence des zones brûlées pour l'État de Goiás

Fernando Moreira de Araújo
Universidade Federal de Goiás – UFG
fernandomsbl@gmail.com

Fausto Miziara
Universidade Federal de Goiás – UFG
fausto@fchf.ufg.br

Resumo

As queimadas provocam diversas externalidades negativas ao meio ambiente, tais como a perda da biomassa vegetal natural, aumento da emissão de material particulado fino para a atmosfera, elevação da temperatura de superfície e o agravamento das morbidades respiratórias. Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa é analisar o efeito da incidência das áreas queimadas sobre as internações e os custos do tratamento das morbidades respiratórias registrados pelo Sistema Único de Saúde (SUS) para o estado de Goiás em 2010. As morbidades bronquite e enfisema e asma apresentaram quatro vezes mais internações que as do trato respiratório superior, sendo que para estas, a média de internações e de custos de tratamento foram maiores no período seco (estação das queimadas). As mesorregiões norte, sul e leste foram as mais afetadas pelos efeitos das queimadas, respectivamente. Entretanto, o centro goiano apresentou os menores registros de queimadas em 2010 e os maiores registros de internações e de custos de tratamento em relação as demais mesorregiões goianas. Dentre as morbidades respiratórias, a asma é a que apresentou a maior correlação com os registros de áreas queimadas para o período analisado.

Palavras-Chave: Queimadas, Morbidades Respiratórias, Internações, Goiás.

Abstract

Fires cause various negative externalities to the environment, such as the loss of natural biomass vegetation, increased emission of fine particulate material into the atmosphere, raising of the surface temperature and the aggravation of respiratory diseases. The objective of this paper is to analyze the effect of the incidence of burned areas on hospital admissions and costs of treatment of respiratory diseases registered by the Sistema Único de Saúde (SUS) for the state of Goiás in 2010. The morbidities bronchitis and emphysema and asthma were four times more hospitalizations than the upper respiratory tract, and for these, the average hospitalization and treatment costs were higher in the dry season (season of burning). The regions north, south and east were most affected by the effects of fires, respectively. However, the center region of Goiás had the lowest records of burned in 2010 and the biggest records of hospital admissions and the costs of treatment compared with other regions of Goiás. Among respiratory diseases, asthma is the one that showed the highest correlation with the records of burned areas for the period analyzed.

Key-words: Burning, Respiratory Diseases, Admissions, Goiás.

Résumé

Les incendies entraînent diverses externalités négatives sur l'environnement, tels que la perte de biomasse de la végétation naturelle, l'augmentation des émissions de particules fines dans l'atmosphère, élévation de la température de surface et l'aggravation des morbidités respiratoires. Ainsi, l'objectif de cette recherche est d'analyser l'effet de l'incidence des zones brûlées sur les hospitalisations et les coûts de traitement des maladies respiratoires enregistrées par le Sistema Único de Saúde (SUS) pour l'état de Goiás en 2010. La bronchite et l'emphysème et l'asthme étaient quatre fois plus d'hospitalisations que les voies respiratoires supérieures, et pour ceux-ci, la moyenne d'hospitalisation et les coûts de traitement ont été plus élevées pendant la saison sèche (saison de la combustion). Les régions nord, sud et à l'est ont été les plus touchés par les effets des feux, respectivement. Cependant, le centre de l'État avait les plus bas records brûlé en 2010 et les plus grandes registres d'hospitalisation et les coûts de traitement par rapport à d'autres régions du Goiás. Parmi les maladies respiratoires, l'asthme est celui qui a montré la plus forte corrélation avec les dossiers des zones brûlées pour la période analysée.

Mot-clé: Brûles, Maladies Respiratoires, Hospitalisation, Goiás.

Introdução

O Estado de Goiás possui 97% do seu território dentro do bioma Cerrado, no entanto, a porcentagem de áreas que ainda se encontram com cobertura vegetal natural nesse bioma é de aproximadamente 34,5% (Sano et al, 2008). Boa parte desta ocupação se deve às políticas de expansão agropecuária, intensificadas a partir da década de 1970 (Miziara e Ferreira, 2008), quando a precária infraestrutura da região e a distância aos principais mercados consumidores passa a ser compensada por atrativos econômicos e tecnológicos, tais como incentivos fiscais, baixo preço das terras e o desenvolvimento de novos insumos para as práticas agrícolas (variedades de sementes, adubos e maquinários), os quais foram adaptados ao clima sazonal marcante (estação seca e chuvosa) e ao relevo plano do Cerrado. Outro motivo foi o próprio estímulo à ocupação do território brasileiro (Centro-Oeste e Norte do país), visto como estratégico, para o governo militar, à época da ditadura (Ferreira et al., 2009).

Por ser um estado cujo um dos pilares da economia são as atividades agropecuárias, as queimadas estão entre as principais práticas de uso e manejo da terra, devido ao seu baixo custo econômico para o agropecuarista. De fato, na região do Cerrado, a ocorrência de queimadas vem acontecendo de forma mais intensificada desde o desenvolvimento da agropecuária, especificamente para a monocultura, sendo principalmente atribuídas às práticas antrópicas, como, o manejo do pasto para criação de bovinos, controle de pastagens, de pragas e expansão agrícola (pós-desmatamento) (Coutinho, 1990; Riveira-Lombardi, 2003).

As queimadas no território brasileiro apresentam um período de maior intensificação nos meses de agosto e setembro (estação seca) (Riveira-Lombardi, 2003; Eiten, 1994; Longo et al., 2010), sobretudo nos estados em que a formação vegetal predominante é do bioma Cerrado em seus limites territoriais, como é o caso de Goiás. Nesse período, tem-se os menores valores de umidade relativa do ar, queda drástica da pluviosidade e elevação da temperatura relativa do ar, o que, somados à grande quantidade de material combustível fino seco (gramíneas e folhas vivas ou mortas, e ramos finos, com diâmetro menor ou igual a 6 mm) disponível no ambiente, como também, a vegetação de extrato herbáceo, espécies exóticas (*brachiaria decumbens*) e o aumento da quantidade de irradiação solar incidente ao longo do dia, potencializam a ocorrência das queimadas (França, 2001; Miranda et al., 2004), bem como os seus custos econômicos para a sociedade.

As queimadas, seja natural ou antrópica, geram externalidades negativas ao meio ambiente, sobretudo para a sociedade, como o aumento da emissão de material particulado e emissões de gases para a atmosfera, como o CO₂, CO, NO e N₂O, estes causam prejuízos a qualidade do ar, e ainda aumentam os efeitos danosos provocados pela fumaça à saúde humana (Mendonça et al., 2004; Roseiro, 2002). Mendonça et al. (2004) constataram em sua análise que 8% dos casos de morbidades respiratórias na região amazônica, entre 1996-1999, estavam relacionados à produção de fumaça devido a queima de biomassa vegetal. Cançado (2003), por sua vez, constatou que a queima da palha da cana-de-açúcar no município de Piracicaba-SP elevou o número de internações hospitalares devido a maior concentração de material particulado fino (2,5 µm e 10 µm) em suspensão no ar.

Dessa forma, objetiva-se para esse estudo analisar o efeito do período de maior incidência das queimadas (estação seca) em relação ao registro de morbidades respiratórias e seus respectivos custos de tratamento para o Sistema Único de Saúde (SUS). Para tanto, será utilizado o método de análise espacial da ocorrência das áreas queimadas e internações referentes às morbidades respiratórias (trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma) para o estado de Goiás em 2010.

Área de Estudo

O Estado de Goiás, localizado na região central do território brasileiro, possui uma área de 340.086 km², sendo que, atualmente é a nona economia em geração de riquezas para o PIB brasileiro, o qual, entre 2002 a 2010, cresceu 1,5 ponto percentual em relação à média brasileira

(IBGE, 2012). Em seus limites encontram-se duas importantes bacias hidrográficas, a bacia do Rio Araguaia (região sudoeste) e do Rio Tocantins (região norte).

A agropecuária ocupa posição de destaque na atividade produtiva do estado, dessa forma, as áreas de pastagem e agricultura ocupam aproximadamente 62% do território goiano (MMA, 2007). Por possuir na atividade agropecuária um dos seus principais setores econômicos, a utilização das queimadas se faz presente no manejo do uso da terra, principalmente para limpeza de áreas agricultáveis, devido ao seu baixo custo e por diminuir os encargos da produção. A figura 1 mostra a distribuição das áreas queimadas no Brasil, entre os anos de 2002 e 2011, por estados.

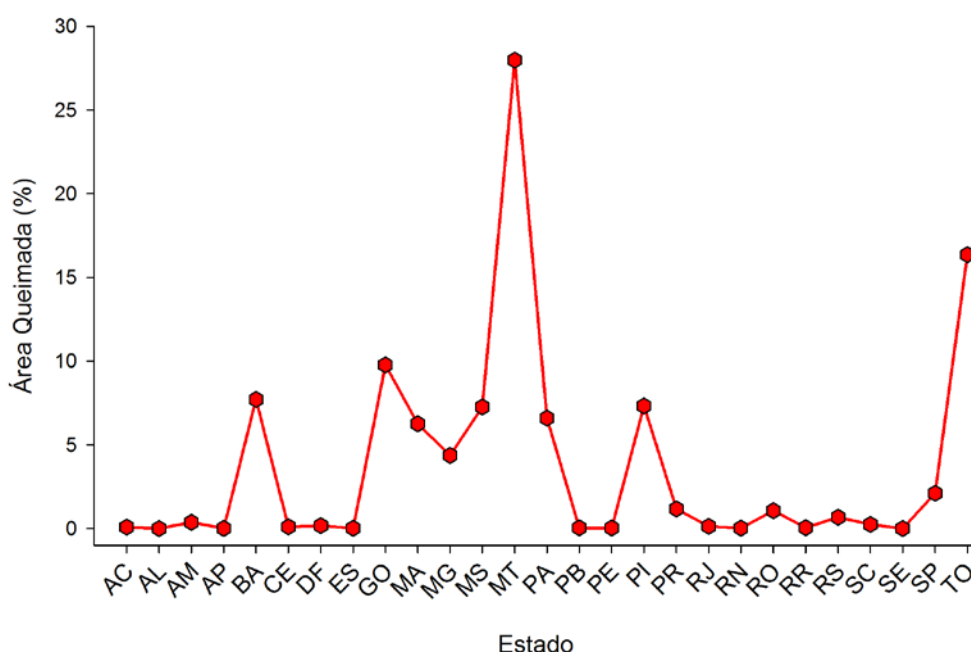


Figura 1 – Distribuição da porcentagem da área queimada registrada no território brasileiro, entre 2002 a 2011, segundo os limites estaduais.

Goiás, conforme a figura 1, está entre os principais estados (terceiro lugar) com registros de cicatrizes de queimadas no período de 2002 a 2011. Ao todo, para este período foram detectados 78.225 km² de área queimada, representando 10% da área queimada registrada no território brasileiro no período supracitado (NASA, 2012).

Procedimentos Metodológicos

Os dados de morbidades respiratórias em relação às internações e o custo médio para o tratamento médico foram obtidos, mês a mês, para o ano de 2010, o qual é caracterizado como o mais severo climaticamente, e com a maior concentração de áreas queimadas no período entre 2002 e 2011 em Goiás, assim como, em todo território brasileiro (Araújo, et al., 2012) (Figura

2). Cabe ressaltar que, em 2010, o continente sul-americano foi marcado pelo intenso efeito do fenômeno El Niño (NOAA, 2012), o qual provoca o aquecimento das águas no oceano pacífico, influenciando nas formações de massas de ar úmidas que atuam no continente.

Especificamente, os dados referente aos problemas respiratórios foram obtidos por meio do sistema DATASUS⁶ do Sistema Único de Saúde (SUS), incluindo dados de internações e os custos totais (R\$), mensais e anuais, disponibilizados pelos municípios goianos para o tratamento das doenças do aparelho respiratório, bronquite e enfisema e asma. Do total de municípios goianos (246), 176 (72%) disponibilizaram tais dados.

Quanto ao dado de área queimada, este foi obtido por meio do produto MODIS MCD45A1, com resolução temporal de 30 dias e resolução espacial de 500 metros. Dos oito subprodutos, selecionamos os produtos *Burndate* (data da área queimada) e *Ba and Qa* (confiabilidade da área queimada) para obter os polígonos de queimadas com a máxima confiabilidade (Boschetti et al., 2009; Roy et al., 2008).

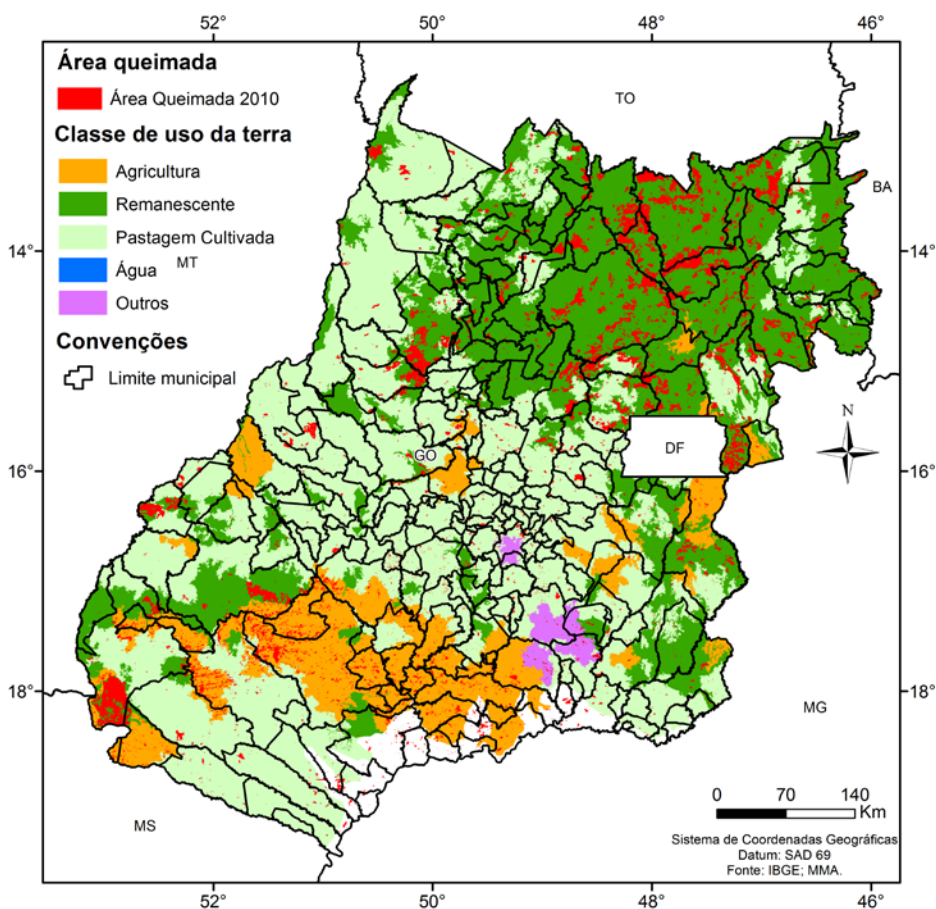


Figura 2 – Distribuição das áreas queimadas totais para o estado de Goiás em relação a 2010.

⁶ Página de acesso: <http://www.datasus.gov.br>

Resultados

Análise e distribuição das áreas queimadas no Estado de Goiás

Entre 2002 a 2011 as queimadas no território brasileiro consumiram aproximadamente 800.573 km², sendo que, os estados brasileiros que apresentaram maiores extensões de áreas queimadas neste período foram Mato Grosso, Tocantins e Goiás (224.035 km², 131.027 km² e 78.226 km², respectivamente). A área queimada registrada nesses três estados representa 54,1% de todo material combustível (biomassa seca) consumido pelas frentes de fogo no território brasileiro. Da área restante, 62% das queimadas registradas no período ocorreram na Bahia (17%), Mato grosso do Sul (16%), Piauí (16%) e Maranhão (14%), os quais estão inseridos na nova fase da fronteira agrícola nacional presente no limite do bioma Cerrado, ou seja, o corredor MAPITOBA.

As áreas queimadas no estado de Goiás no período de 2002 a 2011 apresentaram grande variabilidade, sobretudo para os anos caracterizados com fortes eventos climáticos (EL NIÑO e LA NIÑA), 2007 e 2010, os quais foram sucedidos (2008 e 2011) por redução considerável dos registros de queimadas (Figura 4). Segundo a divisão por mesorregiões, as maiores proporções de registros de áreas queimadas se encontram nas regiões norte (35%), sul (29%) e leste goiano (24%). Para igual período, as regiões noroeste e centro goiano apresentam os menores registros de queimadas no estado, correspondendo a 8% e 4%, respectivamente.

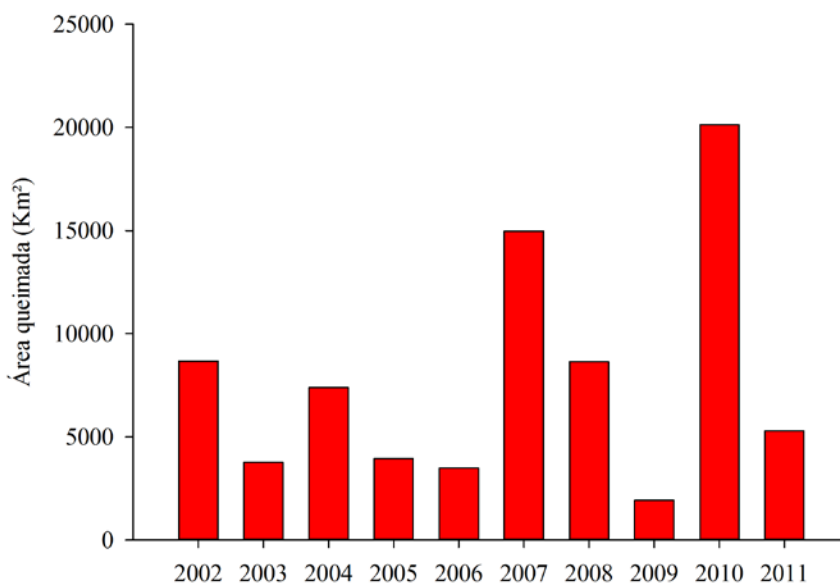


Figura 4 – Extensão da área queimada para o estado de Goiás entre o período de 2002 a 2011.

Analisando a distribuição das áreas queimadas em Goiás sobre as classes de uso da terra e cobertura vegetal natural registradas entre 2002 a 2011, estas se concentram em maior proporção sobre a classe de vegetação remanescente (65%), seguida pelas classes de agricultura (20%) e pastagem cultivada (15%) (Figura 5).

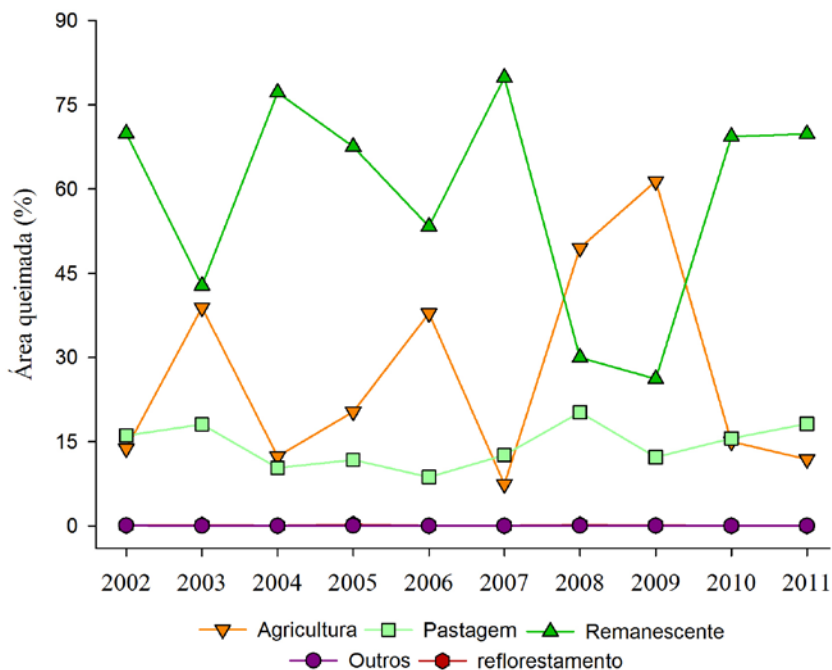


Figura 5 – Distribuição das áreas queimadas para o território goiano, conforme as classes de cobertura e uso da terra entre 2002 a 2011.

Estabelecendo a comparação entre a porcentagem de área remanescente e área queimada para os municípios goianos, nota-se que os maiores registros de áreas queimadas (extensão) concentram-se nas mesorregiões do estado que apresentam maior proporção de vegetação remanescente (Figura 6), ou seja, as regiões Norte (30%), Sul goiano (27%) e Leste (23%). Em particular, o município de Cavalcante, localizado na região norte, apresentou a maior proporção de área verde (96,3%) e a maior extensão da área queimada registrada (9.951 km²) entre 2002 a 2011.

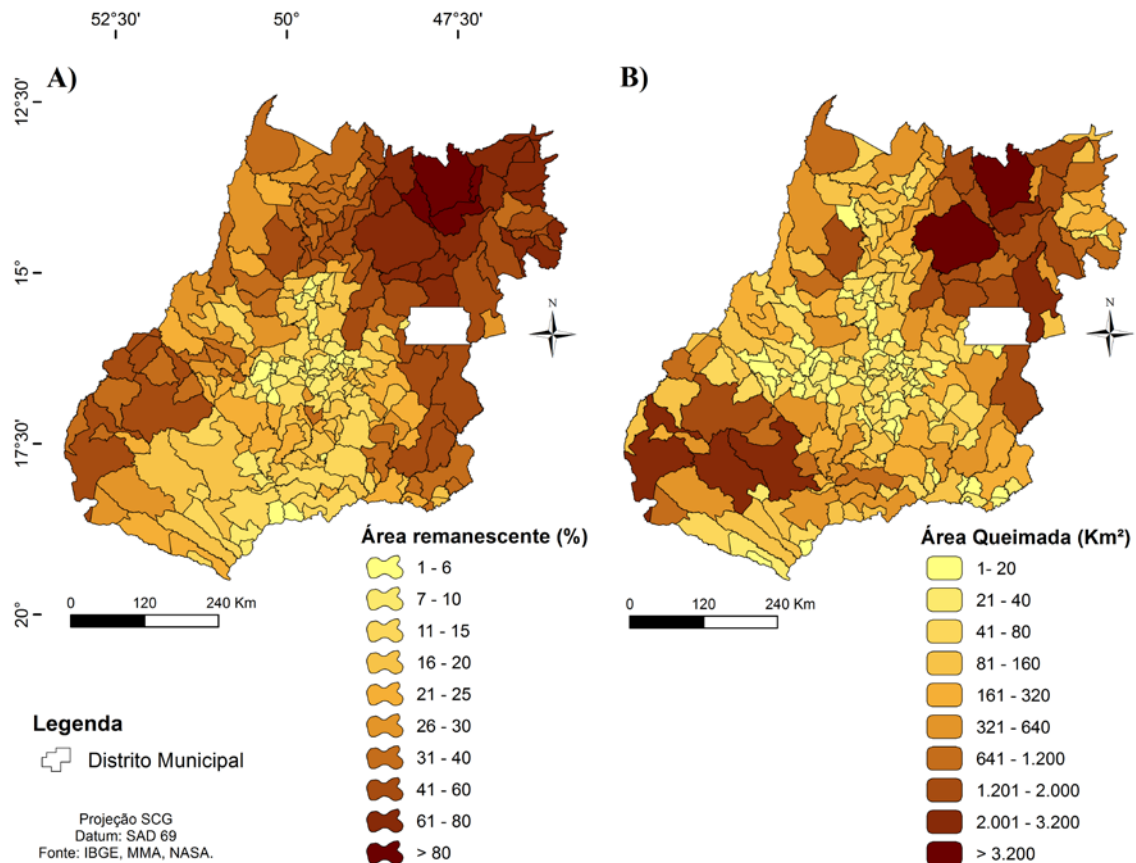


Figura 6 – Distribuição da área de cobertura remanescente (A) e da área queimada total para o período 2002-2011 (B) para o Estado de Goiás.

Entretanto, os municípios de Jataí e Rio Verde, no sudoeste goiano, estão entre os 10 municípios goianos que mais queimaram no período, contudo, apresentaram baixo índice de porcentagem de remanescente de Cerrado, sendo 19% e 18 %, respectivamente, enquanto, Mineiros que apresentou área queimada semelhante à de Rio Verde, 2.733 Km², possui 44% de sua área municipal remanescente preservada. Contudo, Mineiros possui a 2^o maior área de cultivo de cana-de-açúcar (434 km²) no estado de Goiás, atrás somente de Quirinópolis (589 km²), localizado no sul goiano (www.dsr.inpe.br/canasat) (Rudorff et al., 2010).

A mesorregião do noroeste goiano, em relação à utilização do fogo como prática de manejo do uso da terra se encontra estabilizada entre 2002 a 2011, com apenas 8% das áreas queimadas detectadas no período. Nesta região, a pastagem cultivada ocupa 80% da área antropizada, a qual suporta 21,2% da quantidade de efetivo bovino de Goiás, de acordo com o último censo agropecuário (IBGE, 2006).

A figura 7 nos mostra a participação das mesorregiões goianas na produção econômica do estado de Goiás em relação aos grandes setores de atividades econômicas, i.e. agropecuário,

industrial e serviços, os quais juntos, correspondem a 88% (R\$ 75.551.833 bilhões) da composição do PIB goiano para o ano de 2009 (R\$ 85.615.346 bilhões) (Marques et al., 2012).

Esses indicadores econômicos nos mostram que as mesorregiões centro goiano e sul goiano apresentam polarização da participação média por município nos valores da produção econômica do estado (84% ou R\$ 71.494.064 bilhões), sendo que, o sul goiano apresenta uma produção econômica industrial próxima a do centro goiano, mas se sobressai à essa quanto à produção agropecuária, já que é a região com a maior área agricultável de produção de grãos de Goiás (commodities) (Figura 7D), e responsável por 58% dessa produção na composição do PIB goiano (Figura 7A) (Marques et al., 2012).

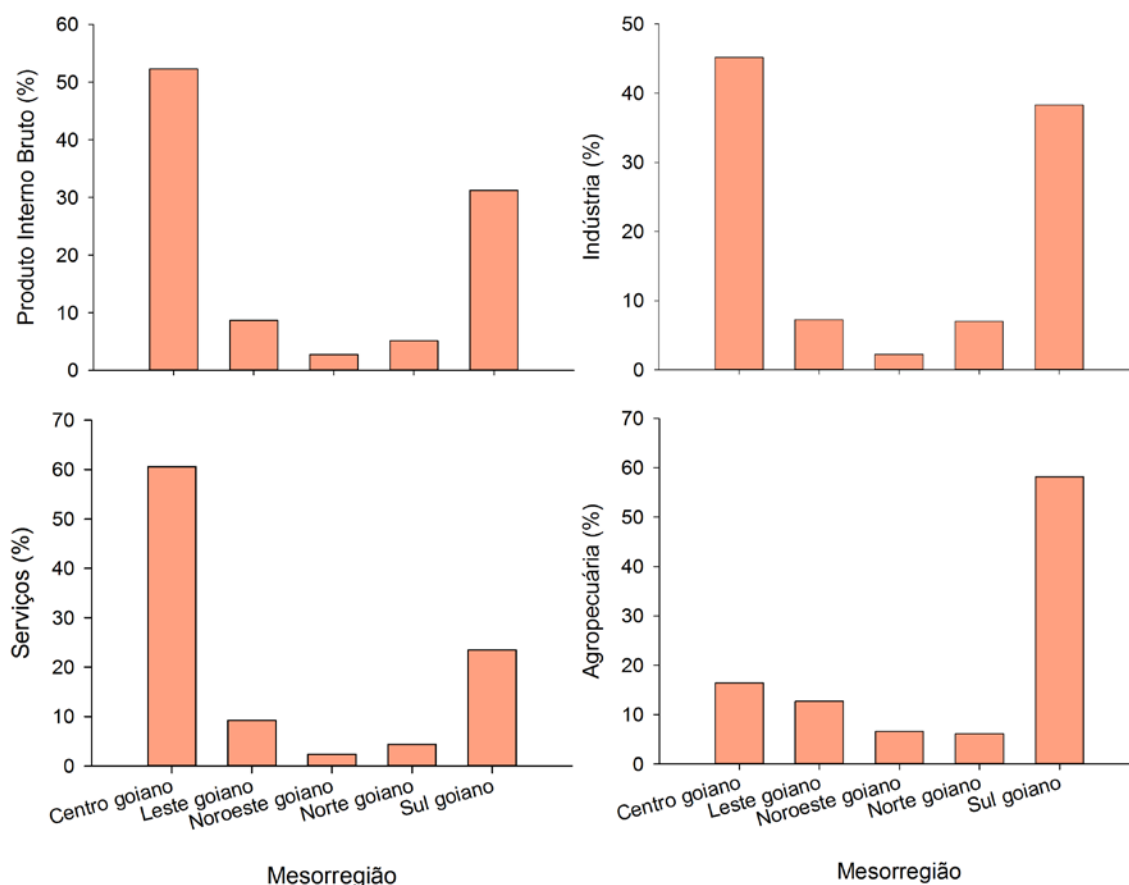


Figura 7 – Distribuição da porcentagem (%) de participação das mesorregiões goianas em relação ao PIB (A) e aos principais setores econômicos do estado de Goiás: Indústria (B), Serviços (C) e Agropecuária (D).

Entretanto, podemos caracterizar as regiões do leste goiano, norte goiano e noroeste goiano como um segundo grupo em participação da economia do estado de Goiás, haja vista que, juntas correspondem a 16% da produção econômica total de Goiás, sendo,

respectivamente, 9% (R\$ 7.421.906 bilhões), 5% (R\$ 4.370.380 bilhões) e 3% (R\$ 2.328.996 bilhões). Ressalta-se que 61% da riqueza gerada em Goiás é composta por 10 municípios, os quais, estão localizados nas mesorregiões do centro goiano (Goiânia, Anápolis, Aparecida de Goiânia, Senador Canedo), sul goiano (Rio Verde, Catalão, Itumbiara, Jataí, São Simão) e leste goiano (Luziânia).

Morbidades respiratórias – Internações

De acordo com o DATASUS, os dados de internações para tratamento das doenças do aparelho respiratório, bronquite e enfisema e asma para o ano de 2010 nos revelam padrões diferenciados durante os meses do ano, sobretudo quando comparados aos padrões de ocorrências das queimadas.

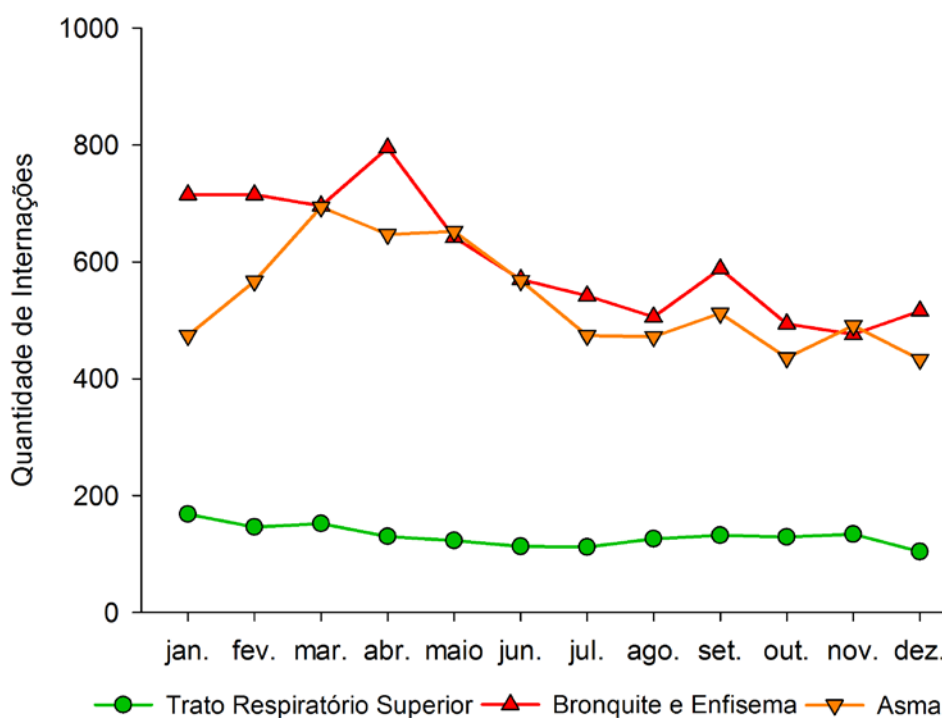


Figura 8 – Distribuição das internações mensais (2010) referentes às morbididades respiratórias (Estado de Goiás) neste estudo.

As internações do trato respiratório superior se mantiveram estabilizadas entre os meses de 2010. Contudo, os meses com maiores registros de entrada no SUS foram janeiro e março, com 168 e 152 internações, respectivamente (Figura 8). Estabelecendo comparação entre o período seco (quente e umidade baixa) e chuvoso (quente e umidade alta) de 2010,

característicos do domínio morfoclimático dos Cerrados (Ab'sáber, 2003), às internações devido aos problemas do trato respiratório superior apresentaram no período chuvoso média superior ao do período seco, sendo 163 e 154 internações, respectivamente (Figura 8).

Quanto a bronquite e enfisema, estas apresentam duas situações diferentes em relação às doenças do trato respiratório superior. Além de terem ocasionado, em média, 4 vezes mais pacientes internados, no período seco houveram mais internações do que no período chuvoso, com médias de 649 e 606, respectivamente (Figura 8). O período de maior agravamento ocorreu entre os meses de maio a junho (em média 668 internamentos mês), enquanto o menor registro entre os meses do período seco correspondem a agosto (597), justamente o período em que no Cerrado goiano são registrados baixos valores de umidade relativa do ar devido à escassez de chuvas, temperaturas altas e aumento nos registros de grandes extensões de áreas queimadas.

A asma, por sua vez, dentre as doenças do aparelho respiratório analisadas é a que apresentou maior variação de internações entre os meses de 2010 (Coeficiente de Variação, CV = 0,18), já que os meses com os menores e maiores registros de internações foram dezembro (446) e maio (768), respectivamente, enquanto que, para os períodos seco e chuvoso, as médias de internações foram semelhantes, 587 e 569, respectivamente.

Morbidades respiratórias - Custos do tratamento

O custo anual para o tratamento das doenças do aparelho respiratório ao SUS nos municípios goianos, para o ano de 2010 foi de R\$ 8.842.214,10 milhões de reais, sendo que, as morbidades respiratórias que mais demandaram recursos financeiros para tratamento de pacientes foram à bronquite e enfisema (55% ou R\$ 4.873.399 milhões), asma (41% ou R\$ 3.593.024 milhões) e o trato respiratório superior (4% ou R\$ 375.791 mil), respectivamente. Em média, os meses com os maiores custos registrados referentes ao tratamento das morbidades analisadas, em 2010, ocorreu em maio (9,3%), junho (9,2%) e março (8,4%) (Figura 9).

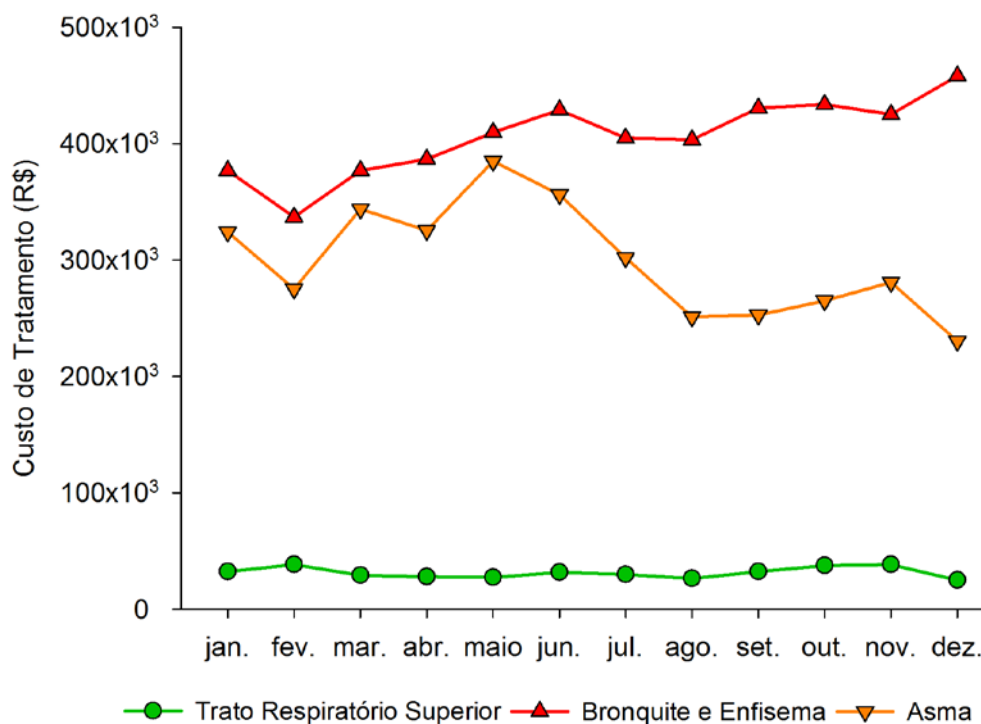


Figura 9 - Distribuição dos custos mensais (2010) para tratamento referente às morbidades respiratórias do trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma no estado de Goiás.

Estabelecendo uma análise individual dos custos das morbidades respiratórias levantadas, temos que o tratamento das morbidades respiratórias bronquite e enfisema pelo SUS aumentou com o decorrer do ano de 2010, já que em dezembro temos o maior custo registrado, R\$ 458.342 mil. Entretanto, para o período seco tem-se o destaque para os meses de setembro e outubro (Figura 9).

A morbidade asma também apresentou dois meses distintos em relação ao maior e menor custo para o tratamento em 2010, sendo, respectivamente, o mês de maio (R\$ 385.037 mil) e dezembro (R\$ 230.370 mil), apresentando uma variação de 40%. No entanto, analisando os custos médios do tratamento da morbidade asma para os períodos chuvoso e seco, os maiores custos médios foram registrados no período seco (R\$ 302.121 mil), com uma variação de 2% em relação ao período chuvoso (R\$ 296.716 mil).

Diferentemente dos dois grupos de morbidades respiratórias supracitados, a do trato respiratório superior apresentou os maiores custos para tratamento na estação chuvosa, com uma variação média positiva em relação ao período seco de 3% em 2010. Referente à análise mensal, o maior custo foi registrado em novembro (R\$ 38.383 mil), sendo que nos meses anteriores, setembro (R\$ 32.287 mil) e outubro (R\$ 37.527 mil), temos uma crescente nos custos de tratamento utilizados pelo SUS para essa morbidade.

Discussão

Da análise de efeito do período de incidência das queimadas (estação seca) sobre a quantidade de internações referentes às morbidades respiratórias do trato superior respiratório, bronquite e enfisema e asma para o ano de 2010, verifica-se que a correlação das ocorrências das queimadas no decorrer do ano com as morbidades respiratórias analisadas é pouco significativa.

Entre os três grupos de morbidades respiratórias analisadas, a asma é a que apresentou maior correlação com o registro de áreas queimadas ($R^2 = 0,23$), no entanto, observa-se queda na quantidade de internações mensalmente, sobretudo para os meses de agosto, setembro e outubro, meses nos quais são registradas as maiores ocorrências de queimadas durante o ano no território brasileiro e Cerrado (Araújo et al., 2012). Em contrapartida, os meses com os menores registros de áreas queimadas no período seco, maio e junho, início da estação das queimadas, apresentam os maiores registros de internações pelo SUS para 2010.

Estabelecendo a correlação do período de incidências de áreas queimadas (seco - maio a outubro) com as três morbidades respiratórias analisadas observa-se considerável aumento desta para as morbidades bronquite e enfisema ($R^2 = 0,46$) e asma ($R^2 = 0,59$), as quais nesse período apresentaram média de internações superior ao período chuvoso, com variações de internações a mais de 7% e 3%, respectivamente. Em relação à morbidade respiratória do trato respiratório superior, a análise de correlação se mostrou insignificante para o período seco de 2010.

A figura 10 nos mostra a distribuição das internações totais referentes as morbidades respiratórias analisadas, bem como, a área queimada total e dois gráficos de distribuição mensal média dos valores de precipitação (mm) e da temperatura de superfície ($^{\circ}\text{C}$) para 2010, segundo as mesorregiões goianas. Nota-se que, as mesorregiões com os maiores registros de áreas queimadas no período de análise (Figura 10D), norte e leste, não apresentaram as maiores médias de precipitação pluviométrica (130 e 119 mm, respectivamente) ou de temperatura (31,3 e 31 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente) em relação as demais mesorregiões, no entanto, para essas duas regiões supracitadas, os registros de internações relacionadas morbidades respiratórias pelo SUS se encontraram intermediários.

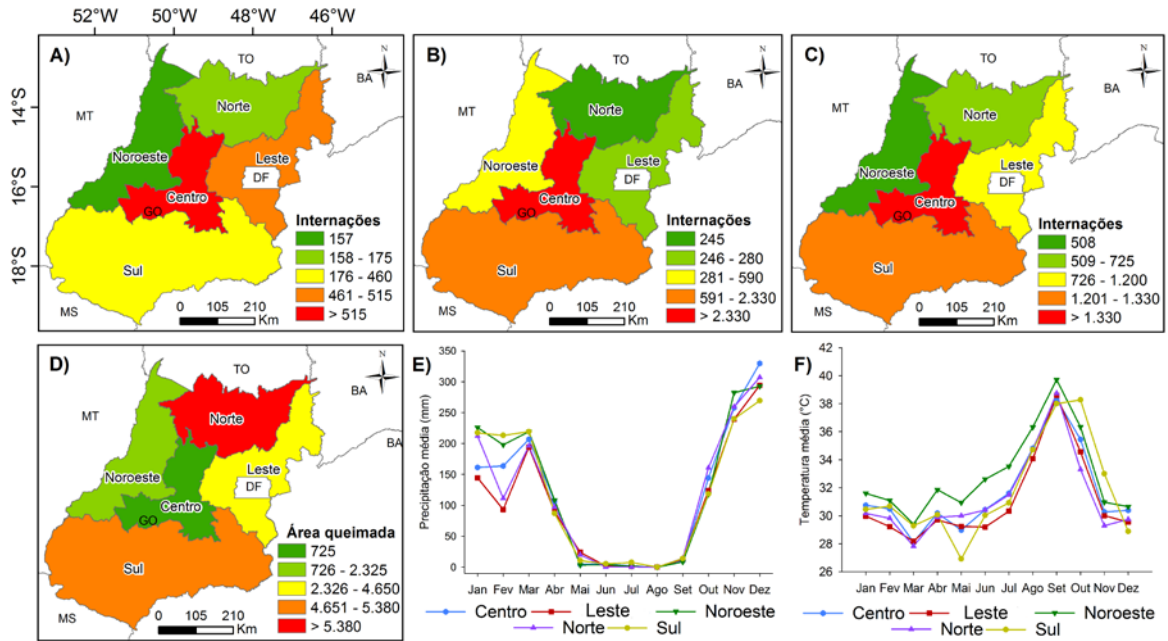


Figura 10 – Distribuição da quantidade de internações referente as morbidades respiratórias do trato respiratório superior (A), bronquite e enfisema (B), asma (C), área queimada (km²) (D), precipitação (mm) (E) e temperatura (°C) (F) para o estado de Goiás em 2010.

Podemos notar que a mesorregião centro goiano estabelece fronteira com as mesorregiões norte e sul, as quais apresentam os maiores registros de áreas queimadas no estado, sendo que, com a queima da biomassa nessas regiões há a liberação de várias toneladas de material particulado na atmosfera, os quais se deslocam para regiões vizinhas exercendo o deterioramento da qualidade do ar dos grandes centros urbanos e dos municípios adjacentes a estes (Longo et al., 2009) (Figura 10).

A mesorregião do Centro goiano, na qual registra-se a menor área queimada anual do estado (Figura 10D), apresentou os maiores registros de internações para as morbidades respiratórias do trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma, bem como, os maiores custos totais de tratamento por internação no período, sendo R\$ 223, R\$ 777 e R\$ 564, respectivamente. A mesorregião do sul goiano, por sua vez, apresenta-se como a segunda mesorregião em relação aos custos de tratamento por internação referente as morbidades respiratórias analisadas, contudo, a diferença de seu custo apresentado entre as mesorregiões leste, norte e noroeste goiano é pequena, na ordem 1,3%, 2,6% e 1%, sendo, respectivamente, trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma (Tabela 1).

Tabela 1 – Custo de tratamento em reais por internação segundo as morbidades respiratórias do trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma, de acordo com os períodos chuvoso e seco para 2010 – Estado de Goiás

| Mesorregião | Trato Respiratório Superior | | Bronquite e Enfisema | | Asma | |
|-----------------|-----------------------------|------------|----------------------|------------|---------------|------------|
| | Chuvoso (R\$) | Seco (R\$) | Chuvoso (R\$) | Seco (R\$) | Chuvoso (R\$) | Seco (R\$) |
| Centro Goiano | 216 | 235 | 771 | 792 | 568 | 567 |
| Leste Goiano | 185 | 183 | 484 | 482 | 479 | 467 |
| Noroeste Goiano | 187 | 185 | 482 | 482 | 481 | 483 |
| Norte Goiano | 185 | 187 | 483 | 493 | 482 | 482 |
| Sul Goiano | 189 | 185 | 501 | 492 | 483 | 484 |

A tabela 1 apresenta que a diferença entre o custo do tratamento médio por internação em relação as morbidades respiratórias do trato respiratório superior, bronquite e enfisema e asma entre as estações chuvosa e seca é baixa. Entretanto, as mesorregiões do centro goiano e norte goiano, menor e maior extensão de áreas queimadas, respectivamente, apresentaram custo de tratamento por internação em relação a morbidade asma praticamente o mesmo para os períodos chuvoso e seco, mas para as outras duas morbidades respiratórias, o custo do tratamento foi maior no período seco.

Considerações Finais

Estudos realizados no Brasil comprovam que há relação entre as ocorrências das queimadas e o agravamento das morbidades respiratórias. Contudo, esta relação, para o período de 2010, em Goiás, se mostrou baixa, uma vez que os maiores registros de doenças respiratórias se concentraram em regiões com os menores registros de queimadas e com adensamento populacional. No entanto, os centros urbanos apresentam grandes quantidades de veículos automotores movidos a álcool, diesel e gasolina, os quais produzem gases e materiais particulados para a atmosfera, que adicionados à registros de temperatura elevadas e baixos níveis de chuvas, deterioram a qualidade do ar que se respira e, conseqüentemente, ocorre o agravamento das morbidades respiratórias, com o aumento das internações e dos custos de tratamento.

Em relação ao mapeamento das áreas queimadas, este, por sua vez, deve ser melhorado, já que as morbidades respiratórias ocorrem a nível de escala local e os dados de queimadas

disponibilizados atualmente estão situados em uma escala regional, aumentando, dessa forma, o erro de omissão da análise.

Para complementação desse estudo, deve-se obter dados, além daqueles disponibilizados pelo SUS, bem como de hospitais particulares, os quais não integraram essa análise, permitindo analisar efetivamente o efeito da ocorrência das queimadas sobre as morbidades respiratórias. Por fim, necessita-se obter dados de internações e seus respectivos custos para todos os municípios goianos, já que, para considerável número destes não se tem dados informativos.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES), cuja bolsa concedida ao primeiro autor (doutorado) foi imprescindível à realização desta pesquisa.

Referências

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003, 159p.

ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution Patterns of Burned Area in the Brazilian Biomes: Na Analysis Based on Satellite Data for the 2002-2010 Period. **Remote Sensing**, vol. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A. A. **MODIS collection 5 burned area product MCD45**. User's Guide, v. 2. 2009. 30p. Disponível em: <http://modis-fire.umd.edu/Documents/MODIS_Burned_Area_User_Guide_2.0.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2013.

CANÇADO, J. E. D. A poluição atmosférica e a saúde humana na região canavieira de Piracicaba - SP. **Tese** (Doutorado em Patologia) – Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 201p.

COUTINHO, L. M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Goldammer, J.G. (Org.). **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, Cap. 6, 1990. p. 82-105.

EITEN, G. Vegetação do Cerrado. In: PINTO, M. N. (Org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília, DF: Editora da UnB, 1994. p. 17-73.

FRANÇA, H.; SETZER, A. AVHRR analysis of a savanna site through a fire season in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, n. 13, p. 2449-2461, 2001.

FERREIRA, L.G., FERREIRA, M.E., ROCHA, G.F., NEMAYER, M., AND FERREIRA, N.C. Dinâmica agrícola e desmatamentos em áreas de Cerrado: uma análise a partir de dados

censitários e imagens de resolução moderada. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 61, p.117-127, 2009.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Agropecuário 2006: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação**. Rio de Janeiro, 2006. 777p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Contas Regionais do Brasil 2010**. Contas Nacionais, N. 38, 2012. 55p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasregionais/2010/default.shtm>>. Acesso em: 23 set. 2012.

LONGO, K.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; Yokelson, R.; ARTAXO, P. Biomass Burning in Amazonia: Emissions, Long-Range Transport of Smoke and Its Regional and Remote Impacts. In: John Gash; Michael Keller; Mercedes Bustamante; Pedro Silva Dias. (Org.). **Amazonia and Global Change**. American Geophysical Union Press, 2009.

LONGO, K. M.; FREITAS, S. R.; ANDREAE, M. O.; SETZER, A.; PRINS, E.; ARTAXO, P. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 2: Model sensitivity to the biomass burning inventories. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, p. 5785–5795, 2010.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento da cobertura vegetal do bioma cerrado: relatório final**. Edital Probio 02/2004, Projeto Executivo B.02.02.109. Brasília, 2007. 93p.

MARQUES, D. M. F.; SILVA, L. F.; CASTRO, M. C. PIB dos Municípios Goianos em 2009. **Conjuntura Econômica Goiana**, n. 20, p. 72-83, 2012.

MENDONÇA, M. J. C.; DIAZ, M. C. V.; NEPSTAD, D.; MOTTA, R. S.; ALENCAR, A.; GOMES, J. C.; ORTIZ, R. A. The economic cost of the use of fire in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, v. 49, p. 89–105, 2004.

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; ANDRADE, S. M. A.; HARUDASAN, M.; MORAIS, H. C. Queimadas de Cerrado: caracterização e impactos. In: Aguiar, L. M. S.; Camargo, A. J. A (Org). **Cerrado: ecologia e caracterização**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 3, 2004. p. 69-123.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N.C. Expansão da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no Estado de Goiás: subsídios à política ambiental. In: Laerte Guimarães Ferreira Jr. (Org.). **A encruzilhada socioambiental - biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado**. Goiânia: Editora UFG, v. 1, 2008. p. 107-125.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **Monthly 0.25×0.25 TRMM and other sources rainfall**. NASA Distributed Active Archive Center, Goddard Space Flight Center Earth Science, Greenbelt, MD, 2009. Disponível em: <<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/>>. Acesso em: 17 ago. 2012.

NASA - National Aeronautics and Space Administration. **MODIS Active Fire & Burned Area Products**. Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC), University of Maryland, 2012. Disponível em: <<http://reverb.echo.nasa.gov>>. Acesso em: 15 jul. 2012.

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. **NOAA's El Niño Page**. Disponível em <<http://www.elnino.noaa.gov>>. Acesso em 03 fev. 2012.

RIVERA-LOMBARDI, R. J. Estudo da recorrência de queimadas e permanência de cicatrizes do fogo em áreas selecionadas do cerrado brasileiro, utilizando imagens TM/Landsat. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 2003. 172p.

ROSEIRO, M. N. V. Morbidade por problemas respiratórios em Ribeirão Preto-SP, de 1995 a 2001, segundo indicadores ambientais, sociais e econômicos. **Dissertação** (Mestrado em Enfermagem em Saúde Pública) - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, São Paulo, 2002. 150p.

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, 2008.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, vol. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA JR., L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 43, p. 153-156, 2008.

APÊNDICE B

Artigo elaborado no âmbito dos projetos *Radiografia das Pastagens do Brasil* (SAE – LAPIG) e *Caracterização das Pastagens do Cerrado-Pantanal* (WWF – LAPIG).

Distribuição e recorrência de queimadas nas áreas de pastagens cultivadas no Brasil

Fernando Moreira de Araújo
Universidade Federal de Goiás – UFG
fernandomsbl@gmail.com

Laerte Guimarães Ferreira Júnior
Universidade Federal de Goiás – UFG
laerte@ufg.br

Resumo

A pastagem cultivada é a principal classe de uso antrópico do Brasil, já que ocupa 17% do seu território. A utilização do fogo se faz presente para a renovação de pastos e limpeza das áreas agrícolas devido ao baixo custo econômico, apresentando picos de registros entre agosto e setembro, período de elevadas temperaturas e de baixa umidade relativa do ar. A alta densidade das pastagens, sobretudo as invasoras invasivas (*Brachiaria* sp., *melinis minutiflora* – capim gordura, etc), contribuem para o aumento da frequência das queimadas e de grandes incêndios. O objetivo desse trabalho é de analisar os padrões de ocorrência e densidade de focos de calor sobre as áreas de pastagens cultivadas (i.e. fragmentos ≥ 50 ha) no território brasileiro entre 2000 a 2013. Para a quantificação da densidade de focos de calor sobre as áreas de pastagem foi realizada a intersecção dos focos de calor, provenientes do banco de queimadas do INPE, com o mapeamento de pastagem cultivada do PROBIO (2002), dividindo a análise em regional (biomas) e local (municípios). Como resultado, a nível regional e local, a densidade de focos de calor registrada é baixa, 0,021 e 0,036, respectivamente. As áreas de pastagens com os maiores valores de densidade de focos de calor estão localizadas na zona de transição do Cerrado com os biomas Amazônico e da Caatinga. A nível local, a recorrência de focos de calor se apresentou alta para o período de análise, ou seja, 71% dos fragmentos de pastagens registraram focos entre dois ou mais anos.

Palavras-chave: Queimada, Pastagem, Manejo, Cerrado.

1. Introdução

As pastagens cultivadas ocupam aproximadamente 17% (i.e. 148,2 milhões de hectares) da área total do território brasileiro (MMA, 2014), sendo que as maiores proporções estão localizadas nos biomas Cerrado (37%) e Mata Atlântica (23%), localizados principalmente nas regiões geográficas do centro-oeste e do sudeste/litoral brasileiro. A prática de manejo sobre as áreas de pastagens é baixa ou inexistente para considerável proporção de sua extensão territorial, o que se reflete na baixa lotação bovina (i.e. aprox. 1 cabeça por hectare) (Ferreira et al., 2012) e na utilização do fogo para limpeza e renovação de pastos (Coutinho, 1990).

O fogo se constitui como um dos principais agentes modificadores (perturbação ambiental) dos diferentes ecossistemas naturais, por meio de severas queimadas (Miranda et

al., 2004), sobretudo nas regiões do Cerrado (savana brasileira) e da Amazônia (floresta tropical), para os quais são registrados as maiores ocorrências de queimadas anuais (aprox. 80%) (Araújo et al., 2012). Os danos provocados pelas queimadas não implicam somente na redução da cobertura vegetal lenhosa (Sato, 2003), mas na perda da biodiversidade, na sustentabilidade dos ecossistemas e na emissão de gases para a atmosfera, os quais trazem efeitos para a saúde da população e para as mudanças climáticas (Randerson et al., 2012; Dias e Miranda, 2010).

As queimadas se intensificam no final da estação seca (setembro) quando o estrato herbáceo-subarbusivo encontra-se bastante inflamável (Ramos-Neto e Pivello, 2000). Em fato, é este o regime de queima com maior impacto, pois nesse período temos o padrão fenológico da vegetação voltado para a renovação das copas e reprodução (Oliveira, 1998; Dias e Miranda, 2010). A alta densidade das pastagens, sobretudo as invasoras invasivas (*Brachiaria* sp., *melinis minutiflora* – capim gordura, etc), contribuem para o aumento da frequência das queimadas e de grandes incêndios (Miranda et al., 2002; Beckage et al., 2009), sendo que a vegetação do estrato herbáceo representa mais de 90% do combustível durante as queimadas (Miranda et al., 2004).

Especificamente, este trabalho tem o objetivo de analisar, com base em dados de anomalias termais provenientes de dados satelitários diários, os padrões de ocorrência e de densidade de focos de calor sobre as áreas de pastagens cultivadas (mapeamento base – PROBIO/MMA) entre 2000 a 2013, para todo o território brasileiro.

2. Materiais e Métodos

Para a análise dos padrões de distribuição dos focos de calor sobre as áreas de pastagens cultivadas para o território brasileiro, entre 2000 a 2013, utilizou-se os dados de anomalias termais provenientes de 28 produtos satelitários disponibilizados através do Banco de Queimadas (BDqueimadas) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), os quais incluem dados dos satélites NOAA (12, 15 a 19 – manhã e tarde; 14 - noite), GOES (8 – noite; 10 a 13 – todos), AQUA e AQUA UMD (manhã e tarde), TERRA e TERRA UMD (manhã e tarde), METEOSAT 02 (todos), NPP NASA, ASTER ESA e TRMM NASA (INPE, 2014).

Quanto à distribuição das áreas de pastagem cultivada, esta teve por referência o mapa gerado no âmbito do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO) do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2014). Do mosaico de

pastagens, foram selecionados apenas os polígonos de pastagem maiores ou iguais a 50 hectares. Para estes polígonos (i.e. fragmentos de pastagens), procedeu-se à intersecção dos focos de calor, conforme a equação 1:

$$\text{Densidade de Focos de calor} = \frac{\text{Qtde. Focos de calor}}{\text{área do fragmento de pastagem (ha)}} \quad (1)$$

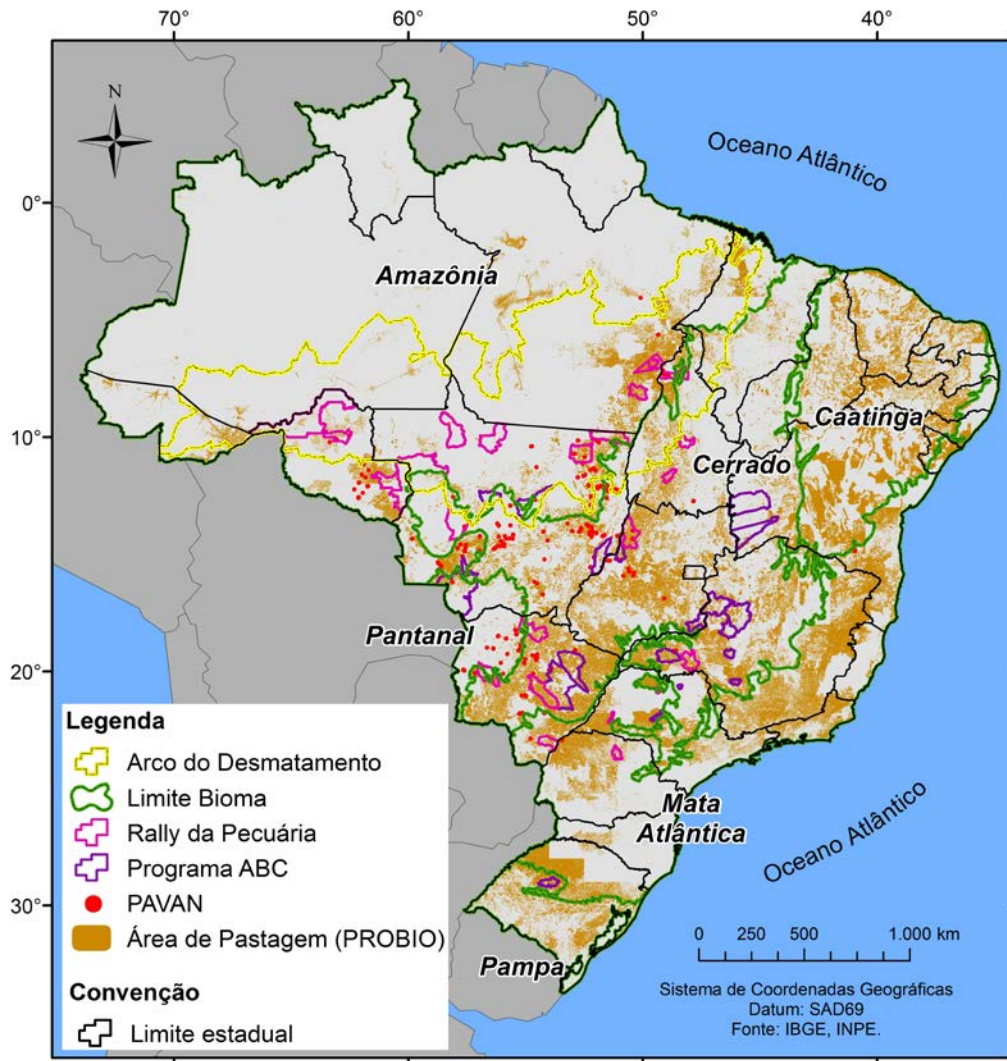


Figura 1 – Localização das regiões geográficas utilizadas para a análise da densidade de focos de calor sobre as áreas de pastagens cultivadas no Brasil.

Em particular, as análises de densidade de focos de calor concentraram-se nos polígonos do PAVAN (*Pasture Validation Network*), uma iniciativa do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (UFG / LAPIG) que busca organizar uma base de referência de pastagens (principalmente localizadas no chamado Arco

do Desmatamento e bioma Cerrado e, em sua grande parte, certificadas ou em processo de certificação), as áreas de pastagens encontradas nos 24 municípios do Rally da Pecuária (i.e. expedição técnico privada com foco na avaliação das condições da bovinocultura nas principais regiões produtoras), as pastagens dos 20 municípios com os maiores investimentos do Programa ABC (Agricultura de Baixo Carbono / recuperação de pastagens degradadas – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/MAPA) e as áreas de pastagens distribuídas na totalidade do Arco do Desmatamento da Amazônia (Figura 1).

3. Resultados e Discussões

Entre 2000 e 2013, foram contabilizados 1.945.171 de focos de calor sobre a totalidade das pastagens brasileiras, correspondendo a 18% do total de focos registrados no território brasileiro para o mesmo período (i.e. 10.681.732 focos). Ao analisarmos anualmente a proporção de focos de calor em áreas de pastagens, temos, em média, para o intervalo entre 2000 e 2003, aproximadamente 25% do total de focos. Entre 2004 e 2013, esta proporção decresce, em média, para 17% (Figura 2). Cabe salientar que para o ano 2000 encontra-se disponibilizado dados de anomalias termais somente para os meses de novembro e dezembro.

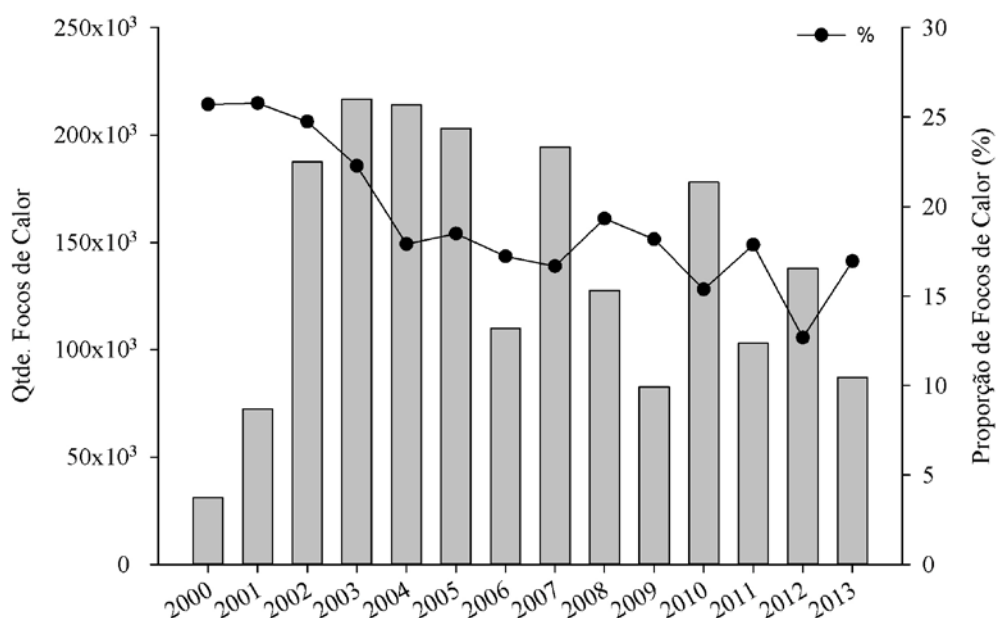


Figura 2 – Distribuição da quantidade de focos de calor anual sobre as áreas de pastagens e a sua proporção (%) em relação ao total detectado no Brasil entre 2000 a 2013.

A figura 2 mostra uma queda na quantidade de focos de calor sobre as áreas de pastagens quando comparado ao total registrado no território brasileiro, principalmente para os anos de

2007, 2010 e 2012, ainda que estes tenham sido os períodos com as maiores extensões de cicatrizes de queimadas no território brasileiro. Em média, foram registrados anualmente 138.941 mil focos sobre as pastagens, correspondendo a cerca de 19% dos focos de calor anuais registrados.

Em relação aos focos de calor totais, destacam-se os anos de 2003 e 2004 com os maiores registros, ambos correspondendo a 11,1% e 11% do total, de focos detectados nas áreas de pastagens, respectivamente. Os anos de 2002, 2005 e 2007 também apresentam contribuições significativas, com aproximadamente 9,6%, 10,4% e 10%, dos focos registrados, respectivamente. Posteriormente a 2007, há uma tendência de queda tanto no total de focos detectados, quanto na proporção destes em relação à totalidade do território brasileiro.

A densidade de focos de calor sobre as pastagens brasileiras se apresentou baixa, em média 0,021 focos por hectare. Do total de 57.422 fragmentos de pastagem cultivada (≥ 50 ha), em apenas 37.905 (66% do total, com área média de 3.802 ha) foi identificado ao menos um foco de calor. Por sua vez, somente 2.473 fragmentos (com área média de 436 ha) foi observada uma densidade de focos por hectare $\geq 0,1$. A figura 3 mostra a espacialização da densidade de focos de calor por fragmentos de pastagem (Figura 3A) e por municípios (Figura 3B).

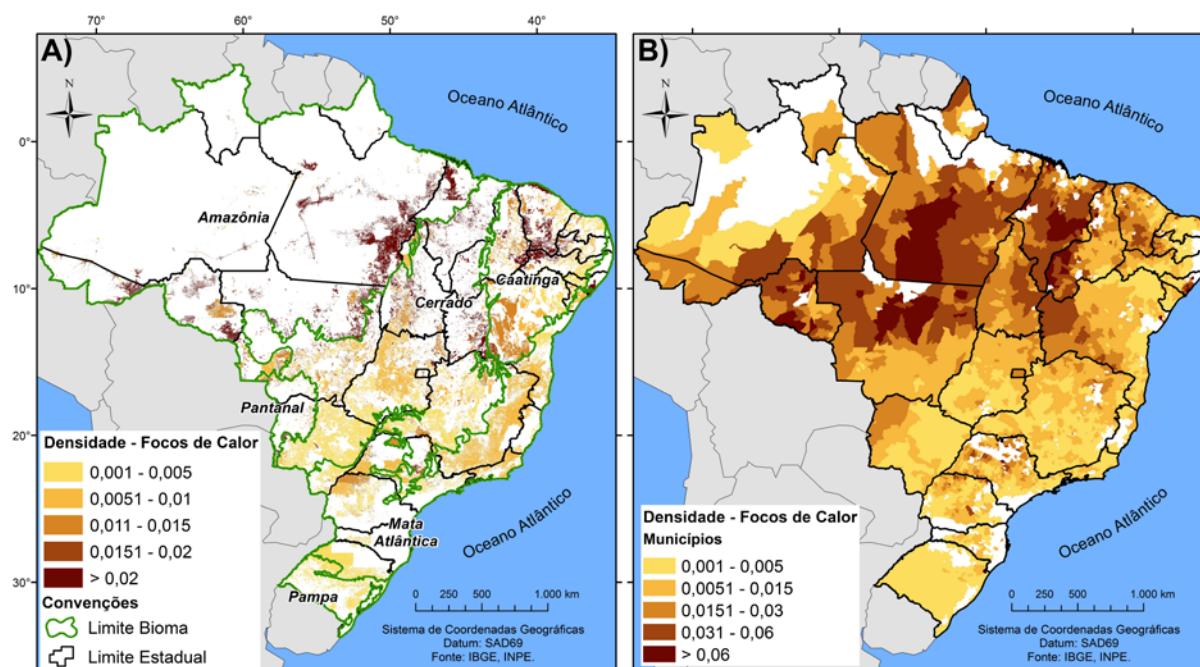


Figura 3 – Densidade de focos de calor total (2000 a 2013) sobre as áreas de pastagens no Brasil (fragmentos) (A) e por municípios (B).

Os maiores valores de densidade de focos de calor estão localizados nas regiões norte e nordeste do território brasileiro. Nessas regiões ocorre um processo de intensificação das práticas agrícolas e do pastoreio e uma estrutura da paisagem com menor grau de fragmentação, ao contrário da região Centro-sul do país, que configura um cenário de grandes fragmentos de pastagem cultivada e o setor agropecuário consolidado (Figura 3A). Considerando a distribuição das pastagens em nível municipal, a densidade média foi de 0,01 focos por hectare (Figura 3B). Os Estados que apresentaram as maiores médias de densidade de focos de calor entre os seus municípios foram Maranhão (0,038), Rondônia (0,035), Mato Grosso (0,031), Pará (0,03), Acre (0,022), Piauí (0,021) e Tocantins (0,02), respectivamente (Figura 3B).

Em uma análise comparativa entre os limites dos biomas brasileiros (IBGE, 2004), 99% do total de focos de calor sobre as pastagens estão localizados nos biomas Amazônico, Cerrado, caatinga e Mata Atlântica, sendo 43%, 29%, 16% e 10%, respectivamente. 1% dos focos estão localizados sobre os biomas Pampa e Pantanal. Por outro lado, a quantidade de fragmentos de pastagens aparece invertida, i.e. Cerrado com 40%, Mata Atlântica com 26% e Amazônia com 22%.

A densidade de focos de calor sobre as áreas de pastagem nos biomas brasileiros também se mostrou baixa, sendo o maior valor de densidade média de focos por fragmento (0,054 por hectare) encontrado no bioma Amazônico. Entre os demais biomas, a densidade registrada foi de 0,019, 0,014, 0,012, 0,006 e 0,001, correspondendo, respectivamente, ao Cerrado, Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica e Pampa (Figura 3A). As maiores densidades de focos de calor estão localizadas nas zonas de transição entre os biomas Cerrado-Amazônia e Cerrado-Caatinga, as quais apresentam atualmente uma intensificação das práticas antrópicas, tais como agricultura e o pastoreio extensivo sobre grandes áreas. Para essas regiões, ainda em processo de consolidação, o fogo é utilizado como método de manejo para a limpeza dos restos vegetais sobre o solo e renovação do pasto, já que se constitui uma prática de baixo custo econômico para o proprietário da terra (Coutinho, 1990; Jepson, 2005). Contudo, nestas regiões, por não apresentarem planos de manejo adequados, o fogo se propaga sobre grandes áreas remanescentes, para as quais se registram as maiores proporções de queimadas no território brasileiro, sobretudo no bioma Cerrado (Araújo et al., 2012).

Uma baixa densidade de focos de calor também é observada ao nível local, i.e. nas áreas de pastagens dos municípios do Arco do Desmatamento, do Rally da Pecuária, do Programa ABC e polígonos PAVAN (Figura 4). É interessante observar que a variação média de focos

por fragmento de pastagem mostra um padrão de distribuição anual (2000 a 2013) semelhante à variação na densidade de focos.

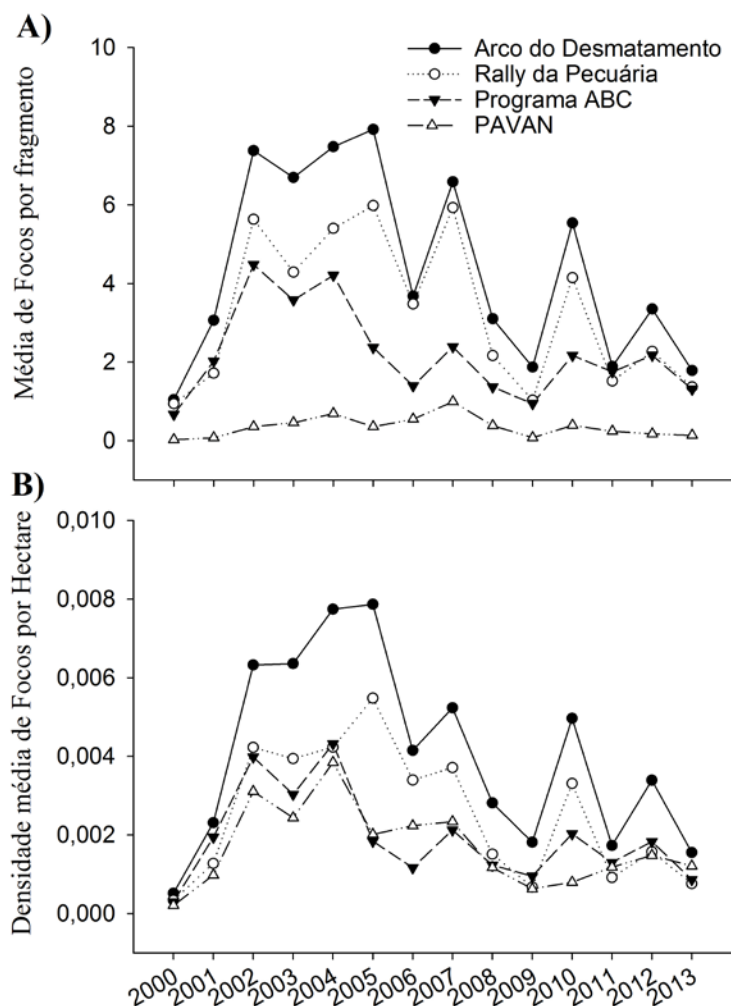


Figura 4 – Distribuição da quantidade média de focos de calor por fragmento de pastagem (A) e densidade de focos por hectare (B) (entre 2000 e 2013).

Na figura 4A destaca-se a semelhança na oscilação anual da quantidade de focos de calor registrados sobre fragmentos de pastagem para as regiões do Arco do Desmatamento, Rally da Pecuária e Programa ABC, sendo a média de focos para o período analisado (i.e. 2000 a 2013) de 4,4, 3,3 e 2,2 por fragmento de pastagem, respectivamente. Os polígonos do PAVAN, por sua vez, apresentaram valor médio anual de focos sobre pastagens muito menor, (0,4 focos), bem como um padrão de oscilação anual menos pronunciado.

Considerando a quantidade total de focos de calor, entre 2000 e 2013, sobre os fragmentos de pastagem para as quatro regiões geográficas analisadas, temos, em média, 61, 46, 31 e 5 focos de calor para as regiões do Arco do Desmatamento, Rally da Pecuária, Programa ABC e

PAVAN, respectivamente. Quanto a recorrência anual dos focos de calor (i.e. fragmentos que voltaram a registrar focos de calor em ao menos dois anos na série temporal analisada) esta se mostrou particularmente elevada para a região do Arco do Desmatamento, afetando aproximadamente 91% das suas manchas de pastagens (i.e. 10.098 fragmentos), assim como para as regiões do Rally da Pecuária (80% ou 1.128 fragmentos) e do Programa ABC (72% ou 1.025 fragmentos). Ao contrário, para os fragmentos do PAVAN, a recorrência se mostrou significativamente mais baixa, afetando 42% do total de fragmentos analisados (i.e. 89).

Para estas regiões de interesse, ainda que com altos valores de recorrência, observa-se uma baixa densidade de focos de calor, principalmente em comparação com a análise regional, sendo a densidade média anual no período inferior a 0,01 focos de calor (Figura 4B). É interessante também observar que a densidade de focos sobre os polígonos do PAVAN foi próxima àquela registrada para as pastagens do Programa ABC e Rally da Pecuária ao longo de oito anos do período em análise (i.e. 2000, 2001, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009 e 2011). Em 2013, esta densidade também se aproxima àquela do Arco do desmatamento, região atualmente no território brasileiro com os maiores registros de focos de calor no ano.

4. Considerações finais

A quantidade de focos de calor sobre as áreas de pastagem, entre 2000 a 2013, se apresentou alta. Em média, 19% dos registros anuais de incêndios no território brasileiro foram encontrados sobre essa extensiva prática antrópica. Os maiores registros estão localizados sobre as pastagens cultivadas localizadas nas zonas de transição do Cerrado com a Amazônia (Arco do Desmatamento), e entre Cerrado e Caatinga, que atualmente passa pelo processo de expansão agrícola, sobretudo para as regiões do Maranhão, sul do Piauí e oeste da Bahia.

A densidade de focos de calor, por sua vez, se mostrou baixa para a grande maioria dos fragmentos de pastagem, ou seja, menos de 1 foco de calor por polígono identificado como pastagem no mapeamento realizado pelo PROBIO. Em fato, a área média dos fragmentos de pastagens com ao menos 1 registro de foco por hectare foi de 3.801 hectares. Por outro lado, a frequência da recorrência de focos de calor para o período analisado se mostrou alta, mesmo com a tendência de queda no registro de focos entre 2000 a 2013. É interessante observar que as pastagens nos municípios mais beneficiados com recursos do Programa ABC para recuperação de áreas degradadas ou naqueles municípios associados à pecuária de alta produtividade (i.e. Rally da Pecuária) apresentaram densidades e recorrência de focos de calor

comparáveis às outras localidades, o que sugere, em parte, ainda um distanciamento entre as práticas de manejo, interesses econômicos e uma pecuária efetivamente sustentável do ponto de vista ambiental.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE – PR), através do projeto Radiografia das Pastagens do Brasil, e da FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás / PRONEX, processo 201200766130154, chamada pública no 007/2012). Também reconhecemos o apoio da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsas de doutorado e produtividade em pesquisa para o primeiro e segundo autores, respectivamente.

Referências Bibliográficas

Araújo, F.M.; Ferreira, L.G.; Arantes, A.E. Distribution Patterns of Burned Area in the Brazilian Biomes: A Analysis Based on Satellite Data for the 2002-2010 Period. **Remote Sensing**, vol. 4, n. 7, p. 1929-1946, 2012.

Beckage, B.; Platt, W. J.; Gross, L. T. Vegetation, fire, and feedbacks: a disturbance-mediated model of savannas. **American Naturalist**, Vol. 174, p. 805–818, 2009.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS, 2012. 173 p.

Castro, E.A.; Kauffman, J.B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: A vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **Journal Tropical Ecology**, vol. 14, p. 263–283, 1998.

Coutinho, L.M. Fire in the ecology of the Brazilian cerrado. In: Goldammer, J.G. (ed.). **Fire in the tropical biota**. New York: Springer-Verlag, 1990. Cap. 6, p. 82-105.

Dias, B.F.S.; Miranda, H.S. O Projeto Fogo. In Miranda, H. S. (Org). **Efeitos do regime de fogo sobre a estrutura de comunidades de Cerrado: projeto fogo**. Brasília: IBAMA, 2010. p. 15-22.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Mapa de Biomas do Brasil**: Primeira aproximação. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <www.ibge.gov.br>.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios**. Disponível em: <<http://queimadas.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 20.jun.2014.

Jepson, W. A disappearing biome? Reconsidering land cover change in the Brazilian savanna. **Geographical Journal**, vol. 17, p. 99–111, 2005.

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: 17.jan.2012.

Miranda, H.S.; Bustamante, M.M.C.; Miranda, A.C. The Fire Factor. In Oliveira, P. S.; Marquis, R. J. (Org.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. Columbia University Press: New York, USA, 2002. p. 51-68.

Miranda, H.S.; Sato, M.N.; Andrade, S.M.A.; Harudasan, M.; Morais, H.C. Queimadas de Cerrado: Caracterização e Impactos. In **Cerrado: Ecologia e Caracterização**; Aguiar, L.M.S., Camargo, A. J. A. (Eds.); Embrapa Cerrados: Planaltina, Brazil, 2004. p. 69–123.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Mapeamento de Cobertura Vegetal dos Biomas Brasileiros**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>>. Acesso em: 08.fev.2014.

Oliveira, P.E. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de Cerrado. In Sano, S. M.; Almeida, S. P. (Org.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa, 1998. p. 193-230.

Pivello, V.R.; Coutinho, L.M. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in a open cerrado (Brazilian savanna). **Journal Tropical Ecology**, vol. 8, p. 457–497, 1992.

Pivello, V.R.; Coutinho, L.M. A qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. **Forest Ecology and Management**, vol. 87, p. 127–138, 1996.

Randerson, J.T.; Chen, Y.; Van Der Werf, G.R.; Rogers, B.M.; Morton, D.C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. **Journal of Geophysical Research**, vol. 117, G04012, p. 1-23, 2012.

Rivera-Lombardi, R.J. Estimativa de Áreas Queimadas com Produtos MODIS como Subsídio à Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa pela Queima de Biomassa na Amazônia e Cerrado Brasileiros. **Dissertação** (mestrado em sensoriamento remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, Brazil, 2009.