



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FERNANDA CRISTINA RESENDE

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS
QUEIMADAS NA PORÇÃO NORDESTE DO BIOMA
CERRADO

SÃO JOÃO DEL-REI

2017

FERNANDA CRISTINA RESENDE

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS
QUEIMADAS NA PORÇÃO NORDESTE DO BIOMA
CERRADO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de São João del-Rei, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de “Magister Scientiae” (MS).

SÃO JOÃO DEL-REI

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R433a Resende, Fernanda Cristina.
Análise da distribuição espacial das áreas
queimadas na porção nordeste do bioma Cerrado /
Fernanda Cristina Resende ; orientador Gabriel
Pereira; coorientadora Francielle da Silva Cardozo.
- São João del-Rei, 2017.
110 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Geografia) -- Universidade Federal de São João del
Rei, 2017.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Queimada. 3. Cerrado.
4. Uso e Ocupação da Terra. I. Pereira, Gabriel,
orient. II. Cardozo, Francielle da Silva, co-orient.
III. Título.



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS QUEIMADAS NA
PORÇÃO NORDESTE DO BIOMA CERRADO**

Autor: Fernanda Cristina Resende

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Pereira

Coorientadora: Dra. Francielle da Silva Cardozo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:

Prof. Dr. Gabriel Pereira – Orientador
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Dra. Francielle da Silva Cardozo - Coorientadora
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Dr. André Lima
University of Maryland - UMD

Prof.ª Dra. Silvia Elena Ventorini
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

SÃO JOÃO DEL-REI
Maio de 2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lúcia e Edivaldo, pelo carinho, pelas orações e por tudo que me ensinaram. As minhas irmãs, Patrícia, Ângela Márcia, Vanuza e Luciana, aos meus cunhados e aos meus sobrinhos, Caio, Cecília e Luiza, por me proporcionarem os vários momentos de alegria ao lado de vocês e por constituírem uma família linda.

Ao meu orientador Gabriel Pereira, por ter acreditado no meu trabalho, por ter me recebido com tanto carinho e, principalmente pelos preciosos ensinamentos ao longo destes anos.

À minha coorientadora Francielle Cardozo, sempre muito gentil e carinhosa, agradeço pela dedicação, competência, paciência e incentivo durante todas as etapas da minha pesquisa.

Aos membros da banca, Silvia Ventorini e André Lima, pelas reflexões e sugestões.

Ao Prof. Marcio Toledo, por ter me auxiliado durante todo o processo de pesquisa, principalmente nas burocracias acadêmicas.

Ao meu grande amigo André Ribeiro, por ter escutado minhas angústias, por cada palavra amiga e por estar sempre ao meu lado.

Às minhas amigas Élem Martins (Dilu), Viviane Valéria, Tereza Beatriz e Raquel Ramos, pela amizade, convivência e pelas opiniões sempre oportunas.

À Paula Resende e ao Bruno Oliveira, pela ajuda no trabalho de campo e pelos dias memoráveis.

Aos amigos Jacus, em especial ao Júlio Costa por auxiliar nos dados do TRMM e ao Guilherme Matavelli pelo auxílio nos dados do MODIS. Aos amigos da graduação e da pós-graduação, dentre outros, pela oportunidade de convivência e pelos agradáveis momentos de descontração.

Ao Bruno Valente agradeço o amor, a paciência e o companheirismo.

À Fapemig pela concessão da bolsa de estudos e ao CNPQ pelo recurso liberado para a realização do trabalho de campo.

À toda equipe do Nead-UFSJ, por ceder o espaço e equipamentos para a defesa, em especial ao Giovanni por toda atenção e eficiência. À todos os funcionários da UFSJ que sempre estão dispostos a ajudar, em especial a Monica do PPGeog e Wania do DEGEO.

Enfim, agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Com a crescente demanda nos últimos anos por áreas agricultáveis ainda não exploradas, o bioma Cerrado se tornou um dos ambientes mais favoráveis para a expansão da fronteira agrícola. Uma das consequências da utilização das áreas de Cerrado para a agricultura consiste no desmatamento e no aumento do número de queimadas, ocasionando a degradação e supressão de extensas áreas de ecossistemas naturais do bioma. Com a utilização de métodos de sensoriamento remoto é possível avaliar modificações no uso e ocupação da terra e alterações fenológicas da vegetação. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo principal analisar a distribuição espacial das áreas queimadas nas áreas de domínio do Cerrado inseridos no extremo Oeste Baiano, Sudoeste Piauiense, Sul Maranhense e no Tocantins. Desta forma, foi realizado o mapeamento das áreas queimadas em imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), plataforma Terra, nos anos de 2012 a 2015, a partir do uso do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Ainda, com o intuito de confiabilizar o mapeamento das imagens do sensor MODIS foi realizada a validação das áreas queimadas a partir de dados do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8 e do sensor *Linear Imaging Self Scanner* (LISS-III) do satélite Resourcesat-1. A partir do mapeamento realizado nas imagens do sensor MODIS gerou-se o mapa de frequência das áreas queimadas para o período analisado. Os dados de precipitação do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) do produto 3B43 foram utilizados para verificação da influência das chuvas na ocorrência queimadas. Além disso, analisou-se a ocorrência e frequência das queimadas nas Unidades de Conservação (UC) e nos municípios localizados na área de estudo e a relação entre os focos de calor e as áreas queimadas. Os resultados da validação dos mapeamentos apresentaram coeficientes de correlação entre 0,68 e 0,93, com valores médios de aproximadamente 0,82 ($p < 0,05$, teste T-Student). O sensor MODIS superestimou em média 18% das áreas queimadas em relação aos outros sensores, devido principalmente à sua resolução espacial e a ocorrência de solos escuros e de áreas alagadas que podem ser confundidos com cicatrizes de queimadas. A partir do mapeamento das áreas queimadas em imagens do sensor MODIS, verificou-se que as áreas mais atingidas por queimadas são de Savana, Savana Lenhosa e Gramíneas, sendo que 39% das queimadas ocorreram mais de uma vez a mesma área entre os anos de 2012 a 2015. Os dados de precipitação demonstraram que os anos que apresentaram menores índices de precipitações também foram os anos que ocorreram maior incidência de queimadas. Assim, verificou-se que em períodos mais secos, com menores índices de precipitações, as ocorrências de queimadas tornam-se mais frequentes. Além disso, verificou-se que as queimadas estão ligadas à expansão da fronteira agrícola na região, já que estas regiões são muito utilizadas na renovação de pastagens e para abertura de áreas ainda não convertidas.

ABSTRACT

Through the increase of the demand of agricultural areas, the Cerrado biome has become one of the most favorable environments for the expansion of the Brazilian's agricultural frontier. One of the consequences of the agriculture expansion in Cerrado is the deforestation and the increase of the number of fires, leading to the degradation and suppression of large areas of natural ecosystems in this biome. In this context, the use of remote sensing methods allows to evaluate land use and land cover changes and phenological modifications in vegetation. Consequently, the objective of this study was to analyze the spatial distribution of the burned areas in the Cerrado domain located in the northwest region of Bahia, Southwest region of Piauí, South region of Maranhão and Eastern region of Tocantins. For this purpose, the mapping of the burned areas in MODIS sensor images was performed for the 2012 to 2015 years, using the Linear Spectral Mixture Model (LSMM). To validate the burned areas estimated by MODIS images, the OLI sensor data of Landsat 8 satellite and LISS-III sensor of ResourceSat -1 satellite were used. From the burned areas derived of MODIS images, the frequency map was generated for the analyzed period. The rainfall data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) were used to verify the influence of rainfall on burning occurrence. In addition, the occurrence and frequency of burnings were analyzed in the conservation units and in the counties located in the study area. The validation of the estimated burned area presented correlation coefficients ranging from 0.68 to 0.93, representing an average of approximately 0.82 (significant at $p < 0,05$, Student T test). The MODIS sensor overestimated the burned areas in approximately 18%, when compared with the other sensors, mainly due to their spatial resolution and the occurrence of dark soils and flooded areas that can be confused with burn scars. From the mapping of the burned areas in MODIS sensor images, it was verified that the areas most affected by fires are Savannas, Grasslands and Woody Savannas, where 39% of the burnings occurred in the same area more than once between the years of 2012 to 2015. The precipitation data showed that the years with the lowest precipitation rates were also the years with the highest incidence of burned areas. Thus, it was verified that in drier period, the occurrence of fires become more frequent. In addition, it was verified that the fires are linked to the agricultural expansion frontier in the region, since these regions are used in the renovation of pastures and to open areas not yet converted.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Localização da área de estudo. 33
- Figura 2:** Exemplo do Modelo Linear de Mistura Espectral na fração sombra, aplicado a uma imagem MODIS. Destaca-se as áreas em tons mais claros, referentes à corpos hídricos, sombras e queimadas. 48
- Figura 3:** Exemplo em uma imagem MODIS após o processo de segmentação. Em linhas vermelhas os polígonos originados no processo. 49
- Figura 4:** Exemplo de mapeamento de áreas queimadas (em amarelo) após processo de segmentação em uma imagem MODIS. 50
- Figura 5:** Pontos de correlação (em preto) gerados a partir de uma grade com células de 5 km x 5 km utilizada para estimar a correlação entre os produtos. Em vermelho os mapeamentos das áreas queimadas em imagens MODIS e em amarelo os mapeamentos das áreas queimadas nas imagens dos sensores LISS-III e OLI. Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R. À esquerda está representado todos os mapeamentos realizados nas imagens MODIS, OLI e LISS-III, à direita refere-se ao resultado realizado na órbita/ponto 221/67 do sensor OLI e do sensor MODIS para o ano de 2015. 53
- Figura 6:** Trajeto realizado durante o trabalho de campo (em preto) e pontos coletados com o GPS onde possuíam cicatrizes de queimadas ou focos ativos (em amarelo). Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R. 56
- Figura 7:** Focos de queimadas observados durante o trabalho de campo. Foco de queimada em vegetação de Campo Sujo, próxima à uma área de Cerrado e de Cerradão (a), focos ativos em áreas de formação florestal densa (b, c) e foco ativo de queimadas em área de Campo Sujo (d). 58
- Figura 8:** Áreas visitadas durante os dias de campo. Área com solo exposto e de troncos secos (a), área de pastagem abandonada (b) e áreas de cerradão e cerrado denso recentemente queimadas (c, d). 59
- Figura 9:** Cicatrizes de queimadas próximas a área agrícola visualizadas durante o trabalho de campo. Vegetação totalmente queimada à direita e área agrícola à esquerda (a), área queimada ao lado de uma área de pastagem (b), vegetação completamente queimada à esquerda e área agrícola à direita (c) e área de Cerrado stricto sensu parcialmente queimada (d). 60
- Figura 10:** Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas na área de estudo para as cenas 330/85 (2012), 325/84 (2012), 221/65 (2013), 219/66 (2013), 221/69 (2014) 222/67 (2014), 220/66 (2015) e 221/67 (2015). 62

Figura 11: Gráfico da validação total dos mapeamentos das áreas queimadas na área de estudo.....	63
Figura 12: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com menor coeficiente de correlação, cena 222/67(2014).	65
Figura 13: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficientes de correlação entre 0,7 e 0,8, cenas 219/66 (2013) e 325/84 (2012).....	66
Figura 14: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficiente de correlação 0,89, cena 221/65 (2013).	68
Figura 15: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficiente de correlação 0,91, cenas 221/69 (2014) e 221/67 (2015).	69
Figura 16: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com maiores coeficientes de correlação, 0,93, cenas 220/66 (2015) e 330/85 (2012).	70
Figura 17: Áreas queimadas (em amarelo) na porção nordeste do bioma Cerrado nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R.	73
Figura 18: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2012.	74
Figura 19: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2013.	75
Figura 20: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2014.	76
Figura 21: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2015.	77
Figura 22: Na primeira imagem, referente a órbita/ponto 220/66 do dia 29-08-2015, visualiza-se a ocorrência de queimadas em uma área agrícola. Na segunda imagem, referente a órbita/ponto 220/66 do dia 30-09-2015, visualiza-se várias queimadas que atingiram vegetações do entorno da área agrícola, que podem ter ocorrido de forma negligenciada ou de forma intencional.	78
Figura 23: Variabilidade mensal da precipitação no período de 2012, 2013, 2014 e 2015.	79
Figura 24: Anomalias da precipitação para a área de estudo nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.	81
Figura 25: Distribuição mensal dos focos de queimadas para a área de estudo nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.....	83

Figura 26: Frequência das áreas queimadas entre os anos de 2012 a 2015.	85
Figura 27: Mapa do uso e cobertura da terra do produto MCD12 referente à porção nordeste do bioma Cerrado.....	88
Figura 28: Percentual de área queimada, nos anos de 2012 a 2015, para as classes de uso e cobertura da terra presente na porção nordeste do bioma Cerrado.	89
Figura 29: Total dos focos de calor detectados pelo sensor MODIS nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Barras azuis apresentam os totais de focos detectados em toda área de estudo e barras laranja apresentam os totais de focos localizados dentro do buffer das áreas queimadas.	91
Figura 30: Exemplo de erros na detecção focos de calor pelos produtos MOD14 e MYD14 provenientes do sensor MODIS. Em amarelo estão representados os focos de calor e em lilás o buffer das áreas queimadas.	92
Figura 31: Percentual de área queimada em Unidades de Conservação localizadas na porção nordeste do bioma Cerrado para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.....	94
Figura 32: Percentual de área queimada para cada município localizado na porção nordeste do bioma Cerrado nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Datas das imagens MODIS utilizadas para o mapeamento das áreas queimadas (no formato dia/mês).	39
Tabela 2: Imagens OLI/L8 selecionadas a partir da amostragem aleatória estratificada utilizadas para validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS (no formato dia/mês).	41
Tabela 3: Imagens LISS-III selecionadas a partir da amostragem aleatória estratificada e utilizadas para validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS (no formato dia/mês).	42
Tabela 4: Frequência de queimadas.	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBIO	Instituto Chico Mendes de Biodiversidade
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IGBP	<i>International Geosphere-Biosphere Program</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRS	<i>Indian Remote Sensing Satellites</i>
IV	Infravermelho
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LISS	<i>Linear Imaging Sel-Scanner</i>
MCD	<i>MODIS Land Cover Type</i>
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MOD	Produtos originados pelo sensor MODIS/Terra
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>

MRT	<i>MODIS Reprojection Tool</i>
MSS	<i>Multispectral Scanner System</i>
MYD	Produtos originados pelo sensor MODIS/Aqua
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
SPOT	<i>Systeme Pour l'Observation de la Terre</i>
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
TIRS	<i>Thermal InfraRed Sensor</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UCs	Unidades de Conservação
UCT	Uso e Ocupação da Terra
USFS	<i>United States Forest Service</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
H ₂	Hidrogênio Molecular
Ha	Hectares
km	Quilômetros
m	Metros
mm	Milímetros
N ₂ O	Óxido Nitroso
NO	Óxido Nítrico
NO ₂	Dióxido De Nitrogênio
µm	Micrometros

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo Geral.....	20
2.2. Objetivos Específicos	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1. Cerrado: Uso da Terra e seus Impactos	21
3.2. Características das queimadas e os impactos que elas ocasionam na superfície .	25
3.3. Sensoriamento Remoto: detecção dos focos e cicatrizes de queimadas	28
4. ÁREA DE ESTUDO	32
5. MATERIAIS E MÉTODOS	38
5.1. Materiais utilizados.....	38
5.1.1. Sensor MODIS/EOS	38
5.1.2. Sensor OLI/Landsat8.....	40
5.1.3. LISS III/ Resourcesat-1	41
5.1.4. Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM.....	42
5.1.5. Dados complementares	43
5.2. Procedimentos Metodológicos.....	44
5.2.1. Mapeamento das áreas queimadas nas imagens OLI e LISS III	44
5.2.2. Pré-processamento dos dados MODIS.....	46
5.2.3. Uso do Modelo Linear de Mistura Espectral	47
5.2.4. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do Sensor MODIS.....	48
5.2.5. Análise dos dados TRMM	50
5.2.6. Análise da frequência e do tamanho das áreas queimadas.....	50
5.2.7. Análise das áreas queimadas com os dados auxiliares.....	51
5.2.8. Validação das Áreas Queimadas	51
5.2.9. Trabalho de Campo	54
6. RESULTADOS	61
6.1. Validação dos mapeamentos nas imagens MODIS	61
6.2. Análise Espacial das Queimadas	72
6.3. Variabilidade mensal dos índices de precipitação	79
6.4. Frequência das áreas queimadas	84
6.5. Concordância entre os focos de calor e área queimada.	90
6.6. Relação espacial das queimadas nas Unidades de conservação	92
6.7. Relação espacial das queimadas por município.....	95

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade de aumentar a produção de alimentos no mundo, nas últimas décadas gerou-se uma busca por áreas agricultáveis ainda não exploradas, a maioria dessas áreas encontravam-se entre os trópicos, nos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos e, principalmente, em áreas de Savana. Segundo Goedert et al., (1980), até metade do século XX, os trópicos possuíam aproximadamente 830 milhões de hectares de terras aptas para a lavoura, desse total, em torno de 240 milhões de hectares estavam cobertas por Savanas, localizadas principalmente na África e América do Sul. Apenas o território brasileiro, sozinho, possuía pelo menos 50 milhões de hectares de terras de Cerrados aptas aos cultivos agrícolas.

Assim, com a crescente demanda por grãos e biocombustíveis, o Cerrado brasileiro tornou-se um dos ambientes mais favoráveis para a expansão da fronteira agrícola. Porém, os avanços tecnológicos e a expansão da fronteira agrícola ocasionaram um avanço progressivo da supressão e degradação deste bioma, impactando de forma severa extensas áreas de ecossistemas naturais presentes no Cerrado (SANTOS et al., 2010).

Adversamente aos bons resultados obtidos financeiramente, a expansão agrícola impõe custos ambientais consideráveis em um processo contínuo de degradação do Cerrado que, devido a sua biodiversidade, é o segundo bioma mais representativo do território brasileiro (KLINK; MACHADO, 2005), ocupando aproximadamente uma área de 2.036.448 km², cerca de 22% do território nacional (RATTER et al., 1996). Ainda, é considerado também o bioma mais rico e ameaçado entre as savanas do mundo (KLINK, 1996), apresentando como uma de suas maiores riquezas uma ampla diversidade florística e faunística, contendo cerca de 10.000 espécies de plantas, 837 de aves, 120 de répteis e 150 de anfíbios, colaborando para que o mesmo seja considerado a formação savânica de maior biodiversidade do planeta e um dos 25 *hotspots* como prioridades para sua conservação no mundo (MYERS et al., 2000).

Neste contexto, milhões de hectares de domínio dos Cerrados foram ocupados, desde a década de 1970, por uma agricultura moderna praticada em imensas

propriedades. Essa agricultura é, por um lado, grande consumidora de insumos, implementos e maquinários e, por outro, grande produtora de commodities agrícolas, ao custo da retirada da cobertura vegetal original do bioma, trocando pastagens e formas tradicionais de cultivo por extensas áreas agrícolas produtoras de grãos, por muitas vezes, através da expulsão dos pequenos produtores das áreas mais produtivas do Cerrado (FREDERICO; CASTILLO, 2010).

Dentre as principais mudanças do uso e cobertura da terra no Cerrado, pode-se citar o desmatamento para fins da agricultura e pecuária, as invasões biológicas por espécies exóticas e as queimadas (PIVELLO, 2011). Desta forma, uma das consequências da utilização das áreas de Cerrado para a expansão da fronteira agrícola consiste no aumento da incidência do número de focos de queimadas. O fogo geralmente é utilizado após a retirada da vegetação natural para a abertura de novas áreas agrícolas, para a limpeza de áreas, rotação de culturas agrícolas, controle de pragas, remoção de vegetação seca e restos de cultivo e manutenção de pastagens, pois constitui uma técnica de baixo custo para os agricultores, sendo a atividade humana a causa mais comum das queimadas (BATISTA, 2004; LAUK; ERB, 2009; MARENCO et al., 2010).

Apesar da queima ser a forma mais barata de favorecer o crescimento das gramíneas em pastagens, de deter a invasão de plantas lenhosas não-comestíveis pelo gado e ser o primeiro passo na reforma de pastagens abandonada devido ao seu “baixo custo”, o fogo pode trazer drásticas consequências para o ambiente. Dentre eles pode-se citar a redução do tempo de pastoreio e dos nutrientes do solo, além de colocar em risco de incêndio os ecossistemas adjacentes, pois o fogo aniquila todas as partes aéreas das plantas, elimina ou afugenta os animais silvestres e interrompem o fluxo da água para a atmosfera via evapotranspiração (NEPSTAD et al., 1999).

As queimadas já são consideradas como um dos principais agentes de alteração de ecossistemas e de redução da biodiversidade, sobretudo nas regiões tropicais (KAUFFMAN; UHL, 1990). Durante uma queimada grande quantidade de gases são produzidos e liberados para atmosfera, entre os quais podemos citar o dióxido de carbono (CO₂), o hidrogênio molecular (H₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O), o óxido nítrico (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂), compostos hidrocarbônicos, entre

outros gases que podem surgir em reações secundárias (CRUTZEN et al., 1979). O CO₂ e o CH₄ são gases do efeito estufa, e quando liberados para a atmosfera podem acarretar no aquecimento global (LEVINE, 2000).

Dados levantados por Noojipady et al. (2015) mostram que entre os anos de 2003 e 2013 no bioma Cerrado houve um aumento da emissão de carbono, proveniente da conversão florestal, de 12% para 37%. Nesse mesmo período, a fração de emissões de carbono anuais na região do MATOPIBA aumentou de 13% para 56%, sendo que o aumento dessas emissões é impulsionado pela ampliação constante de novas áreas agrícolas que ocasiona na supressão da vegetação nativa do bioma.

Nesse sentido, infere-se que as queimadas estão relacionadas ao uso e ocupação da terra, fonte de mudanças e importante agente modelador dos ecossistemas (SAMPAIO et al., 2007; ICHOKU et al., 2008), sendo que os efeitos nocivos do uso descontrolado do fogo nos ecossistemas do Brasil e seus impactos ambientais negativos já são reconhecidos mundialmente (SETZER et al, 2007).

Imagens de satélite mostram que mais de 70% dos eventos de queimadas estão concentrados dentro dos trópicos (DWYER et al., 1999). Somente no Brasil, os focos de queimadas monitorados por satélites indicam anualmente a detecção de 100 a 300 mil locais com presença de fogo, considerando-se apenas imagens diárias de uma única plataforma orbital. Somando os dados de todos os satélites disponíveis, chega-se a aproximadamente um milhão de pixels com anomalia termal (SETZER et al., 2007). Somente no bioma Cerrado cerca de 140 mil focos de queimadas são detectados anualmente pelo sensor MODIS, tais focos ocorrem com maior frequência na porção norte deste bioma, nestas áreas a concentração anual de focos detectados pelo sensor MODIS podem ser superiores a 4 focos/km² (SANTOS et al., 2014). Conseqüentemente, inúmeros produtos apresentam estes resultados, permitindo analisar padrões temporais e espaciais de ocorrência do fogo, que em quase totalidade é de origem antrópica intencional (SETZER et al, 2007).

O uso do fogo na conversão de florestas para a agricultura, especialmente nos trópicos, continua a uma taxa alarmante. Desta forma, as queimadas continuam a aumentar em muitas partes do mundo, e os fatores envolvidos neste processo decorrem do aumento da pressão antrópica pela modificação do uso e cobertura da terra e de um

aparente aumento da severidade das condições climáticas, que podem gerar grandes incêndios catastróficos devido aos períodos de estiagem prolongados (FERGUSON et al., 2000).

Neste contexto, a necessidade de mapeamento, monitoramento e conhecimento de áreas naturais afetadas pela ação antrópica estão atreladas ao crescente avanço da tecnologia digital e ao desenvolvimento de novos algoritmos, permitindo um número de aplicações cada vez maior em diversas áreas da ciência. Sendo assim, as análises de imagens de satélite permitem uma melhor compreensão da superfície terrestre, auxiliando no acompanhamento da evolução de áreas urbanas; na previsão de inundações e furacões; na previsão de safras; na determinação de áreas desmatadas e queimadas, dentre outras atividades (PEDRINI; SCHAWARTZ, 2008).

Sendo assim, o sensoriamento remoto tornou-se imprescindível para a análise e compreensão da dinâmica do uso da terra, bem como seus impactos ecológicos e sociais gerados, devido a possibilidade da obtenção de dados de áreas extensas em intervalos de tempo regulares. Desta forma, pode-se adquirir informações espaciais e temporais sobre as áreas afetadas pelo fogo, fornecendo relevantes contribuições para o estudo de queimadas no meio ambiente e seus efeitos climáticos, ecológicos e na química da atmosfera (FRANÇA et al., 2005).

Estimativas indicam, em uma projeção futura, que até 2050 ocorrerá um desmatamento de 13,5% do restante do bioma Cerrado, com taxas médias de 40.000 km² por década (FERREIRA et al., 2012). Portanto, há poucas dúvidas na comunidade científica de que os sistemas de sensoriamento remoto por satélite proporcionam a chave para o monitoramento global das queimadas. Uma quantidade significativa de pesquisas tem sido direcionada para o desenvolvimento de novos algoritmos para detecção e monitoramento de focos e cicatrizes de queimadas, o que, por sua vez, melhorou consideravelmente as estimativas da extensão e emissão global (INNES; KOCH, 1998).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

A presente proposta tem como objetivo principal analisar a distribuição espacial das queimadas na porção nordeste do bioma Cerrado.

2.2. Objetivos Específicos

- (a) Mapear as áreas queimadas para o período de 2012-2015 para a porção nordeste do bioma Cerrado a partir dos dados diários de reflectância de superfície (MOD09GA e MOD09GQ) do sensor MODIS.
- (b) Validar o mapeamento das áreas queimadas a partir de dados do sensor *Operational Land Imager* (OLI) do satélite Landsat 8 e do sensor *Linear Imaging Self-Scanner* (LISS-III) do satélite Resourcesat-1 para o sensor MODIS.
- (c) Analisar temporalmente e espacialmente a evolução das áreas que foram afetadas pelas queimadas a partir de imagens de satélites ambientais e estimativas de campo.
- (d) Analisar a distribuição, tamanho e frequência dos polígonos classificados e validados como área queimada para os anos 2012-2015 na porção nordeste do Cerrado.
- (e) Analisar a relação entre o tipo de uso e cobertura da terra e a incidência de queimadas.
- (f) Analisar a relação entre a incidência das áreas queimadas e a variabilidade mensal da precipitação.
- (g) Analisar a distribuição e a frequência de áreas queimadas nas Unidades de Conservação presentes na porção nordeste do Cerrado.
- (h) Analisar a concordâncias entre os focos de queimadas e a área queimada.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Cerrado: Uso da Terra e seus Impactos

De origem espanhola, a palavra “Cerrado” tem como principal significado o termo “fechado”. Possui também diversas expressões e conceitos sendo de suma importância suas definições. Segundo Ribeiro e Walter (2008), o termo Cerrado buscou traduzir de forma ampla a característica da vegetação arbustivo-arbórea que ocorre na formação savânica. Martius (1824) utilizou-se do termo para abordar as diferenças fisionômicas observadas na vegetação do Brasil Central. Warming (1982), para tratar de um tipo vegetação por ele estudada, utilizou a expressão “campos-cerrados” e mencionou a palavra cerrado para simplificar a outra expressão. Assim, por uma não uniformidade, ocorreu, durante o século 20 usos diferenciados para o termo e sua comparação na literatura foi dificultada.

Com o passar dos anos o emprego do termo cerrado evoluiu, de modo que atualmente existem três acepções gerais de uso corrente, e que devem ser diferenciadas. A primeira, mais abrangente, refere-se ao bioma predominante no Brasil Central, a palavra é escrita em letra maiúscula e não vai para o plural. A segunda acepção refere-se ao “cerrado *lato sensu*”, que reúne diferentes formações de vegetação, como o Cerradão, nesse caso o termo cerrado é um tipo de vegetação definido pela composição florística e pela fisionomia. A terceira acepção do termo, “cerrado *stricto sensu*” designa um dos tipos fitofisionômicos que ocorre na formação savânica (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Quem primeiramente chamou a atenção do mundo científico para a existência do Cerrado foram os naturalistas viajantes, destacando-se entre todos a figura ímpar de Martius (1840-1906). Outros autores também iniciaram trabalhos relevantes sobre o Cerrado, como Moore (1895), Pilger (1901), Sampaio (1916) e Hoehne (1923) no estado mato-grossense e Glaziou (1905) sobre o Cerrado de Minas Gerais. Rawitscher e Ferri (1943) e Rizzini (1964) iniciaram os estudos sobre a vegetação do bioma; Alvim e Araújo (1952) e Feuer (1956) foram os primeiros a relacionar os solos com a vegetação; Costa (1964) e Branco (1964) introduziram a geologia nos estudos sobre o

Cerrado; e sobre o papel do fogo na vegetação do Cerrado, Coutinho (1976), entre outros, tiveram destaques importante com seus estudos (GOODLAND; FERRI, 1979).

Segundo Nogueira-Neto (1977), até meados do século XX o Cerrado era apresentado como área inútil para a economia nacional e como algo indesejável sob o aspecto estético, faunístico e florestal. Mas, de acordo com o mesmo autor, a pressão sob a economia do país resultante do desenvolvimento acelerado e pela necessidade de novas áreas agricultáveis levou a inclusão gradativa do Cerrado na economia agrícola nacional. As novas tecnologias, como a utilização de maquinários e insumos agrícolas, permitiram que o bioma Cerrado se tornasse produtivo economicamente.

Além disso, as terras disponíveis para a expansão da fronteira agrícola, destinadas à produção em larga escala, tornaram-se um recurso cada vez mais escasso em todo o mundo e estão concentradas principalmente nas regiões tropicais, alternando-se em localização e produção de acordo com a oferta e aumento do comércio internacional de commodities agrícolas (ALEXANDER et al., 2015). Além da política de financiamento agrícola, advinda principalmente após a Revolução Verde, e a atuação do governo que incentivou a busca de novas tecnologias e técnicas de manejo eficientes, os solos bem drenados e planos juntamente com a oferta de recursos naturais foi fundamental para ocupação agrícola no Cerrado (DINIZ, 2006).

Atualmente o Cerrado constitui-se como a maior cadeia de produção de carnes e grãos do país, devido à agricultura moderna praticada em suas terras, destinando grande parte da sua produção ao mercado externo (TAVARES, 2005; BERNARDES, 2015), sendo que a expansão da agricultura e a ampliação da produção agrícola nesta região ainda está associada à conversão de áreas de vegetação nativa (LAPOLA et al., 2014). A integração do território a partir da abertura de fronteiras agrícolas no Cerrado é fórmula predominante para a criação de regiões competitivas, principalmente com as áreas destinadas a algum produto de importância mundial e com a produção de grãos para o consumo interno e externo (SANTOS, 1996; HIRST; THOMPSON, 1998; CASTILLO, 2004).

Embora a expansão e a modernização do agronegócio ocasionem benefícios socioeconômicos significativos para agentes privados e para o governo, este representa, no bioma Cerrado, um vetor de degradação ambiental (KLINK et al., 2008).

A degradação dos ecossistemas que abrange o bioma Cerrado permanece de forma acelerada, na qual acarreta em diversos impactos negativos. Estima-se que sua área original apresentava em torno de 2 milhões de km², e desde meados do século XX, metade da área já foi suprimida ou convertida para outros usos (KLINK et al., 2008). Segundo Jordan et al. (2015) em 2013 existiam 101 milhões de hectares de terras agrícolas e 359 milhões de hectares de pastagens em toda a América Latina, no qual, cerca de 44 milhões de hectares dessas terras cultiváveis tinham sido convertidas recentemente devido, principalmente, à expansão da fronteira agrícola. Ainda segundo o autor, entre anos 2001 e 2013 o Cerrado brasileiro apresentou um acréscimo 10 milhões de hectares de novas áreas agrícolas, destinadas principalmente à produção de grãos.

Dentre as principais mudanças no uso e ocupação da terra nas últimas décadas no bioma cerrado devido à expansão da fronteira agrícola nessa região, pode-se citar as pastagens plantadas com gramíneas de origem africana, as culturas anuais como a soja, milho, feijão, arroz, algodão e café e as áreas com florestas de eucaliptos e pinos para a produção de carvão, papel e celulose (KLINK; MACHADO, 2005; KLINK et al., 2008).

Outra consequência da supressão vegetal nativa do bioma é a fragmentação do habitat, processo que promove a divisão de áreas contínuas em partes menores, isolando os fragmentos remanescentes ou até mesmo eliminando e reduzindo habitats únicos (WILCOVE et al., 1986). A fragmentação de habitat antrópica é a mais frequente, estando intimamente relacionada à expansão das atividades humanas (AQUINO; MIRANDA, 2008). No Cerrado, a ocupação acelerada de áreas aptas para a agricultura vem provocando a destruição de habitats únicos. Os organismos que vivem nesses habitats estão sendo excluídos ou isolados em pequenas manchas de vegetação, sendo que essas subpopulações isoladas são mais propensas à extinção (GILPIN; SOULÉ, 1986).

A dinâmica de inter-relação nos Cerrados entre vegetação/solo/água é muito estreita. Fica evidente que a erradicação da vegetação que hoje se encontra a uma taxa duas ou três vezes maior que a da Amazônia, e a exploração intensiva dos solos, com práticas baseadas na sua exposição, revolvimento e fertilização química, pode alterar

expressivamente o ciclo hidrológico e a qualidade da água no Cerrado (MAZZETTO-SILVA, 2009).

O contínuo processo de degradação do bioma, resultante da abertura da fronteira agrícola e sem uma eficaz gestão sustentável dos recursos naturais por parte do Estado, faz com que o Cerrado, depois da Mata Atlântica, seja considerado o ecossistema mais ameaçado no território brasileiro. A ação antrópica tem sido decisiva no processo de perda de biodiversidade do Cerrado ao promover a destruição de habitats naturais essenciais à manutenção de suas espécies, desmatamento, introdução de espécies exóticas, aumento do número de queimadas, poluição por agrotóxicos, erosão dos solos além da destruição de rios e nascentes (KLINK; MACHADO, 2005).

Como referido anteriormente, o Cerrado cedeu e tem cedido espaço a diferentes monoculturas, principalmente de soja e milho, o que tem comprometido todo o equilíbrio natural desse ecossistema. Tendo em vista que o rearranjo desse espaço ocorreu de forma desordenada em relação ao uso da terra para produção de mercadorias, grande parte do seu bioma já foi cooptado pelo capital e inserido no processo modernizador da agricultura (INOCÊNCIO, 2010). Nesta evolução acelerada, entretanto, o ecossistema adveio a sofrer impactos em velocidade superior à do antigo equilíbrio natural (PEREIRA et al., 2004).

Apesar da rápida degradação e dos diversos estudos já realizados que apontam a necessidade de uma preservação mais efetiva desse bioma, continua ocorrendo no Cerrado a expansão da agricultura de forma acelerada e sem medidas ambientais adequadas. Desta forma, através do avanço e da modernização agrícola o bioma entrou no circuito do capital global, guiado através de uma noção de desvalorização ecológica e da construção de um senso comum que via o Cerrado como uma região de vazio propícia ao desenvolvimento do setor agroexportador devido ao seu relevo plano e de solos profundos (MAZZETTO-SILVA, 2009). Por esses motivos o bioma Cerrado necessita de estudos aprofundados sobre sua estrutura econômica, social e natural e ter recursos compatíveis com sua importância estratégica.

3.2. Características das queimadas e os impactos que elas ocasionam na superfície

Muitos autores acreditam que as queimadas possuem um papel ecológico para a floração de algumas espécies típicas do bioma Cerrado. Coutinho (1976), pioneiro nos estudos sobre o papel do fogo no Cerrado, constatou depois de anos de análises que algumas espécies do estrato herbáceo apresentaram resposta positiva para florescer após queimadas e em qualquer período do ano. Enquanto algumas espécies florescem na época seca do ano ocorrendo ou não a queima, já outras espécies do cerrado florescem no período chuvoso e em dias longos, desta forma essas plantas são quantitativamente prejudicadas pelas queimadas.

Através de experiências de diferentes processos de eliminação dos órgãos epigeus utilizando a queima, poda e seca induzida por suprimento hídrico deficiente, Coutinho (1976) verificou que nos diversos tratamentos a floração foi uniforme. Desta forma o autor pôde afirmar que a ação do fogo na indução floral dessas plantas não se faz pelo efeito térmico durante a queima ou pelo maior aquecimento do solo e muito menos pelos nutrientes minerais fornecidos pelas cinzas, mas sim, pela eliminação dos ramos secos e de um possível inibidor de floração neles presentes (GOODLAND; FERRI, 1979).

Assim, por meio de suas experiências, Coutinho (1976) verificou no período de seca no Cerrado que a floração e o brotamento nas plantas são estimulados pela poda dos órgãos epigeus, sendo que as queimadas agem na floração pela eliminação dos órgãos antigos e secos e não pela brusca elevação de temperaturas do solo, ou por efeito de nutrientes contidos nas cinzas (GOODLAND; FERRI, 1979). Infere-se, desta forma, que o fogo pode ser substituído por outro processo de eliminação dos órgãos epigeus.

Como afirmam Klink e Machado (2005), mesmo sendo o Cerrado um ecossistema acostumado ao fogo, a queima das pastagens para a rebrota e para a abertura de áreas agrícolas causam perda de nutrientes, compactação e erosão dos solos além dos danos prejudiciais à flora e fauna, devido às temperaturas extremamente altas que podem ocorrer durante a queimada, principalmente na época seca. Além disso a alta frequência do fogo pode levar à substituição da vegetação lenhosa por uma

vegetação não arbórea, ou mesmo necessitar entre cinquenta a centenas de anos para se recuperar totalmente após a queima (BERGERON et al., 2001)

Segundo Coutinho (1976), as queimadas naturais podem ter origens diversas, como pelo vulcanismo, descargas elétricas, combustão espontânea, atrito entre rochas ou por queda de grandes matacões em zonas escarpadas, entre outros.

Embora o fogo controlado seja utilizado como ferramenta de gestão em algumas áreas de proteção ambiental e incentivados por alguns pesquisadores, a queimada da biomassa de forma descontrolada é uma grande ameaça para diversos habitats, com efeitos devastadores. Em curto prazo o fogo pode remover parcialmente ou completamente a camada da vegetação, destruindo fauna e flora típicos da região, já a longo prazo as queimadas podem alterar a composição e diversidade das espécies (SCHEPERS et al., 2014). As regiões sobre o domínio de Savanas, que possuem grandes quantidades de material seco, tornam-se áreas altamente inflamáveis.

O fogo é muito utilizado pelos produtores rurais em suas terras, pois elimina o acúmulo de biomassa de baixo valor nutritivo como os galhos secos e plantas invasoras e ajuda na brotação mais rápida das gramíneas e a germinação de sementes das mesmas. Por outro lado, queimadas excessivamente frequentes levam à degradação das pastagens nativas, com substituição de espécies desejáveis por outras indesejáveis, e até mesmo ao aparecimento de manchas de solo nu, o que acelera imensamente a erosão (FILGEIRAS; WECHSLER, 1992).

Outro fator importante a ser considerado sobre as queimadas é que estas também são uma causa significativa de poluição atmosférica e uma importante fonte de emissão de gases traços para a atmosfera. Os gases produzidos durante uma queimada incluem dióxido de carbono, metano, óxido de nitrogênio, amônia, entre outros (LEVINE, 2000). Estes gases traços e aerossóis desempenham um papel importante na química da atmosfera e no clima global (GRANIER et al., 2000).

As queimadas podem variar amplamente em sua intensidade e gravidade, principalmente, por causa das diferenças nas características físicas do combustível, condições climáticas e da fonte de ignição (FERGUSON et al., 2000). Portanto, múltiplos fatores podem explicar a ampla gama de diversidade do pós-fogo em uma vegetação, entre eles, a eficiência de combustão, que depende da intensidade e da

duração do fogo e da quantidade de biomassa existente; o tipo de fogo, visto que as queimadas podem ser rasteiras tornando difícil a detecção a partir de medições de sensoriamento remoto, ou queimadas mais severas que podem afetar toda a copa do estrato arbóreo; e outro fator deve-se às variações dos ecossistemas que apresentam diferentes adaptações e sensibilidades ao fogo (CHUVIECO et al., 2006).

Desta forma, infere-se que quanto mais longo e mais intenso uma queimada, mais grave serão os efeitos do fogo na vegetação e mais lento será sua recuperação. A intensidade do fogo e a duração dependem do comportamento do fogo, que é controlado por diferentes variáveis relacionadas com as propriedades do combustível, como a quantidade de biomassa, teor de umidade, propriedades químicas, tempo de duração do fogo e condições do meio ambiente, como declive, vento, chuva, entre outros (CHUVIECO et al., 2006)

Após a queima da biomassa ocorrem alterações imediatas na superfície devido a vários fatores, como o acúmulo de cinzas e carvão no solo, pela remoção total ou parcial da vegetação e pela alteração da sua estrutura (ROY et al., 2002).

Sendo assim, torna-se possível identificar uma queimada a partir da camada de cinzas e carvão que é depositada sobre o solo após a combustão da biomassa. Essa cicatriz pode durar alguns dias ou até meses, pois as cinzas e o carvão podem ser removidos pelas chuvas, ventos e atividades antrópicas, além disso a intensidade da cicatriz está muito ligada com a quantidade de biomassa consumida durante a queima, ou seja, florestas boreais e temperadas, quando queimadas, produzem maior quantidade de cinzas e carvão comparadas a áreas de savana também queimadas

No bioma Cerrado, o fogo pode acarretar na modificação da cobertura florística, diminuindo a proporção ocupada pelos estratos arbustivo e arbóreo e aumentando o estrato herbáceo. O fogo, portanto, é um fator altamente perturbador para muitos ecossistemas, pois a queima interfere no equilíbrio existente entre o clima, solo e cobertura da terra (INNES; HARON, 2000). Desta forma, o monitoramento sistemático se torna imprescindível para ações de prevenção e combate às queimadas nos ecossistemas, em especial naqueles ameaçados pela ação antrópica, assim como, para traçar metas no planejamento para controle e gerenciamento eficiente para os próximos anos (PIROMAL et al., 2008).

3.3. Sensoriamento Remoto: detecção dos focos e cicatrizes de queimadas

As diversas tecnologias espaciais e computacionais disponíveis atualmente trouxeram a possibilidade de estudar o sistema global. Nesse sentido, os estudos científicos buscam integrar as diversas disciplinas de pesquisa que enfocam sobre o entendimento do planeta como um todo, suas partes e como essas partes interagem entre si (KAMPEL, 2004). Desta forma, pesquisas sobre os sistemas terrestre têm requerido cada vez mais a aquisição de dados de sensoriamento remoto (KLEMAS; HARDISKY, 1983).

Através do Sensoriamento Remoto é possível obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre, por captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície. Os termos “sensoriamento” e “remoto” referem-se à obtenção de dados por meio de sensores instalados em plataformas terrestres, aéreas e orbitais, e essa obtenção é feita à distância, sem contato físico com os objetos, ou seja, remotamente (FLORENZANO, 2013).

A detecção de áreas afetadas pelo fogo, através do sensoriamento remoto, teve início nos primeiros anos da década de 1960 por entidades ligadas ao *United States Forest Service* (USFS), serviço Florestal dos Estados Unidos, em um programa experimental que desenvolveu estudos sobre imageadores biespectrais no infravermelho termal em aeronaves, realizando testes sobre as características espectrais de queimadas e de sensores, tendo esse programa duração de 10 anos (PEREIRA et al., 2004).

Após o lançamento do primeiro satélite da série Landsat, em 1972, tornou-se possível, com um nível maior de precisão, detectar alterações no uso e cobertura da terra através do espaço. Desde então, imagens obtidas por esse satélite têm sido usadas na detecção de mudanças na cobertura da terra, permitindo que áreas queimadas e desmatadas sejam detectadas (REMMEL; PEREIRA, 2001).

No que se refere à análise e mapeamento de áreas queimadas nos trópicos, a partir da década de 1980 foram desenvolvidas e aperfeiçoadas diversas técnicas de sensoriamento remoto para prevenção de incêndios florestais, avaliação e monitoramento. Estas técnicas têm sido empregadas para abordar três diferentes fases temporais do fogo: pré-condições de fogo, características de incêndios ativos e respostas do ecossistema pós-fogo (CHU; GUO, 2013).

Mudanças no comportamento espectral que ocorrem na sequência de um incêndio podem ser utilizadas para a identificação de padrões de áreas queimadas. Quando a vegetação é queimada, há uma redução na relação entre a região do espectro eletromagnético referente ao visível para a refletância no infravermelho, assim, as manchas queimadas são relativamente fáceis de discriminar visualmente por esse motivo (MILLER; THODE, 2007; CHU; GUO, 2013). Dessa forma, sensores remotos que operam na região óptica do espectro eletromagnético possuem grande utilidade na identificação, mapeamento e avaliação das áreas queimadas (FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Na região visível do espectro eletromagnético (de 0,4 a 0,7 μm), a refletância da vegetação depende da concentração de clorofila, assim em áreas de floresta a queimada pode ocasionar uma elevação da reflectância, pois com a exposição do solo este reflete mais do que a vegetação verde. Já em áreas de savanas as queimadas tendem a escurecer as áreas atingidas devido ao tipo de vegetação predominante, extrato herbáceo seco. Porém, a utilização da região do visível para o mapeamento de queimadas não é muito recomendado devido à possibilidade de confusão, na identificação, com outros alvos (FRANÇA, 2004; FRANÇA; FERREIRA, 2005).

O intervalo do espectro eletromagnético mais indicado para a identificação e mapeamento de cicatrizes das queimadas, em áreas de floresta, é na região espectral do infravermelho próximo (de 0,7 a 1,3 μm), pois nesta faixa a vegetação possui alta reflectância, devido à predominância do espalhamento interno da radiação na folha, mas verifica-se que após uma queimada ocorre um acentuado decréscimo de refletância, havendo elevado contraste entre a vegetação queimada e a não queimada, tornando assim, essa região do espectro eletromagnético bastante útil para a identificação das cicatrizes de queimadas (ARINO; PICCOLIN, 2000; FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Na faixa do infravermelho médio (de 1,3 a 3 μm), ocorre uma maior absorção pela água líquida predominante na reflectância espectral das folhas. No intervalo entre 3 e 5 μm do espectro eletromagnético a radiação é tanto refletida como emitida, tornando bastante complexo a utilização deste intervalo para a identificação de queimadas. Na faixa espectral do infravermelho termal (7 e 15 μm), as áreas queimadas apresentam-se mais quentes que as regiões vizinhas devido à elevação da temperatura do solo e

ausência de evapotranspiração e as emissões tendem a aumentar (ARINO et al., 2000; FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Dentre as duas linhas de pesquisas mais utilizadas para a identificação de áreas queimadas, detecção por foco ativo e detecção por cicatrizes da queimada, através dos dados orbitais, existem metodologias e procedimentos distintos para cada linha. Desta forma, compreender as características distintas de cada sensor em relação a sua resolução espectral, espacial, radiométrica e temporal é de suma importância para eficiência da pesquisa.

Os satélites das séries LANDSAT, RESOURCESAT e *Systeme Pour l'Observation de la Terre* (SPOT) de média resolução espacial possuem grande potencial para a identificação e distinção de cicatrizes de queimadas. Um fator que os torna apropriados para este tipo de análise é presença de uma banda na faixa espectral do infravermelho de ondas curtas (FRANÇA; FERREIRA, 2005). Os sensores presentes nesses satélites possuem imagens que são mais apropriadas para a detecção de cicatrizes de queimadas do que focos ativos, pois a frequência temporal é considerada muito baixa para a identificação de focos ativos.

Dentre os sensores de média resolução abordo dos satélites expostos anteriormente, destacam-se o sensor *Multispectral Scanner System* (MSS) primeiro sensor lançado, *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e o *Operational Land Imager* (OLI) sensor mais recente, da série Landsat, que possuem média resolução espacial de 30 m, resolução temporal de 16 dias e bandas no infravermelho médio (2,08 a 2,35 μm), além da série Landsat possuir uma grande fonte de dados históricos, com mais de 30 anos. Destaca-se também o sensor *High Resolution Visible and Infra-Red* (HRVIR) e o sensor *VEGETATION* (VGT) a bordo do satélite SPOT que capta imagens em 4 faixas espectrais com resolução de 20m e uma banda Pancromática (P) com resolução de 10m e resolução espacial de 26 dias.

Por outro lado, dados de sensores abordo de satélites com imageamento mais amplo, como os satélites *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES), *satélite National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e os satélites Terra e Aqua têm sido comumente utilizados para as análises regionais e globais em mudanças do uso da

terra, como o desmatamento e as queimadas (BOURGEOU-CHAVEZ et al., 2002; GEORGE, et al., 2006).

Quanto aos sensores mais adequados à detecção de focos ativos de alta resolução a bordo dos satélites referidos, destacam-se o sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite NOAA, sendo que a identificação de focos provenientes das queimadas torna-se eficiente quando feito nas bandas termais (ROBINSON, 1991). Este sensor possui cinco bandas espectrais a alta frequência temporal com pelo menos uma imagem no período vespertino e outra de madrugada (FRANÇA; FERREIRA, 2005).

Porém, com o lançamento dos satélites Terra e Aqua portando o sensor MODIS, em 1999 e 2002 respectivamente, iniciou-se uma nova perspectiva para o monitoramento e detecção de áreas afetadas por queimadas (JUSTICE et al., 2002). Para o mapeamento das queimadas destaca-se o produto *Thermal Anomalies and Fire* (MOD14), voltado para identificação dos focos ativos e o produto *MODIS Surface-Reflectance* (MOD09) para o mapeamento de cicatrizes de queimadas. O sensor MODIS possui uma série de características melhoradas em relação aos sistemas do NOAA e do GOES, como por exemplo, uma melhor resolução espectral e radiométrica, aliado ainda a uma alta resolução temporal, entre 1 e 2 dias (JUSTICE et al., 2002).

A extensão territorial e a diversidade da cobertura vegetal do Brasil, bem como o número expressivo de queimadas apuradas anualmente no país, são fatores que enfatizam a necessidade de um sistema cada vez mais aprimorado e consistente de detecção de áreas afetadas pelo fogo para facilitar as atividades de planejamento de prevenção, controle e mitigação dos danos. Neste contexto, o avanço do sensoriamento remoto, tanto no desenvolvimento de técnicas modernas de processamento e interpretação de imagens quanto no lançamento de novos sensores, tem ampliado o potencial para a extração de informações mais precisas sobre diversos impactos e modificações no uso e cobertura da terra (KAWAKUBO, 2010). Desta forma, a detecção de queimadas, seja por focos de calor ou por cicatrizes, através do sensoriamento remoto, é a forma mais viável para o Brasil, devido à magnitude e à diversidade das características dos ecossistemas florestais (BATISTA, 2004).

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se nas coordenadas 02° e 15° de latitude sul e 42° e 51° de longitude oeste, abrangendo as mesorregiões: Extremo Oeste Baiano; Sudoeste Piauiense; Sul Maranhense; e Oriental do Tocantins, área conhecida como MATOPIBA (**Figura 1**). Os estados que estão inseridos na área de estudo possuem domínio do Cerrado, que por sua vez limita-se com outros três biomas diferentes, a norte com o domínio da Amazônia, a leste e a nordeste com o da Caatinga e de leste a sudeste com o da Floresta Atlântica, ocorrendo nesses limites as “faixas de transição” que são a ocorrência de dois ou mais domínios morfoclimáticos (Ab´SABER, 2003; SILVA, et al., 2008).

O Cerrado possui, em grande parte do seu domínio, características climáticas bem definidas, apresentando duas estações. Uma estação chuvosa, que começa entre os meses de setembro e outubro e se estende até março e abril, e outra estação seca, que se inicia entre os meses de abril e maio e estende-se até os meses de setembro a outubro, ocorrendo em média de 5 a 6 meses de deficiência hídrica (SILVA et al., 2008).

As temperaturas médias anuais no sudoeste do bioma Cerrado podem variar em até 18 graus Celsius (°C) dentre as estações do ano, ficando entre 18°C a 36°C. Durante as estações outono-inverno as médias anuais da temperatura mínima, nessa região do bioma, ficam entre 19°C a 23°C, nos estados do Maranhão e do Piauí as temperaturas mínimas anuais são mais elevadas, com valores médios oscilando de 21°C a 23°C. Durante as estações primavera-verão, ocorrem as médias mais elevadas da temperatura, com variação térmica de 24°C a 36°C, predominando este último valor em grande parte do Maranhão e Piauí (SILVA et al., 2008).

Em relação ao clima, é predominantemente classificado como Aw de Köppen, Tropical Chuvoso, caracterizado por invernos secos e verões quentes e chuvosos, coincidindo com a distribuição da maioria das Savanas. A precipitação média anual gira em torno de 1.500mm, variando de 750mm a 2.000mm. O mecanismo atmosférico geral determina uma precipitação média semelhante em toda a região do Cerrado, criando nela uma tendência de uniformidade pluviométrica, com estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa (RICHARDS, 1976; NIMER, 1989; RIBEIRO; WALTER, 2008).

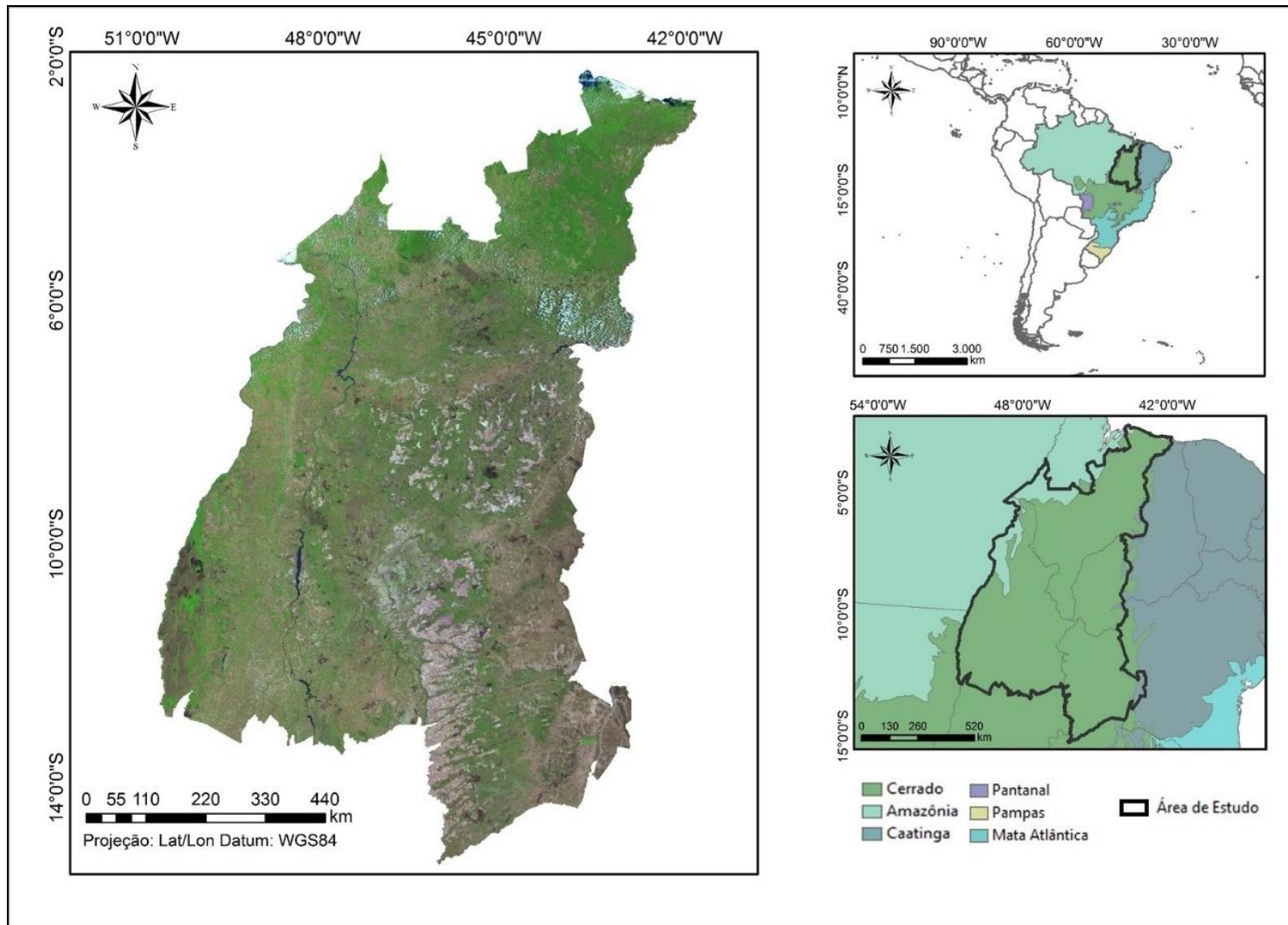


Figura 1: Localização da área de estudo.

A hidrografia é caracterizada principalmente pelos rios Araguaia, Tocantins, São Francisco, Parnaíba e seus afluentes, formando três bacias hidrográficas, Bacia do Rio Tocantins, Bacia do Atlântico – Trecho Norte/Nordeste e Bacia do Rio São Francisco. A Bacia do Rio São Francisco é hidrologicamente a mais importante da região nordeste do país pelo grande volume de água transportada para o semiárido. Em segundo lugar, está a região hidrográfica do Parnaíba cujos aquíferos apresentam o maior potencial hídrico da região.

A geologia da região dos Cerrados constitui-se na maior parte de rochas do pré-cambriano recobertas em grande parte por coberturas detrítico-lateríticas dos pediplanos cenozoicos, exceto pelos planaltos areníticos e basálticos paleozoicos da bacia sedimentar do Parnaíba e mesozoicos das bacias do São Francisco. A região dos Cerrados é uma das mais ricas do país em reservas mineiras, constando reservas de amianto, diamante, nióbio, ouro, prata, titânio, calcário, ferro, manganês, quartzo, dentre outros (DIAS, 1992).

De maneira geral, a maior parte do bioma Cerrado é dominada por Latossolos e suas variações, como o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho, que compõem cerca de 58% de toda a área. Esses solos estão localizados em relevos residuais de superfícies de aplainamento, conhecidas regionalmente como chapadas, apresentando topografias planas a suave-ondulada, relevo muito comum na região de estudo. Ocorre, na região, a presença de outros tipos de solos como os Neossolos Quartzarênicos, relacionados a sedimentos arenosos de cobertura e a alteração de rochas quartzíticas e areníticas, localizados normalmente em relevo plano ou suave-ondulado e com vegetação predominante de Cerrado e Campo Cerrado. Os Argissolos ocupam na paisagem a porção inferior das encostas, geralmente onde o revelo apresenta-se como ondulado ou forte-ondulado, e ocorrem nesses solos sérios problemas de erosão quando desprovidos de cobertura vegetal, em virtude da característica intrínseca de gradiente textural (COLE, 1986; WALTER et al., 1986; REATTO et al., 1998).

Apesar dos Latossolos predominarem sobre o Cerrado, ocorrem um número significativo de outras classes de solos, como os Plintossolos, Gleissolos, Neossolos Quartzarênicos e Litólicos, Cambissolos, entre outros, que em associação com as

condições de clima e hidrografia, favorece o estabelecimento de grande diversidade florísticas no bioma (REATTO et al., 1998).

O bioma Cerrado apresenta fisionomias diferentes reunindo formações florestais, savânicas e campestres, um gradiente vegetacional entre árvores e arbustos, entre arbustos e subarbustos e entre subarbustos e estruturas herbáceas. Fisionomicamente, o termo floresta se refere às áreas em que as espécies arbóreas são predominantes, com dossel contínuo ou não. O termo savana representa as áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato graminoso, sem dossel contínuo. Regiões de campos indicam as áreas com espécies herbáceas e algumas arbustivas, sem árvores na composição da paisagem (EITEN, 1972; RIBEIRO; WALTER, 1998).

A flora presente no Cerrado é característica e diferente dos biomas que a circundam, sendo que, segundo Ribeiro e Walter (2008) são influenciadas indiretamente por diversos fatores, como o clima, a química e a física dos solos, a disponibilidade de água e nutrientes, a geomorfologia e a topografia. A distribuição da flora do Cerrado é condicionada pela latitude, pela profundidade do lençol freático, pelo pastejo, pela frequência de queimadas, além de outros diversos fatores antrópicos.

Apesar de existirem diversas nomenclaturas e definições sobre os tipos de fitofisionomias para a flora do Cerrado, a tarefa de padronização é dificultada devido aos diferentes critérios e escalas que cada autor utiliza para abordar o tema. As classificações aqui apresentadas para descrever as fitofisionomias são adotadas por Ribeiro et al. (1983) e complementadas por Ribeiro e Walter (2008). São discriminadas onze tipos de vegetação: as formações florestais (Mata Ciliar, Mata Seca, Mata de Galeria e Cerradão); as savânicas (Cerrado stricto sensu, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda); e campestres (Campo Limpo, Campo Sujo e Campo Rupestre).

No Cerrado as formações florestais possuem tipos de vegetação de predominância de espécies arbóreas de dossel contínuo. A Mata ciliar apresenta vegetação florestal ligada aos rios de médio e de grande porte, sendo que a vegetação arbórea não forma galerias, a mata é relativamente estreita, dificilmente ultrapassando 100 m de largura por margem e ocorre geralmente sobre terrenos acidentados. As Matas de Galeria estão geralmente localizadas nos fundos dos vales ou nas cabeceiras de drenagem, entendendo-se como vegetação florestal que acompanha os rios de pequeno

porte e córregos do Cerrado, formando corredores fechados (galerias) sobre o curso de água. A vegetação designada com Mata Seca ocorre nos interflúvios, em locais mais ricos em nutrientes e além de não possuir associação com cursos de água, são caracterizadas por diversos níveis de caducifólia durante a estação seca. O cerradão apresenta formação florestal com características esclerófilas, folhas duras, sendo incluído no conceito de Cerrado *lato sensu*, caracterizando-se por sub-bosque formado por pequenos arbustos e ervas, com poucas gramíneas (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Nas formações savânicas do Cerrado estão englobados quatro tipos fitofisionômicos. O Cerrado *stricto sensu* é caracterizado pela presença de estratos arbóreo e arbustivo-herbáceo, com a presença de árvores em diferentes densidades distribuídas sobre o terreno, não formando um dossel contínuo. De acordo com o ambiente em que se encontra e com a densidade estrutural, essa vegetação pode apresentar quatro subtipos: Cerrado Denso, Cerrado Típico, Cerrado Ralo e Cerrado Rupestre. O Parque de Cerrado é uma formação savânica caracterizada pela ocorrência de árvores concentradas em locais específicos do terreno, principalmente agrupadas em pequenas elevações do terreno sendo algumas de pequeno destaque e outras de grande destaque. Palmeiral é uma formação savânica que pode ocorrer tanto em áreas bem drenadas quanto em áreas mal drenadas, possui diferentes subtipos de palmeirais, que variam em estrutura de acordo com a espécie dominante. Além da presença marcante da espécie denominada como Palmeiral, essa formação savânica possui outros quatro subtipos de palmeiras: Babaçal, Buritizal, Guerobal e Macaubal. A última formação savânica definida é a Vereda que também se caracteriza pela presença de uma única espécie de palmeira, o buriti, sendo circundadas por campos típicos de maioria úmidos (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Nas formações campestres o Cerrado apresenta três tipos fitofisionômicos. O Campo Limpo, de característica predominantemente herbácea, com poucos arbustos e ausência de árvores, encontra-se em diversas posições topográficas, que de acordo com peculiaridades edáficas ou de topografia do terreno podem apresentar três subtipos: Campo Limpo Seco, Campo Limpo Úmido e Campo Limpo com Murundus. O Campo Sujo caracteriza-se pela presença evidente de arbustos e subarbustos esparsos, também podem apresentar três subtipos de acordo com as particularidades topográficas ou

edáficas: Campo Sujo Seco, Campo Sujo úmido e Campo Sujo com Murundus. O Campo Rupestre apresenta características similares ao Campo Sujo e ao Campo Limpo, mas diferencia-se pelo substrato, composto por afloramentos de rochas e pela composição florística, sendo um tipo fitofisionômico herbáceo-arbustivo (RIBEIRO; WALTER, 2008).

No que se refere às Unidades de Conservação (UCs), denominadas como áreas permanentemente protegidas e destinadas primordialmente à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais (IBAMA, 2007), estão localizadas na área de estudo 17 unidades de conservação federais, todas geridas pelo Instituto Chico Mendes de Biodiversidade (ICMBIO), discriminadas em: quatro Reservas Extrativistas, seis Parques Nacionais, três Áreas de Proteção Ambiental, duas Estações Ecológicas, uma Floresta Nacional e um Refúgio da Vida Silvestre (ICMBIO, 2016).

As UCs Estaduais localizadas na área de estudo então divididas em três categorias: um Monumento natural e dois Parques Estaduais de proteção integral, ambos localizados no Tocantins, além de dez Áreas de Proteção Ambiental, sendo três no estado da Bahia, uma no Maranhão e 6 no estado do Tocantins, todas as unidades são de uso sustentável, mas nenhuma possui plano de manejo (MMA, 2016).

Em relação às Reservas Indígenas, são áreas destinadas à posse permanente dos povos indígenas e que pertencem ao patrimônio da União, sendo essas áreas destinadas apenas aos povos de etnia indígenas com direito ao usufruto e utilização das riquezas naturais. Encontram-se na área de estudo quatro reservas, são elas: reserva indígena Krahó-Kanela de etnia Krahó-Kanela localizada em Tocantins, reserva indígena Vargem Alegre de etnia Pankararú, reserva indígena Fazenda Remanso de etnia Tuxá, ambas localizadas na Bahia e reserva indígena Krenyê de etnias Timbira e Krenyê localizada no Maranhão (FUNAI, 2016).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Materiais utilizados

5.1.1. Sensor MODIS/EOS

O sensor MODIS é o principal instrumento das plataformas Terra e Aqua. Este foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do visível (VIS) e do infravermelho (IV) do espectro eletromagnético, cobrindo a superfície terrestre a cada dois dias. O fato do MODIS desde 2002 estar a bordo das duas plataformas realça a importância que ele possui para os estudos dos processos de mudanças globais (SOARES et al., 2007).

O sensor MODIS possui alta sensibilidade radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 μm a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m, e as demais 29 bandas em 1 km. O sensor possui órbita polar, ângulo de imageamento de $\pm 55^\circ$, altitude de 700 km, faixa imageada de 2.330 km e cobre todo o globo. O horário de passagem varia sobre um dado ponto da superfície de acordo com a plataforma. Os produtos da plataforma Terra recebem a sigla MOD, cruzando o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; e os produtos da plataforma Aqua são denominados de MYD, e em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min, obtendo-se, desta forma, aproximadamente 4 passagens diárias sobre uma mesma área (LATORRE et al., 2007; SOARES et al., 2007).

As imagens do sensor MODIS utilizadas englobam os tiles H13V09 e H13V10, no qual estão inseridos os estados do Tocantins, Bahia, Piauí e Maranhão. Os produtos do sensor MODIS adquiridos foram: MOD09GA, que representam diariamente a reflectância espectral da superfície em 7 bandas com resolução espacial de 500 metros e MOD09GQ, que possui 2 bandas e resolução espacial de 250 metros, ambos produtos possuem resolução temporal de 1 dia. As imagens adquiridas consistiram nos meses de

junho a novembro dos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Vale destacar que as imagens que apresentavam muitas nuvens foram descartadas. Na **tabela 1** estão listadas as datas das imagens do sensor MODIS que foram processadas e mapeadas.

Tabela 1: Datas das imagens MODIS utilizadas para o mapeamento das áreas queimadas (no formato dia/mês).

Ano da imagem	Datas das imagens mapeadas
2012	02/06, 09/06, 16/06, 18/06, 21/06, 27/06, 30/06, 21/06, 02/07, 04/07, 07/07, 09/07, 11/07, 14/07, 15/07, 16/07, 18/07, 23/07, 25/07, 27/07, 29/07, 03/08, 05/08, 07/08, 08/08, 15/08, 26/08, 03/09, 08/09, 13/09, 16/09, 21/09, 01/10, 08/10, 17/10.
2013	01/06, 10/06, 12/06, 19/06, 21/06, 24/06, 28/06, 03/07, 10/07, 14/07, 19/07, 20/07, 22/07, 29/07, 04/08, 06/08, 08/08, 11/08, 15/08, 17/08, 20/08, 24/08, 27/08, 31/08, 02/09, 03/09, 09/09, 11/09, 14/09, 16/09, 18/09, 21/09, 23/09, 02/10, 04/10.
2014	01/06, 06/06, 10/06, 15/06, 22/06, 25/06, 27/06, 01/07, 03/07, 04/07, 06/07, 10/07, 12/07, 18/07, 24/07, 29/07, 01/08, 01/08, 05/08, 09/08, 12/08, 18/08, 19/08, 26/08, 30/08, 03/09, 04/09, 08/09, 09/09, 15/09, 19/09, 21/09, 03/10, 07/10, 10/10, 13/10.
2015	02/06, 10/06, 13/06, 02/07, 04/07, 13/07, 18/07, 20/07, 29/07, 03/08, 05/08, 09/08, 12/08, 14/08, 17/08, 19/08, 21/08, 30/08, 02/09, 04/09, 06/09, 09/09, 11/09, 18/09, 24/09, 30/09, 03/10, 04/10, 11/10, 15/10, 18/10, 20/10, 22/10.

Além dos dados já apresentados, outros três produtos do sensor MODIS foram utilizados no trabalho. Para a elaboração do mapa de Uso e Cobertura da Terra utilizou-se o produto MODIS *Land Cover Type* (MCD12Q1), que disponibiliza a classificação anual de uso e cobertura da terra (UCT) para a América do Sul a partir da classificação primária do *International Geosphere-Biosphere Program* (IGBP) (BELWARD et al.,

1999). O MCD12Q1 possui resolução espacial de 500 m e disponibiliza a classificação do UCT a cada ano.

Para a elaboração dos mapas de focos de queimadas para os anos de 2012 a 2015, foram extraídos os dados a partir dos produtos MODIS *Thermal Anomalies/Fire products* (MOD14 e MYD14) a bordo dos satélites Terra e Aqua respectivamente, que fornecem a localização de focos de queimada e outras variáveis. Possuem uma resolução espacial de 1 km e quatro aquisições diárias, além de fornecer dados globais.

5.1.2. Sensor OLI/Landsat8

O programa espacial Landsat é o sistema de satélites de observação da terra mais antigo dos Estados Unidos, o primeiro sensor *Multispectral Scanner System* (MSS) foi lançado em 1972 e desde então disponibiliza a maior série histórica de dados remotos destinados ao monitoramento da superfície terrestre. De maneira geral, eles podem ser destinados às mais diversas aplicações, como na agricultura, geologia, educação, desmatamento, mapeamento e mudanças climáticas (USGS, 2016).

O satélite Landsat 8 (L8), mais recente da série, tornou-se disponível em 30 de maio de 2013. O satélite está em órbita com dois sensores, o sensor *Operational Land Imager* (OLI) e o sensor *Thermal InfraRed Sensor* (TIRS). Possuem uma resolução temporal de 16 dias e o tamanho aproximado de cada cena do Landsat 8 é de 170 km por 183 km. O sensor OLI possui nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 metros nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 9, e a banda 8, pancromática, com resolução espacial de 15 metros. O sensor TIRS possui duas bandas termais, compostas pelas bandas 10 e 11, que detecta a energia emitida em duas regiões do infravermelho termal com resolução espacial de 100 metros (USGS, 2016).

As datas das imagens OLI/L8 utilizadas, listadas na **Tabela 2**, foram selecionadas entre os meses de junho a novembro, seguindo o critério de menor cobertura de nuvens.

Tabela 2: Imagens OLI/L8 selecionadas a partir da amostragem aleatória estratificada utilizadas para validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS (no formato dia/mês).

Ano da imagem	Órbita/Pontos sorteados aleatoriamente	Datas disponíveis
2013	221/65	27/06, 13/07, 29/07, 14/08, 30/08/13, 15/09.
	219/66	31/07, 16/08, 01/09, 17/09, 03/10.
2014	221/69	30/06, 17/08, 02/09, 18/09.
	222/67	05/06, 21/06, 07/07, 23/07, 08/08, 24/08, 09/09, 11/10.
2015	220/66	12/07, 28/07, 13/08, 29/08, 30/09, 16/10.
	221/67	01/06, 03/07, 19/07, 04/08, 20/08, 05/09.

5.1.3. LISS III/ Resourcesat-1

O sensor *Linear Imaging Self-Scanner* (LISS-III) desenvolvido pela Indian Space Research Organisation (ISRO) foi desenvolvido em duas versões. A primeira a bordo dos satélites *Indian Remote Sensing Satellites* (IRS-1C/1D) operando em quatro comprimentos de onda com diferentes resoluções espaciais, variando entre 23,6 a 180 metros em cenas de 142 ou 148 km. A segunda versão do LISS-III foi lançada a bordo do satélite RESOURCESAT-1, também chamado IRS-P6, onde as principais mudanças apresentadas foram na resolução espacial que passou a ser de 23,5 metros para todos os canais espectrais (INPE, 2016).

O sensor LISS-III possui resolução radiométrica de 7 bits, áreas imageadas por faixas de 141 km, resolução temporal de 24 dias e quatro bandas espectrais, compostas

pelos canais referentes ao verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio, com resolução espectral de 0.52-0.59 μm , 0.62-0.68 μm , 0.77-0.86 μm e 1.55-1.70 μm , respectivamente. Os satélites que possuem este sensor a bordo fornecem informações relacionadas à vegetação, caracterização de culturas e espécies vegetais (INPE, 2016).

Devido à falta de dados do satélite Landsat não foi possível adquirir as imagens de 2012 desse sensor, desta forma as órbitas/pontos 220/68 e 223/67 foram substituídas pelas órbitas/pontos 330/67 e 325/84, respectivamente, do sensor LISS-III a bordo do satélite indiano RESOURCESAT-1. As datas das imagens utilizadas, listadas na **Tabela 3**, foram selecionadas entre os meses de junho a novembro, seguindo o critério de menor cobertura de nuvens.

Tabela 3: Imagens LISS-III selecionadas a partir da amostragem aleatória estratificada e utilizadas para validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS (no formato dia/mês).

Ano da imagem	Orbita/Pontos sorteados aleatoriamente	Datas disponíveis
2012	330/67	21/06, 15/07, 08/08.
	325/84	20/06, 14/07, 07/08/.

5.1.4. Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM

O *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) é uma missão conjunta entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos Estados Unidos e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) do Japão. O satélite TRMM foi lançado em 27 de novembro de 1997, e até o mês de agosto de 2001, o satélite orbitava numa inclinação de 35 ° e uma altitude de 350 km, a partir de então, a altitude do satélite foi aumentada para 402 km com o intuito de prolongar a vida útil da missão. O potencial do satélite reside na sua capacidade de aderir à informação radiométrica passiva e ativa (KUMMEROW et al., 1998; LONFAT et al., 2004).

O TRMM tem como principal objetivo monitorar e medir a precipitação nos trópicos e o clima global. Pode-se citar entre os principais instrumentos a bordo um imageador de micro-ondas, um radar de precipitação, um sistema de radiômetro visível e infravermelho, um sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens e um sensor para imageamento de relâmpagos (KUMMEROW et al., 1998). O TRMM gera diversos produtos de acordo com a combinação de instrumentos e algoritmos para a estimativa da precipitação, além disso, possui uma grande vantagem devido à sua alta resolução temporal, de 3 horas, e espacial, de 0.25°, cobrindo a faixa entre 50°S e 50°N (COLLISCHONN et al., 2007).

Com finalidade de caracterizar o padrão sazonal da precipitação para os anos de 2012 a 2015 na área de estudo, os dados utilizados no trabalho foram extraídos do produto TRMM 3B43 na versão mais recente, denominada V7, lançada em 2012. O TRMM 3B43 é um conjunto combinado de dados de observação baseado em estações meteorológicas e estimativas da precipitação por satélite, e o padrão mensal é gerado após a realização de uma média dos dados do produto TRMM 3B42.

5.1.5. Dados complementares

Para auxiliar na elaboração dos resultados finais foram utilizados alguns arquivos vetoriais no formato *shapefile*. Entre os arquivos utilizados, destacam-se: I) limite da região MATOPIBA, para a delimitação da área de estudo, obtido no endereço eletrônico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, disponibilizado em http://geoinfo.cnpm.embrapa.br/layers/geonode:limite_matopiba), II) municípios localizados dentro do limite do MATOPIBA, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (em http://downloads.ibge.gov.br/downloads_top.php), e III) Unidades Conservação e dos biomas brasileiros, disponibilizados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, em <http://www.mma.gov.br>).

5.2. Procedimentos Metodológicos

Depois de adquirida toda a base para o banco de dados, torna-se necessário a utilização de algumas técnicas de processamento para facilitar a interpretação das imagens e a detecção das áreas queimadas, visto que o processamento digital de imagens é determinado por conjuntos de técnicas voltadas para o pré-processamento de dados. Essas técnicas têm como alvo melhorar a qualidade visual da imagem através da aplicação de algoritmos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). Para o processamento das imagens, foram utilizados basicamente os programas: I) Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING 5.3), software gratuito desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); II) ArcGis 10.1; III) *Environment for Visualizing Images* (ENVI 5.3); e IV) *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

5.2.1. Mapeamento das áreas queimadas nas imagens OLI e LISS III

O mapeamento das áreas queimadas foi realizado primeiramente em imagens dos sensores LISS-III e OLI, que serviram de referência para validação das áreas queimadas mapeadas nas imagens MODIS. Para essa finalidade, foram adquiridas imagens de oito cenas compreendidas dentro da área de estudo, a seleção destas cenas foi realizada a partir de um sorteio aleatório, ponderado pela quantidade de focos de queimada detectados pelo MOD14 e MYD14. Desta forma, todas as órbitas/pontos referentes ao Landsat na qual existiam mais de 100 focos de calor foram inseridas em uma lista, em seguida foram sorteadas aleatoriamente duas órbitas/pontos para cada ano. A ponderação para a seleção das cenas pelo número de focos de queimadas objetiva selecionar cenas dos satélites na qual há um número significativo de áreas queimadas, evitando desta forma, a seleção de regiões sem queimada.

Depois de selecionadas as cenas, foram adquiridas as imagens que possuíam pouca ou nenhuma presença de nuvens. Para o ano de 2012 foram utilizadas imagens do sensor LISS-III (reamostrada para a resolução do OLI/L8) e para os anos de 2013, 2014 e 2015 foram utilizadas imagens do sensor OLI.

As imagens do sensor OLI já estavam ortorretificadas e georreferenciadas. Desta forma, apenas, as imagens do ano de 2012 do sensor LISS-III foram geometricamente corrigidas a partir do modelo polinomial de primeiro grau e interpolador vizinho mais próximo, que permite a comparação multitemporal das imagens provenientes de satélites distintos. As imagens foram georreferenciadas pela base Geocover disponibilizada pela NASA, originados de imagens Landsat que foram submetidos a procedimentos de ortorretificação para minimizar o deslocamento nas imagens devido ao relevo.

Posteriormente, criou-se o banco de dados no Spring 5.3 com toda a base adquirida. Assim, o banco de dados constitui-se de imagens do sensor LISS-III para o ano de 2012 e imagens do sensor OLI para os anos de 2013, 2014 e 2015. Técnicas de processamento digital foram utilizadas com o intuito de facilitar a interpretação das imagens e a detecção das cicatrizes de queimadas.

Devido à dificuldade de delimitar a área queimada na composição colorida, foi aplicado o contraste com realce por falsa-cor, por meio da manipulação do histograma da imagem. Para as imagens do sensor LISS-III utilizou-se a composição 2B3G4R e nas imagens do sensor OLI a composição utilizada foi 4B5G6R, o que permite a melhor visualização das cicatrizes queimadas. Desta forma, as técnicas de realce possuem o objetivo de melhorar a característica visual das imagens permanentemente ou momentaneamente (PONZONI; SHIMABUKURO, 2009). Embora o resultado possa produzir imagens cujas cores não correspondam aos valores espectrais reais da cena, o realce pode melhorar significativamente a qualidade visual das imagens (PEDRINE; SCHAWARTZ, 2008).

Após aplicação do contraste, as mesmas passaram pelo processo de segmentação, os limiares utilizados foram 10 para a similaridade e 16 para a área. A segmentação utilizada consiste no método de divisão por região, onde inicia-se com regiões formadas por pixels da imagem e, recursivamente, subdivide as regiões não-homogêneas em áreas menores. O processo de subdivisão termina quando todas as regiões satisfazem o critério de similaridade (PEDRINE; SCHAWARTZ, 2008). Realizado todos os procedimentos, o último passo consistiu na edição topológica de todas as imagens, na qual foram classificados os polígonos das áreas queimadas às suas

respectivas classes, e a edição manual do mapeamento de eventuais áreas de queimada não classificadas.

5.2.2. Pré-processamento dos dados MODIS

Os produtos MOD09GA e MODO09GQ, adquiridos do sensor MODIS, são disponibilizados em *Hierarchical Data Format* (HDF), portanto, após o download de todos os dados, foi utilizado o aplicativo MODIS *Reprojection Tool* (MRT) para converter e reprojetar os dados para GeoTIFF LAT/LON WGS-84. Após o pré-processamento, foi realizado os mosaicos dos 2 tiles que englobam a área de estudo e, posteriormente, foi gerado o recorte da área desejada, originando imagens com 7 bandas e 250 metros de resolução espacial. Todos os dados foram adquiridos de <http://e4ftl01.cr.usgs.gov/>.

Especificamente para os dados adquiridos dos produtos MOD14 e MDY14, com o intuito de espacializar e determinar os focos de queimadas, os mesmos foram adquiridos em formato HDF, transformados em *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII) e agrupados anualmente a partir de um programa em Fortran. Os arquivos anuais com a localização espacial dos focos foram então inseridos no aplicativo ArcGIS 10.1 com o intuito de realizar o recorte espacial dos dados por meio de uma máscara contendo o limite da área de estudo, uma vez que os dados do MOD14 e MYD14 são globais.

Foi criado um *buffer* de 1 km em torno de cada polígono classificado como área queimada, definido pelo mapeamento realizado nas imagens do produto MOD09 do sensor MODIS. A utilização do *buffer* deve-se a dois fatores, o primeiro é o fato da localização espacial do foco de queimada encontrar-se no ponto central do pixel e não no seu local de ocorrência, o segundo fator deve-se aos possíveis erros de localização do foco de calor devido às características gerais do sensor MODIS. Posteriormente, os focos de queimadas foram cruzados com a área delimitada pelo *buffer* de cada ano, a fim de obter como resultado os focos de calor que ocorreram apenas nas áreas mapeadas.

5.2.3 Uso do Modelo Linear de Mistura Espectral

Existe uma grande diversidade de alvos na composição de cada pixel, em que o valor digital possui informações sobre a proporção da mistura entre cada componente (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; TEIXEIRA, 2004). Portanto, uma das técnicas utilizadas para identificar esses alvos consiste do uso do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME), que representa a mistura espectral dos alvos em cada pixel, porém é importante conhecer a resposta de cada um dos componentes puros que o compõem.

Assim, ao avaliar uma queimada, por exemplo, os *pixels* puros (*endmembers*) a serem utilizados como dados de entrada são selecionados diretamente na imagem a partir de *pixels* que tenham assinatura espectral mais próxima da curva teórica esperada para alvos puros. Os *endmembers* referem-se às imagens fração solo, sombra e vegetação, conforme **Equação 1**.

$$\rho_i = a*\text{vegi} + b*\text{soloi} + c*\text{sombrai} + e_i \quad (1)$$

em que:

a = proporção da vegetação;

b = proporção de solo;

c = proporção de sombra ou água;

vegi = resposta espectral do componente vegetação na banda i;

soloi = resposta espectral do componente solo na banda i;

sombrai = resposta espectral da componente sombra na banda i;

e_i = erro na banda i;

i = a banda do sensor.

Para as imagens MODIS foi utilizado o modelo de mistura com a componente sombra, visto que realça os alvos que possuem alta absorção e baixa refletância representados pelas áreas queimadas, reduzindo, desta forma, o volume de dados analisados já que as queimadas possuem resposta espectral semelhante à água. O componente puro modela a imagem, fazendo com que as proporções de cada componente sejam estimadas, como pode ser visto na **Figura 2**.

A extração dos *endmembers* foi realizada no programa ENVI e, em seguida, o MLME foi utilizado a partir de um *script* criado no *Interactive Data Language* (IDL), e aplicado nas 600 imagens MODIS adquiridas, reutilizando os mesmos *endmembers* coletados.

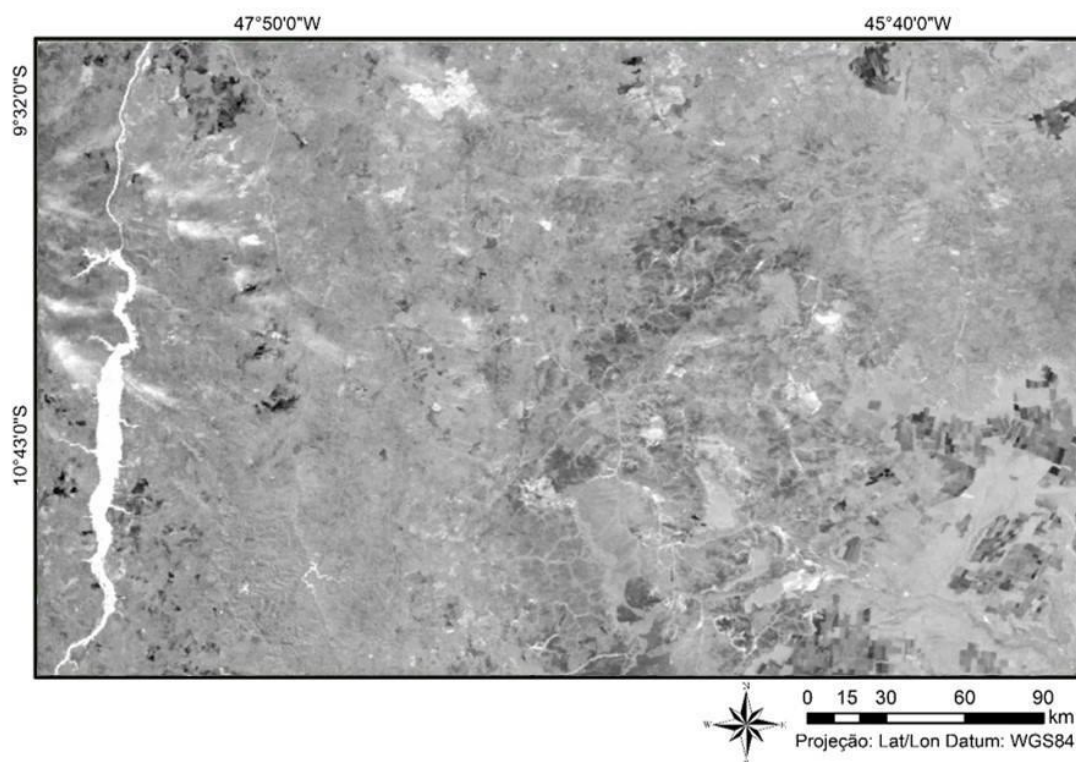


Figura 2: Exemplo do Modelo Linear de Mistura Espectral na fração sombra, aplicado a uma imagem MODIS. Destaca-se as áreas em tons mais claros, referentes à corpos hídricos, sombras e queimadas.

5.2.4. Mapeamento das Áreas Queimadas nas Imagens do Sensor MODIS

Após a aplicação do MLME, todas as imagens fração sombra resultantes foram inseridas no programa SPRING 5.3. Devido à grande presença de nuvens e/ou faixas pretas presentes em algumas imagens adquiridas, foi feita uma seleção manual e utilizadas apenas imagens que possuíam nitidez para o mapeamento. Os próximos procedimentos foram os mesmos realizados nas imagens OLI e LISS III, primeiramente

foi realizada a segmentação das imagens fração sombra, exemplo mostrado na **figura 3**, onde os limiares utilizados foram 0.1 para a similaridade e 1.4 para a área.

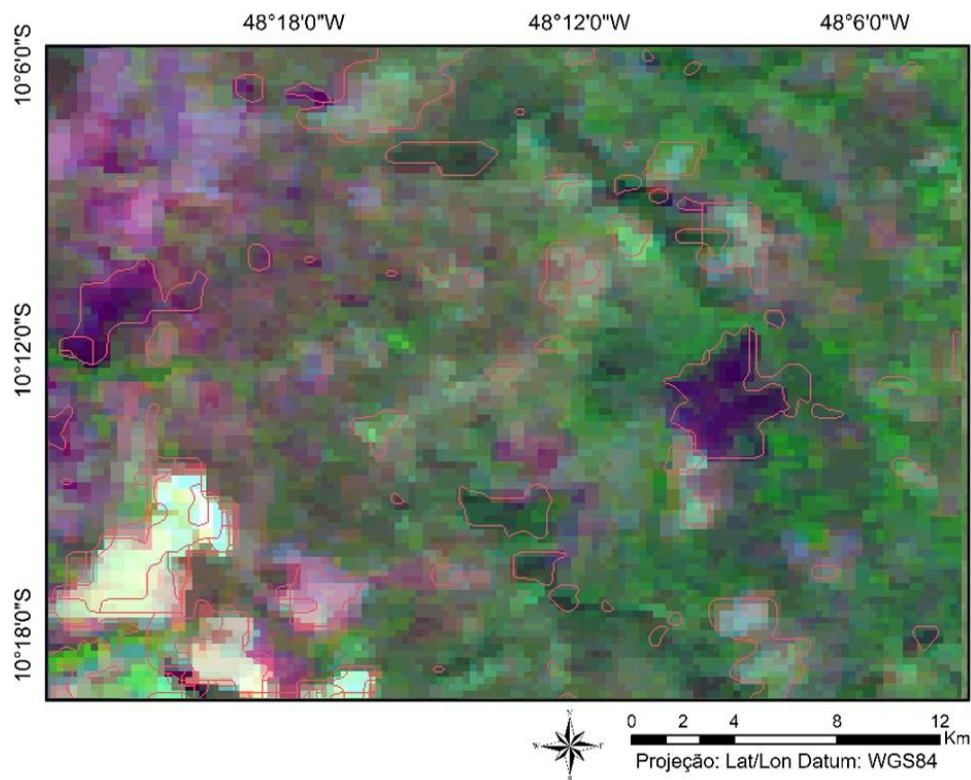


Figura 3: Exemplo em uma imagem MODIS após o processo de segmentação. Em linhas vermelhas os polígonos originados no processo, composição 1B2G6R.

Após a etapa de segmentação das imagens correspondentes às datas selecionadas, realizou-se a edição topológica, na qual foram classificados os polígonos das áreas queimadas às suas respectivas classes, conforme **figura 4**. Em todas as imagens do sensor MODIS a composição colorida utilizada foi 1B2G6R, pois permite a melhor visualização das cicatrizes de queimadas. A última etapa consistiu na edição manual do mapeamento de áreas queimadas com a finalidade de corrigir eventuais erros de classificação.

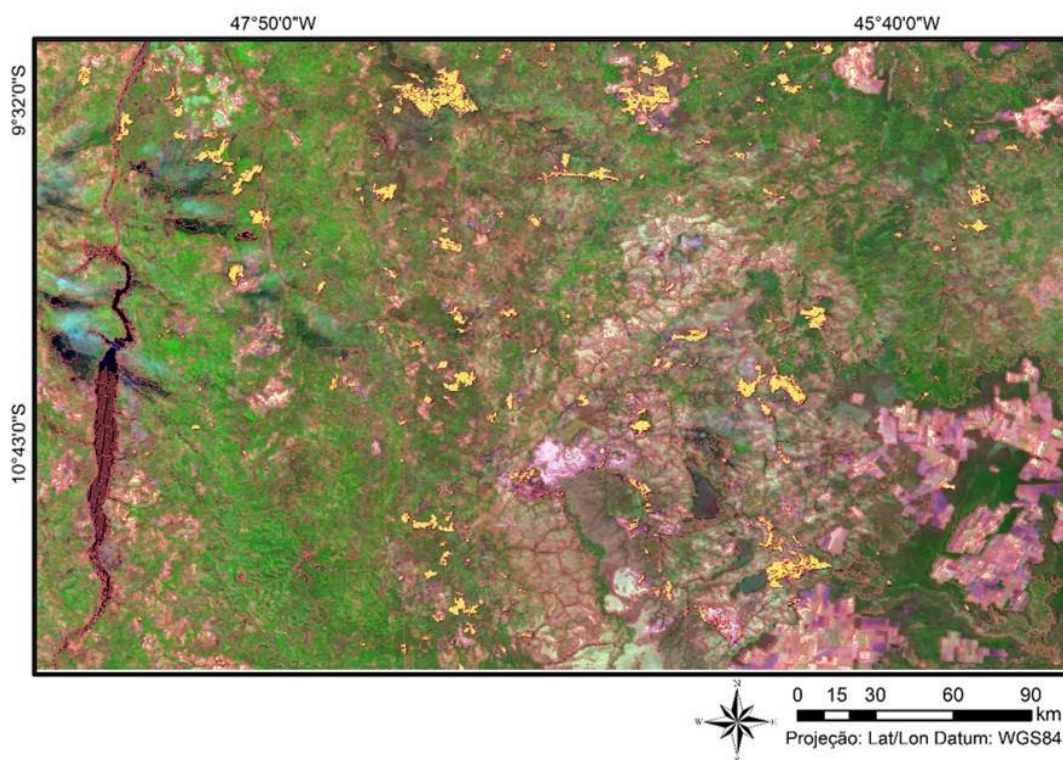


Figura 4: Exemplo de mapeamento de áreas queimadas (em amarelo) após processo de segmentação em uma imagem MODIS.

5.2.5. Análise dos dados TRMM

Os dados de precipitação do TRMM 3B43 foram adquiridos através do endereço eletrônico da *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GESDISC/NASA, disponibilizados em: <https://mirador.gsfc.nasa.gov>). Depois de obtidos, os dados de médias mensais foram gerados no programa GrADS. Para o cálculo da extração das anomalias climatológicas, a precipitação mensal dos anos analisados para a área estudada foi somada e comparada com as médias da precipitação dos anos de 2010 a 2015, sendo utilizado o *software* GrADS para a geração dos dados.

5.2.6. Análise da frequência e do tamanho das áreas queimadas

Para elaboração do mapa da frequência, que indica a quantidade de queimadas no mesmo local durante os anos de 2012 a 2015, foi utilizado o aplicativo SPRING 5.3,

desta forma, a sobreposição das áreas queimadas para os quatro anos analisados foi obtida a partir de linhas de comando originadas no algoritmo Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL).

Para a geração dos histogramas de frequência do tamanho dos polígonos de queimadas, utilizou-se o aplicativo ArcGIS. Neste, os polígonos de queimadas dos anos de 2012 a 2015 foram convertidos para hectares e os gráficos com os resultados foram originados no programa Excel.

5.2.7. Análise das áreas queimadas com os dados auxiliares

Para determinar e espacializar as áreas queimadas nas Unidades de Conservação e nos municípios presentes na área de estudo nos anos de 2012 a 2015, utilizou-se o ArcGIS 10.1. Neste, importou-se o shapefile das UCs fornecido pelo MMA e o dos municípios fornecido pelo IBGE (recortados para o limite da área de estudo). Por fim, realizou-se cruzamento entre as áreas queimadas mapeadas do sensor MODIS nos anos de 2012 a 2015 com os shapefiles das UCs e dos municípios a partir do processo denominado *Joint* para a geração dos resultados.

As áreas queimadas também foram analisadas em conjunto com o uso e cobertura da terra atual. Para isso, no aplicativo ArcGIS adicionou-se o mapa de uso e cobertura da terra adquirido do produto MCD12Q1, sendo originado o recorte do mapa para limite da área de estudo. Posteriormente realizou-se a tabulação cruzada entre o mapa de uso e cobertura da terra com suas respectivas classes com os polígonos das áreas de queimadas para todos os anos. Por fim, foi calculada a porcentagem de área queimada que ocorreu em cada classe de uso.

5.2.8. Validação das Áreas Queimadas

Após o término da classificação de todas as imagens do banco de dados foi feita a validação do mapeamento das áreas queimadas nas imagens MODIS a partir do mapeamento das áreas queimadas em imagens referência, compostas pelos sensores LISS III e OLI que apresentam melhor resolução espacial.

Como já referido anteriormente, existe uma diferença na resolução espacial entre os produtos, originando um deslocamento geográfico entre os mapas, por esse motivo os cálculos foram realizados não considerando a forma, o posicionamento e a intersecção das áreas queimadas, mas sim a estimativa da área queimada. Cabe salientar que a comparação entre os polígonos foi realizada para datas iguais de ambos os produtos.

Nesse sentido, criou-se uma grade de 5 km x 5 km para correlacionar as áreas queimadas estimadas pelos produtos, demonstrado na **figura 5**. As classificações das áreas queimadas nas imagens OLI, LISS III e MODIS foram convertidas para ASCII, e assim obteve-se informações sobre a latitude, longitude do polígono central e sua respectiva área em hectares. Após esse procedimento, a próxima etapa consistiu na aplicação de um algoritmo, com o objetivo de percorrer a grade e somar todas as áreas inclusas dentro desta célula, calculada pela **equação 2**:

$$GRID_{(lon,lat,QLR,QM)} = \sum_{a=-\alpha}^{\alpha} \sum_{b=-\beta}^{\beta} \left((\chi(a,b) * QLR(lon+a, lat+b)) \cap (\chi(a,b) * QM(lon+a, lat+b)) \right) \quad (2)$$

Na equação 2, $X(a,b)$ representa uma máscara de convolução de tamanho $M \times N$ (linhas e colunas); QLR representa a área queimada estimada pelos sensores OLI e LISS-III; QM representa a área queimada estimada pelo sensor MODIS; e GRID é a grade resultante definida para todos os pontos em que a máscara de tamanho $M \times N$ sobrepõe inteiramente a imagem ($lon \in [\alpha, M - \alpha]$, $lat \in [\beta, N - \beta]$) (CARDOZO, 2014).

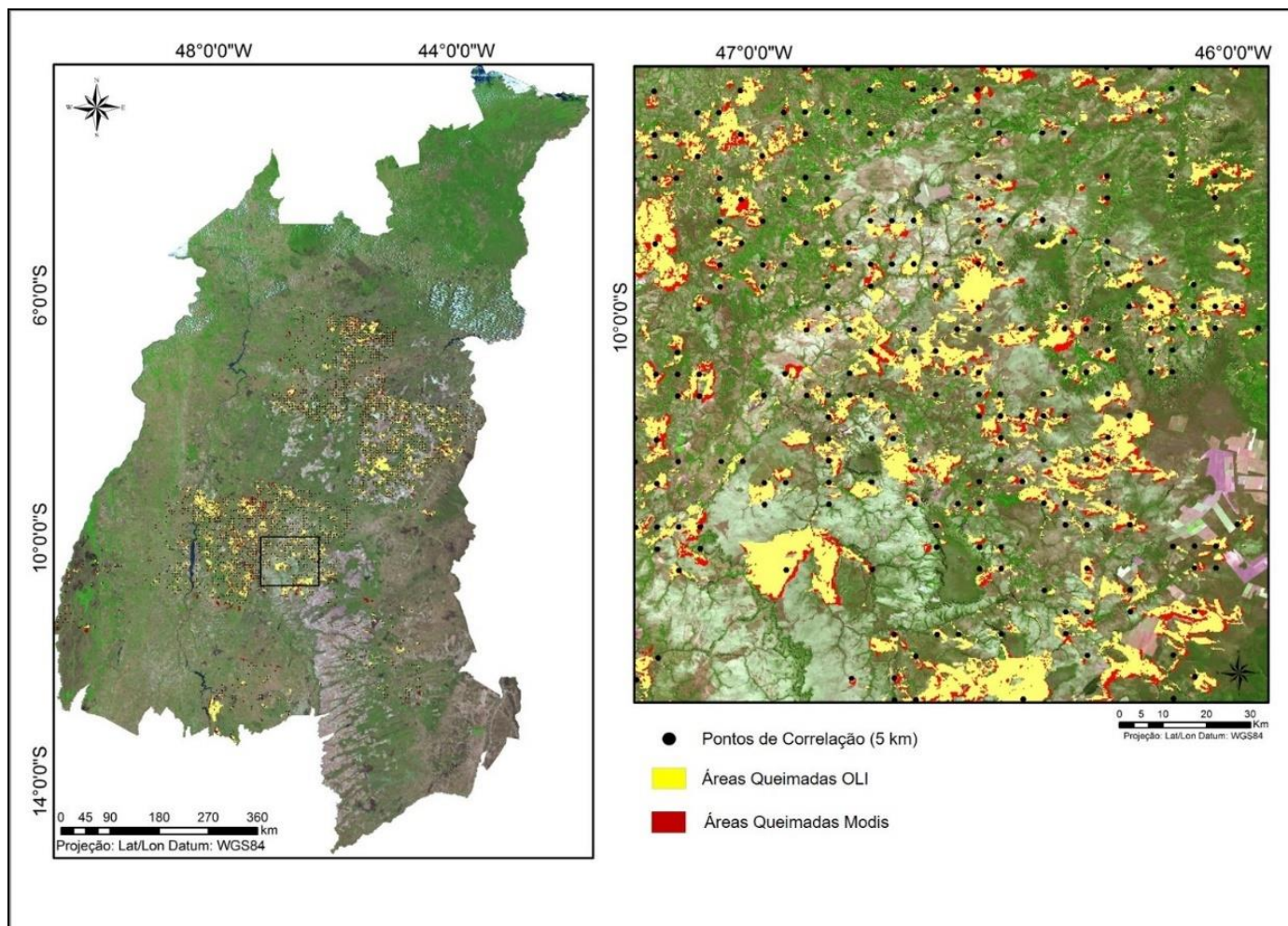


Figura 5: Pontos de correlação (em preto) gerados a partir de uma grade com células de 5 km x 5 km utilizada para estimar a correlação entre os produtos. Em vermelho os mapeamentos das áreas queimadas em imagens MODIS e em amarelo os mapeamentos das áreas queimadas nas imagens dos sensores LISS-III e OLI. Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R. À esquerda está representado todos os mapeamentos realizados nas imagens MODIS, OLI e LISS-III, à direita refere-se ao resultado realizado na órbita/ponto 221/67 do sensor OLI e do sensor MODIS para o ano de 2015.

Para obter um resultado mais preciso dos dados de validação, foi realizada uma análise estatística com a finalidade de identificar *outliers*. Um *outlier* é definido como um conjunto de dados que se constitui de uma observação que parece ser inconsistente com o conjunto de dados remanescentes (BARNETT; LEWIS, 1995). Nesse sentido, realizou-se o cálculo de resíduo normalizado que consiste em detectar os *outliers*, assim os resíduos que se encontravam fora do intervalo de (-2,2) foram analisados e quando considerados um *outliers* foram excluídos da análise.

Após finalização de todas as etapas realizou-se uma regressão linear, pelo fato de não existir uma relação de dependência entre as variáveis. As áreas queimadas mapeadas das imagens do sensor LISS III para o ano de 2012 e do sensor OLI para os anos de 2013, 2014 e 2015 foram escolhidas como variáveis explicativas e as áreas queimadas mapeadas em imagens do sensor MODIS foram escolhidas como variáveis dependentes. Os resultados das regressões lineares foram significativos ao nível $p < 0,05$ do teste T-Student.

5.2.9. Trabalho de Campo

Devido à necessidade de assegurar a confiabilidade do mapeamento das áreas queimadas realizado nas imagens dos sensores LISS III e OLI, que foram empregados como referência na validação dos mapeamentos das áreas queimadas nas imagens do sensor MODIS, foi realizado um trabalho de campo em alguns municípios dos Estados do Tocantins, Bahia e Piauí que estão inseridos na área de estudo. Nesse sentido, coletou-se através do *Global Positioning System* (GPS), a localização geográfica das áreas queimadas na região visitada. Para a coleta dos pontos utilizou-se o GPSMAP-64S que possui antena de alta sensibilidade e com boa precisão à sua posição, cerca de 3,65m (12 pés), mantendo a sua localização mesmo em florestas densas ou em vales profundos (GARMIN, 2013). Posteriormente realizou-se a validação do mapeamento nas imagens do sensor OLI, para datas iguais aos dias do trabalho de campo.

O trabalho de campo foi realizado nos dias 15 a 22 de outubro de 2015, sendo percorrido um trajeto de aproximadamente 1.950 km. Durante o trajeto visitou-se os seguintes municípios: Palmas (TO); Porto Nacional (TO); Chapada da Natividade (TO);

Porto Alegre do Tocantins (TO); Dianópolis (TO); Novo Jardim (TO); Taguatinga (TO); Luís Eduardo Magalhães (BA); Barreiras (BA); Riachão das Neves (BA); Formosa do Rio Preto (BA); Corrente (PI); Galhã (TO); Mateiros (TO); São Felix do Tocantins (TO); Novo Acordo (TO); Rio do Sono (TO); Tocantínia (TO) e Lajeado (TO).

Na **figura 6** estão representados todos os pontos coletados com o GPS com a localização das áreas classificadas como queimadas ou dos focos ativos que foram observados durante o percurso do trabalho de campo. Cabe salientar que quando coletado um ponto referente a uma queimada era registrado também as características da mesma para se ter uma melhor referência no momento da validação, tais como: distância da rodovia principal, tamanho aparente, localizada a esquerda ou direita da estrada, tipo de vegetação queimada, foco ativo, cicatriz de queimada recente, cicatriz de queimada antiga, severidade da área queimada, vegetação regenerando, entre outros.

Durante o trajeto de campo foram coletados 114 pontos em áreas que apresentavam focos ou cicatrizes de queimadas. Após o campo foi realizado o mapeamento das áreas queimadas nas imagens do sensor OLI referente à área visitada, para as mesmas datas ou data próxima aos dias de campo. Finalizada essa etapa, verificou-se que apenas 5 pontos não coincidiram com o mapeamento, o que representa 96% de acurácia, sendo que dois pontos de queimadas identificadas no campo e não identificadas nas imagens OLI decorrem de áreas que apresentavam queimadas muito antigas, outros três pontos de queimadas não foram coincidentes devido a dois pontos terem sido coletados dentro da área urbana e um ponto de queimada ter ocorrido em área de Veredas com presença de áreas alagadas. Ambos os pontos podem ser identificados em campo, mas é difícil de ser identificado em imagens devido à mistura dos alvos. Nesse sentido, considera-se o mapeamento das cicatrizes de queimadas feitas por imagens do sensor OLI confiáveis para serem utilizadas com referência na validação do mapeamento das imagens MODIS.

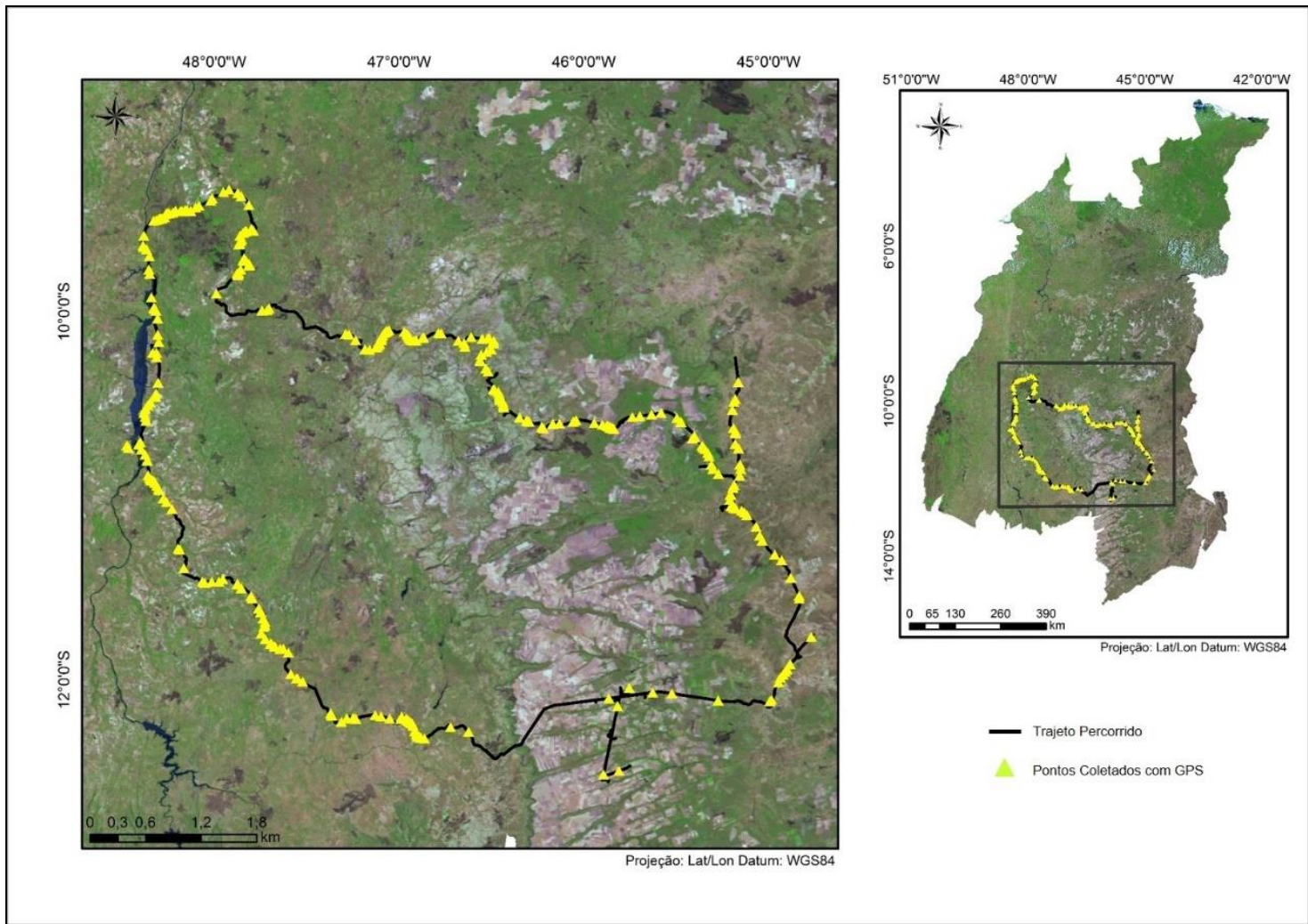


Figura 6: Trajeto realizado durante o trabalho de campo (em preto) e pontos coletados com o GPS onde possuíam cicatrizes de queimadas ou focos ativos (em amarelo). Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R.

Durante todo o percurso realizado foram observados diversos focos ativos em variadas fitofisionomias e regiões do bioma Cerrado. Na **figura 7**, nas fotografias (a) e (d) observa-se focos ativos de queimadas em vegetação seca, na foto 7 (a) ocorre um foco de queimada em uma vegetação de Campo Sujo, mas muito próxima à uma área de Cerrado e de Cerradão, na foto 7 (d) uma área de Campo Sujo estava sendo queimada. Ambos os pontos foram coletados no primeiro dia de campo (16/10/15) entre os municípios de Novo Jardim e Taguatinga no Tocantins.

Nas fotografias (b) e (c) da **figura 7** visualiza-se focos ativos em áreas de formação florestal densa, devido à dificuldade de chegar próximo às áreas queimadas não foi possível discriminar o tipo vegetacional. O foco de queimada visualizado na figura 7 (b) foi observado no segundo dia (17/10/15) de campo entre os municípios de Taguatinga (TO) e Barreiras (BA), já o ponto visualizado na figura 7 (c) foi no município de Formosa do Rio Preto (BA), quarto dia de campo (19/10/15). O Cerrado é um dos ecossistemas mais inflamáveis, pois possuem abundância de material combustível fino e seco e de fácil ignição concentrado próximo à superfície do solo, e essas características são intensificadas durante a estação seca do ano.



Figura 7: Focos de queimadas observados durante o trabalho de campo. Foco de queimada em vegetação de Campo Sujo, próxima à uma área de Cerrado e de Cerradão (a), focos ativos em áreas de formação florestal densa (b, c) e foco ativo de queimadas em área de Campo Sujo (d).

O fogo também é muito utilizado por proprietários de terras para a limpeza de seus terrenos, pois o fogo converte as árvores abatidas em cinzas ricas e nutrientes que são incorporados ao solo, e além de limpar o terreno do emaranhado de troncos e galhos derrubados, esse método é mais barato do que investir em máquinas pesadas para esse tipo de limpeza (NESPTAD et al., 1999). As fotografias (a) e (b) da **figura 8** apresentam áreas com solo exposto, todas as duas áreas localizam-se no município de Luiz Eduardo Magalhães (BA) e foram visitadas no segundo dia de campo (17/10/15), possivelmente essas áreas foram queimadas para eliminação dos troncos secos, foto 8 (a), e para limpeza do terreno, foto 8 (b).

As fotografias (c) e (d) da **figura 8** apresentam pontos coletados onde tinham ocorrido queimadas recentemente, aparentemente a vegetação na área queimada constituía-se de formação savânica, mas devido à alta severidade da queima não foi

possível ser distinguida, ambos os pontos foram coletados entre os municípios de Barreiras e Riachão das Neves na Bahia, durante o terceiro dia de campo (18/10/15).



Figura 8: Áreas visitadas durante os dias de campo. Área com solo exposto e de troncos secos (a), área de pastagem abandonada (b) e áreas de cerrado e cerrado denso recentemente queimadas (c, d).

A **figura 9**, visualiza-se fotografias de vegetação queimada próximo a áreas agrícolas, na foto 9 (a) visualiza-se uma vegetação totalmente consumida (lado direito da estrada) e uma área agrícola (lado esquerdo da estrada), esse ponto foi coletado no município de Formosa do Rio Preto (BA), quarto dia de campo (19/10/15). A foto 9 (b) localiza-se no município de Novo Acordo (TO), visitada no sexto dia de campo (21/10/15), visualiza-se uma pequena área queimada ao lado de uma área de pastagem. A fotografia na figura 9 (c) também apresenta uma vegetação consumida por uma queimada do lado esquerdo da estrada e uma área agrícola do lado direito da estrada, localizada no município de Luiz Eduardo Magalhaes (BA). A última fotografia, 9 (d), apresenta um ponto coletado de uma vegetação de Cerrado *stricto sensu* que foi

parcialmente queimada, localizado no município de São Felix do Tocantins (TO), visitada no quinto dia de campo (20/10/15).



Figura 9: Cicatrizes de queimadas próximas a área agrícola visualizadas durante o trabalho de campo. Vegetação totalmente queimada à direita e área agrícola à esquerda (a), área queimada ao lado de uma área de pastagem (b), vegetação completamente queimada à esquerda e área agrícola à direita (c) e área de Cerrado *stricto sensu* parcialmente queimada (d).

Infere-se que as queimadas intencionais podem, também, escaparem ao controle e invadirem propriedades ou ecossistemas vizinhos e acarretarem em grandes prejuízos para os produtores rurais e para o meio ambiente local. O fogo pode aniquilar a vegetação nativa, cercas e até plantações não desejadas. Por esse motivo deve-se investir na prevenção das queimadas, como, por exemplo, na construção de aceiros ao redor das áreas a serem queimadas ou ao redor das pastagens, das lavouras e das florestas que precisam ser protegidas do fogo (NESPTAD et al., 1999).

6. RESULTADOS

6.1. Validação dos mapeamentos nas imagens MODIS

A seguir serão apresentados os resultados da validação do mapeamento das cicatrizes de queimadas do sensor MODIS referente aos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015 para área de estudo. Os resultados estão divididos em oito gráficos (**figura 10**) de regressão linear a partir de duas variáveis, onde o eixo Y refere-se os valores obtidos dos mapeamentos dos sensores LISS-III para o ano de 2012 e OLI para os anos de 2013, 2014 e 2015 e o eixo X refere-se aos valores obtidos dos mapeamentos do sensor MODIS para os quatro anos. O coeficiente de determinação (R^2) indica quanto da variação total é comum aos elementos que constituem as duas variáveis, sendo possível notar que o R^2 varia de acordo com os diferentes padrões das áreas que foram queimadas.

Ao fazer uma análise dos gráficos, infere-se que os menores valores de R^2 variam entre 0,68 a 0,78, já os maiores valores de R^2 variam entre 0,91 a 0,93, apresentando uma média de 0,82 (**figura 11**). Para todas as cenas dos quatro anos de análise a regressão foi significativa a $p < 0,05$, para o teste T *Student*.

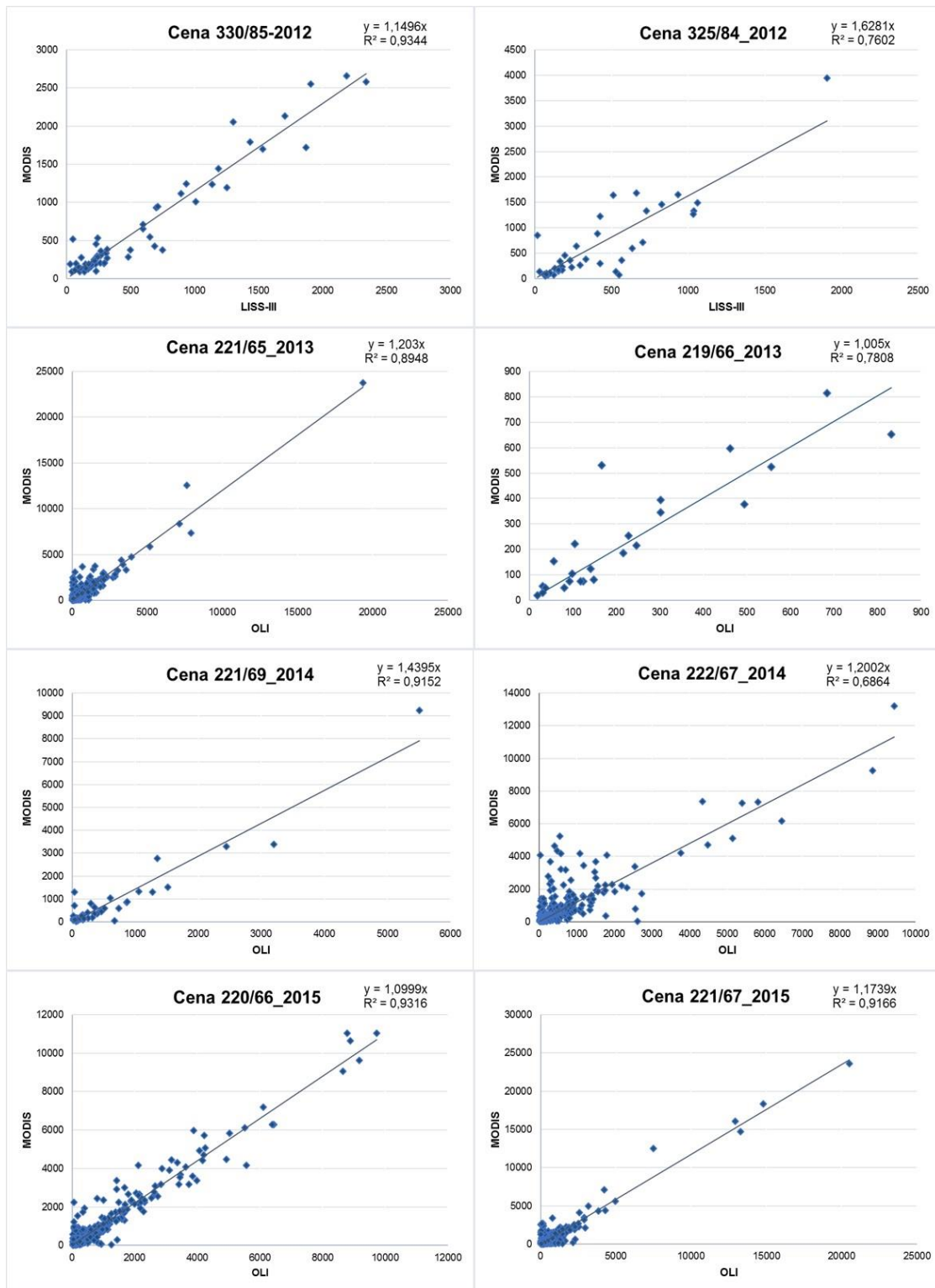


Figura 10: Gráficos da validação dos mapeamentos das áreas queimadas na área de estudo para as cenas 330/85 (2012), 325/84 (2012), 221/65 (2013), 219/66 (2013), 221/69 (2014), 222/67 (2014), 220/66 (2015) e 221/67 (2015).

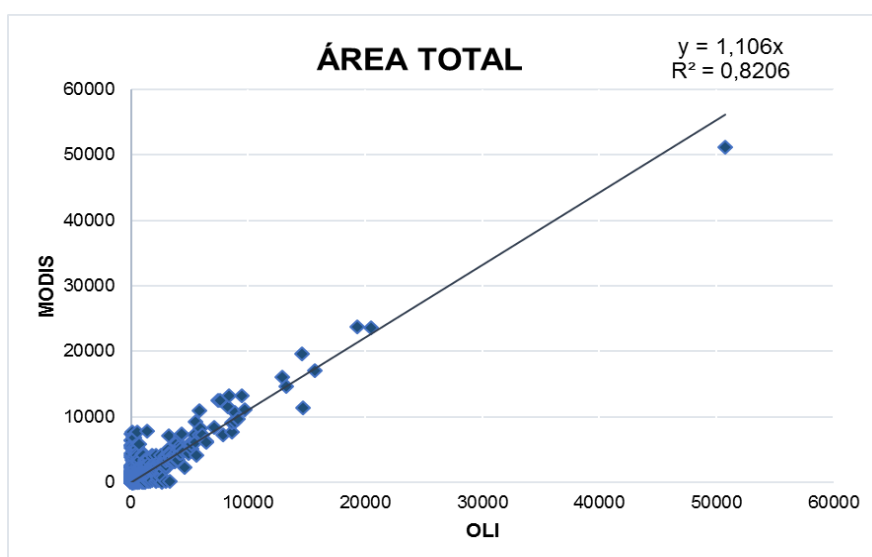


Figura 11: Gráfico da validação total dos mapeamentos das áreas queimadas na área de estudo.

As análises das validações dos mapeamentos das queimadas na área de estudo foram separadas e especificadas com base nos resultados obtidos para os três sensores, apresentados nas **figuras 12, 13, 14, 15 e 16**, assim como a imagem do mapeamento das áreas queimadas do sensor OLI ou LISS-III e do sensor MODIS e os gráficos diagramas de espalhamento para estimativas dos dois produtos. Cabe ressaltar que na análise estatística as queimadas que possuíam tamanhos pequenos, não detectadas pelo sensor MODIS devido a sua resolução espacial, foram excluídas da validação.

Apenas os resultados referentes à cena 222/67 do ano de 2014 apresentou coeficientes de correlação menor que 0,70 entre os resultados obtidos (**figura 12**). As datas adquiridas desta cena foram: 05/06, 21/06, 07/07, 23/07, 08/08, 24/08, 09/09 e 11/10. Nesta cena, nota-se presença de áreas queimadas com grande variabilidade em relação ao tamanho, uma vez que ocorrem tanto cicatrizes de queimadas pequenas, menores que 0,5 km², quanto cicatrizes grandes, maiores que 3 km². Nesta cena o sensor MODIS superestimou 30% de queimadas em relação ao sensor OLI, esse fato pode ser explicado por diversos fatores, como a diferença de resolução espacial do sensor MODIS (250 m) e do sensor OLI (30 m), que ocasiona o mapeamento de pequenas cicatrizes próximas como uma única cicatriz no MODIS. Exemplo que pode ser visualizado na cena 222/67, porção sudeste da imagem (**figura 12**), na, na qual

queimadas pequenas, porém próximas, foram agrupadas em uma única queimada no sensor MODIS.

Outro fato deve-se às características climáticas da região, na estação seca do ano quando há ocorrências de chuvas algumas áreas do Cerrado permanecem alagadas durante um período de tempo, principalmente áreas próximas às veredas, açudes, lagos e rios, porém após outro período de estiagem essas áreas voltam a secar. Neste sentido, infere-se que em áreas de Cerrado, as cicatrizes de queimadas possuem baixa refletância, podendo assim ocorrer a mistura de alvos entre as áreas queimadas e solos úmidos que também possuem baixa refletância. O último fator deve-se à presença de solos escuros, principalmente quando esses estão sendo preparados para a agricultura, podendo ser confundidos com cicatrizes de queimadas.

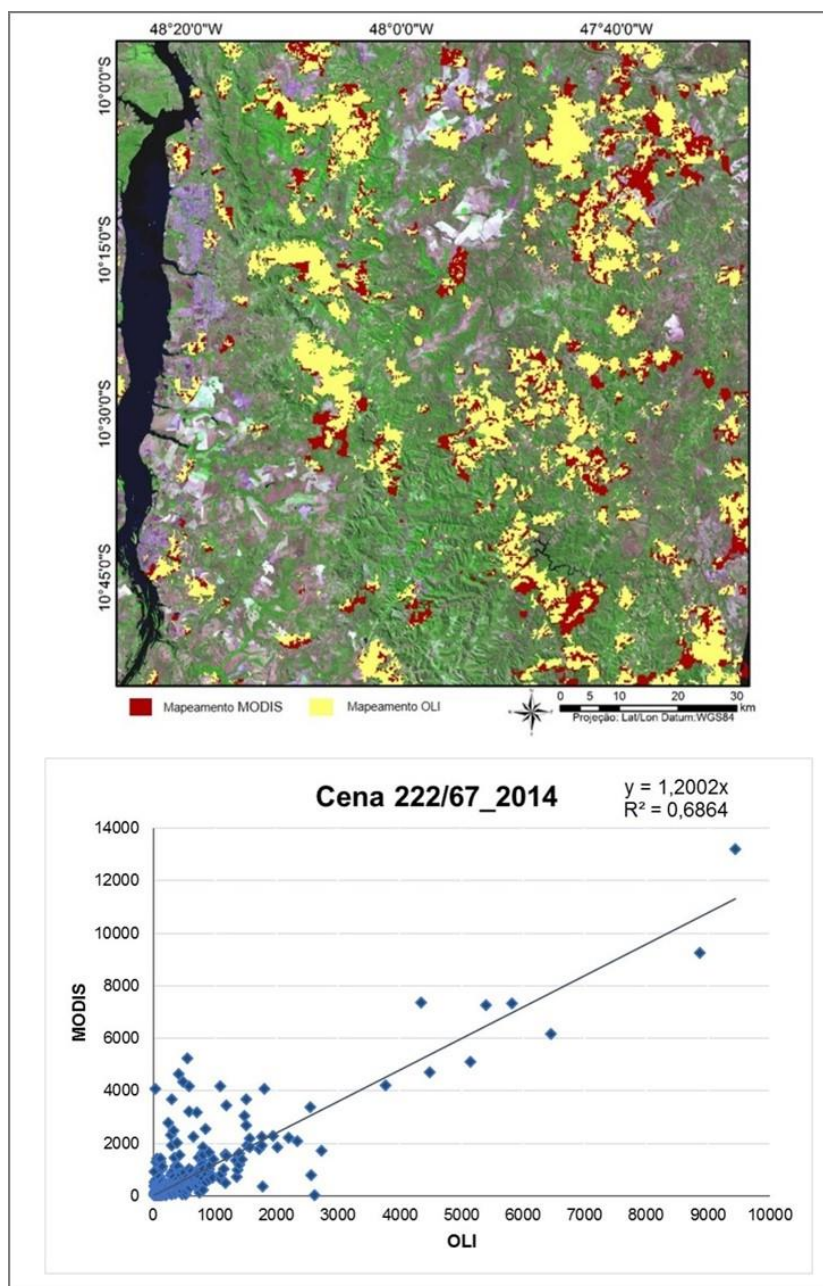


Figura 12: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com menor coeficiente de correlação, cena 222/67(2014).

Os resultados que apresentaram coeficientes de correlação maior que 0,70 e menor que 0,80 foram as cenas 325/84 do ano de 2012 e 219/66 do ano de 2013 (**figura 13**). As datas adquiridas da cena 325/84 referentes ao sensor LISS-III são dos dias 20/06, 14/07 e 07/08. As datas adquiridas da cena 219/66 referentes ao sensor OLI foram 31/07, 16/08, 01/09, 17/09 e 03/10. Em ambas as cenas verifica-se a presença de

poucas cicatrizes de queimadas e principalmente de tamanhos pequenos, menores que 1 km², esse fato pode ser justificável pela presença de Unidades de Conservação na região analisada.

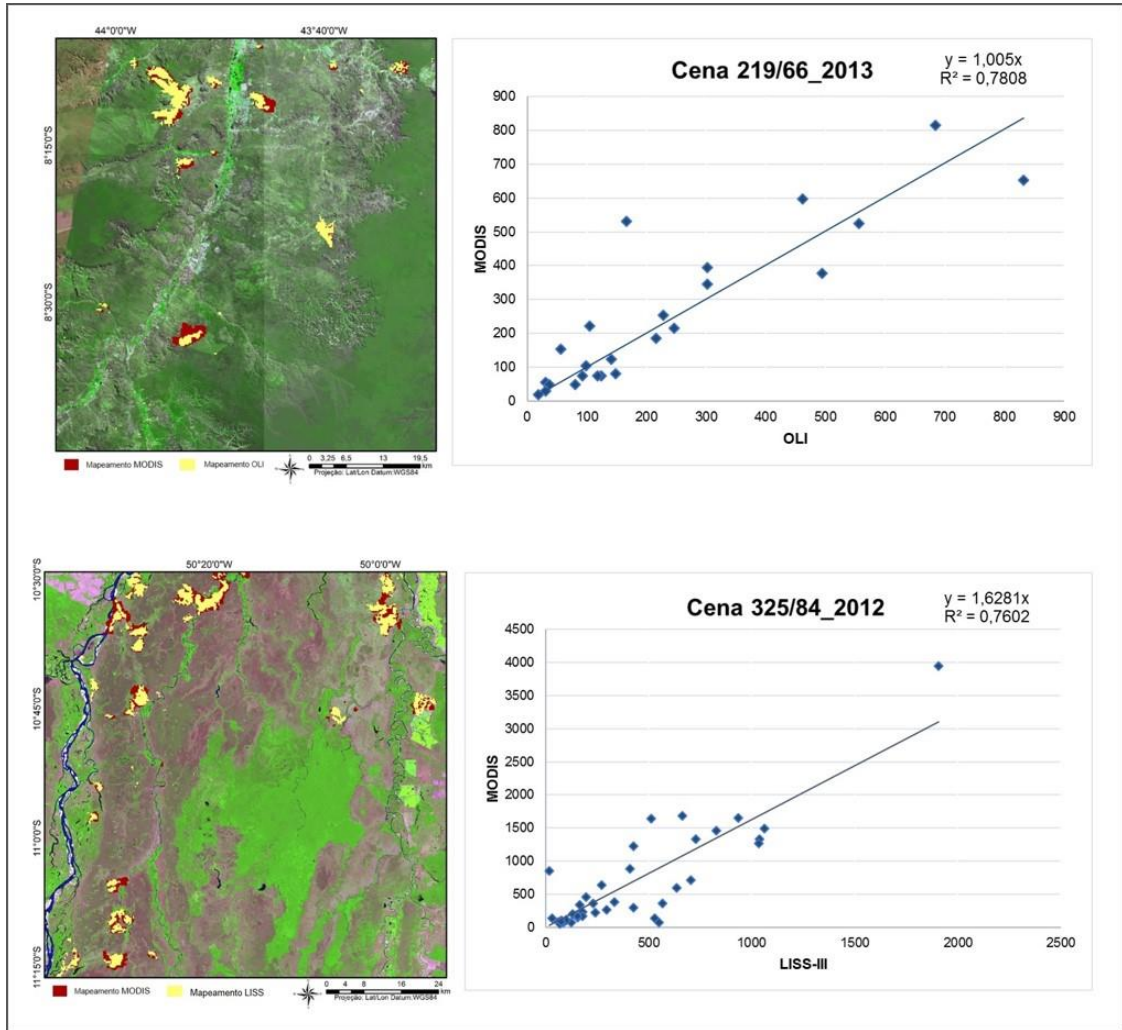


Figura 13: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficientes de correlação entre 0,7 e 0,8, cenas 219/66 (2013) e 325/84 (2012).

Nos resultados referentes à cena 325/84 ocorreu uma superestimativa das áreas queimadas em 28% por parte do sensor MODIS em relação ao sensor de referência LISS-III. Esse fato pode ser explicado devido à grande presença de áreas alagadas e de solos escuros, como pode ser visualizado na porção centro-norte da imagem. Na cena 219/66 o sensor MODIS superestimou 7% das áreas queimadas em relação ao sensor

OLI. A cena que obteve um coeficiente de correlação maior que 0,8 e menor que 0,9 refere-se à órbita/ponto 221/65 do ano de 2013 (**figura 14**), as datas adquiridas desta cena foram dos dias 27/06, 13/07, 29/07, 14/08, 30/08 e 15/09. Nota-se uma grande presença de cicatrizes de queimadas em toda a cena, a maioria das cicatrizes possuem tamanhos menores que 5 km². Nesta cena o sensor MODIS superestimou em 12% as áreas queimadas em relação ao mapeamento do sensor OLI. O principal motivo dessa superestimativa foi o agrupamento de pequenas cicatrizes como uma única área queimada devido à resolução espacial moderada do sensor MODIS.

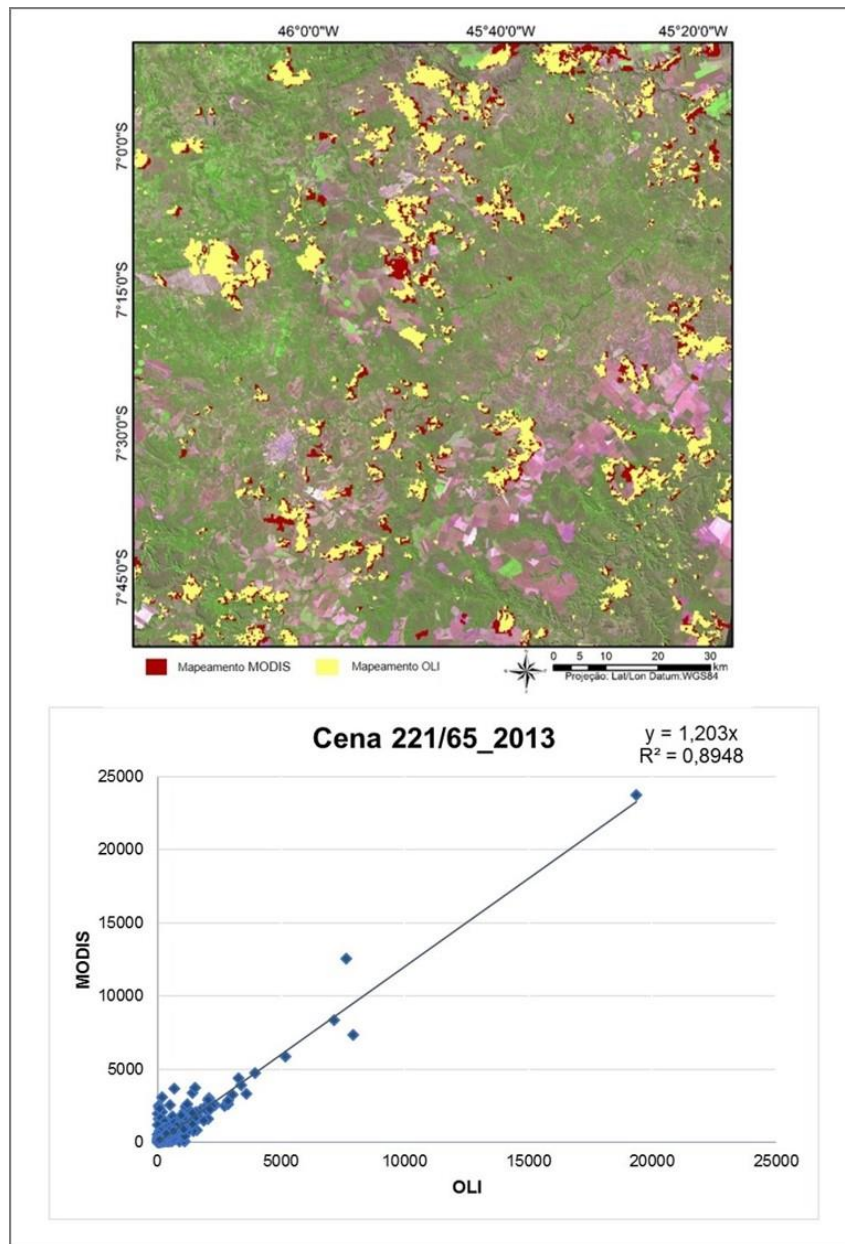


Figura 14: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficiente de correlação 0,89, cena 221/65 (2013).

A próxima **figura 15** apresenta duas cenas que obtiveram uma boa concordância entre os mapeamentos, com correlação de 0,91. Para a cena 221/69 do ano de 2014 foram adquiridas quatro imagens, dos dias 30/06, 17/08, 02/09 e 18/09, nesta cena observa-se a presença de poucas cicatrizes, a maioria das cicatrizes possuem tamanhos menores que 1 km². Para a cena 221/67 do ano de 2015 também referente ao sensor OLI

foram adquiridas cinco imagens, dos dias 01/06, 03/07, 19/07, 04/08, 20/08 e 05/09, observa-se que nesta cena há grande quantidade de queimadas, e ocorrem tanto cicatrizes de queimadas com tamanhos pequenos quanto cicatrizes com tamanhos grandes, mas a maioria não ultrapassa os 5 km². Em ambas as cenas o sensor MODIS superestimou 11% de área queimada em relação ao OLI, sensor de referência.

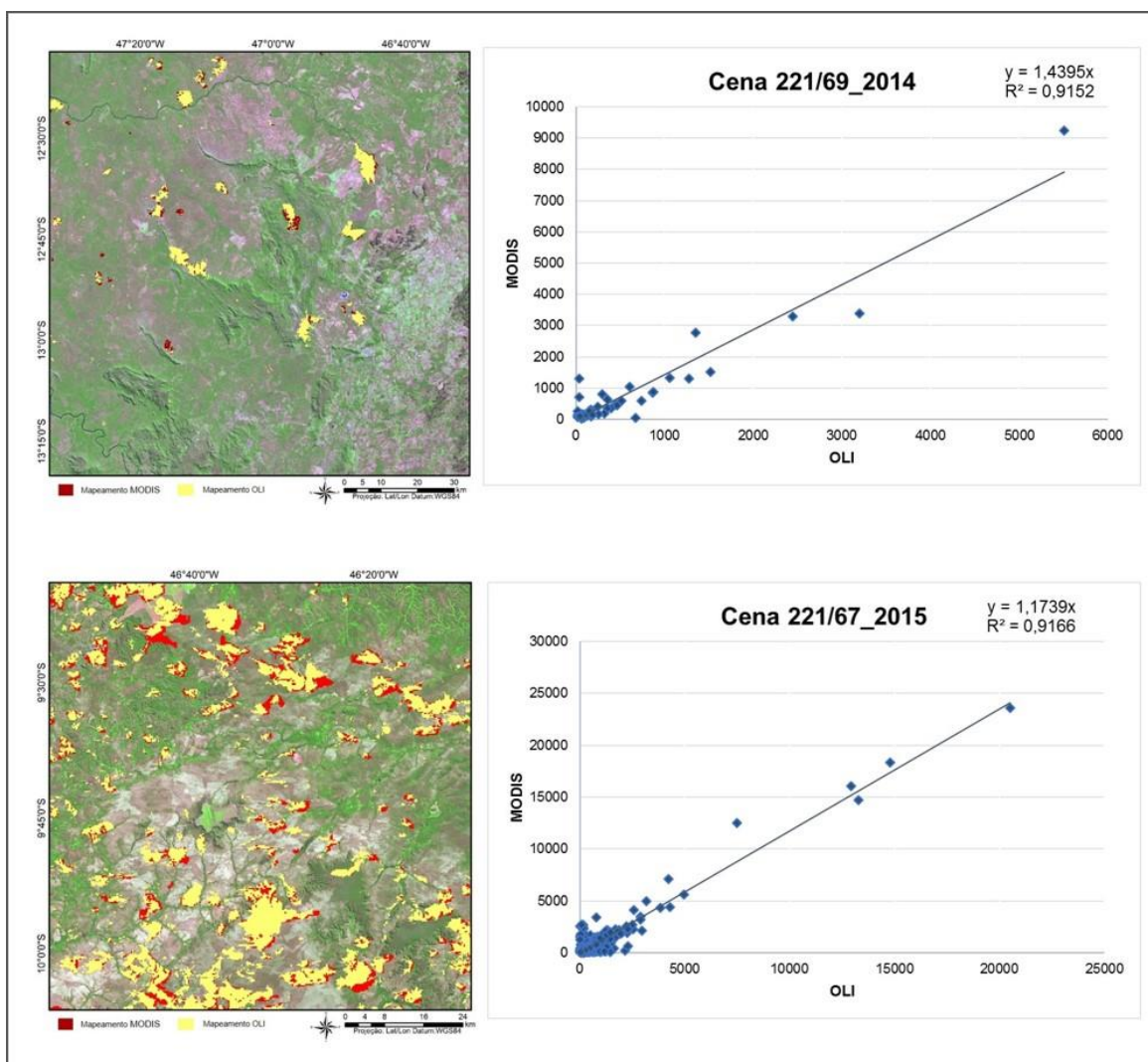


Figura 15: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com coeficiente de correlação 0,91, cenas 221/69 (2014) e 221/67 (2015).

Na **figura 16** estão representadas as duas cenas que obtiveram melhores coeficientes de correlação (0,93), em relação aos resultados obtidos para ambos os

sensores. Para a cena 220/66 do ano de 2015 referente ao sensor OLI foram adquiridas datas dos dias 12/07, 28/07, 13/08, 29/08, 30/09 e 16/10. Para a cena 330/85 do ano de 2012 referente ao sensor LISS-III foram adquiridas datas dos dias 21/06, 15/07 e 08/08.

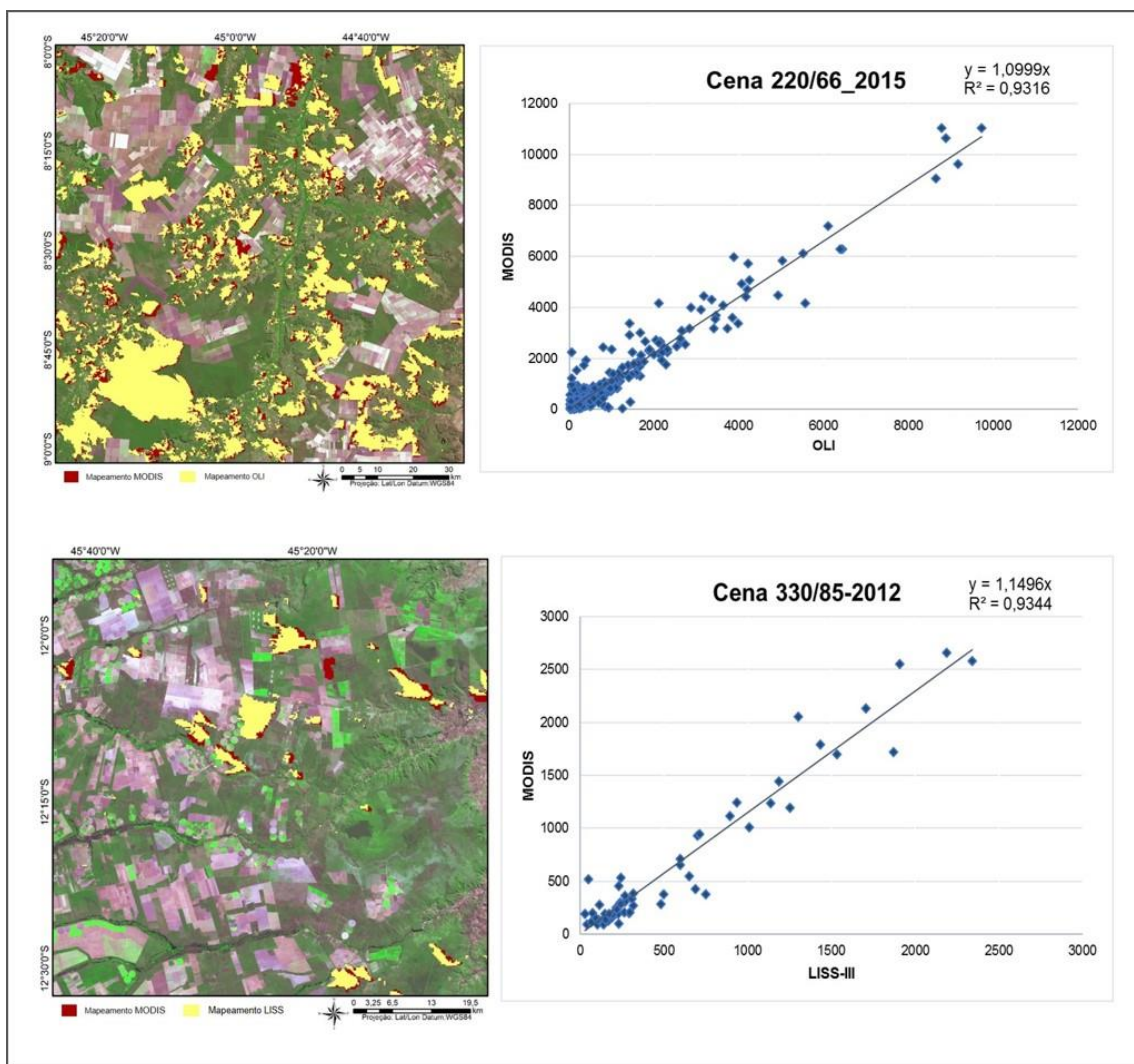


Figura 16: Resultado da validação dos mapeamentos das áreas queimadas com maiores coeficientes de correlação, 0,93, cenas 220/66 (2015) e 330/85 (2012).

Nota-se que na cena 220/66 possui grande quantidade de áreas queimadas, sendo que as cicatrizes possuem tamanhos variados, ocorrendo tanto cicatrizes pequenas, menores que 1 km^2 e cicatrizes grandes, maiores que 2 km^2 . Nesta cena o sensor MODIS superestimou 9% das áreas queimadas em relação ao sensor OLI, tal fato decorre da presença de solos escuros que podem ser confundidos com as cicatrizes

de queimadas e do agrupamento das pequenas queimadas em uma única queimada no sensor MODIS.

Na última cena analisada, referente ao sensor LISS-III que possui órbita/ponto 330/85 do ano de 2012, nota-se a ocorrência de poucas queimadas, principalmente com cicatrizes de tamanhos pequenos, menores que 1 km². No que se refere ao mapeamento das áreas queimadas o sensor MODIS superestimou 12% em relação ao LISS-III, sensor de referência. Essa superestimativa decorre, principalmente, da presença de solos escuros na região devido ao preparo deste para a agricultura, podendo assim, serem confundidos com as cicatrizes de queimadas.

Após análise estatística dos resultados do mapeamento das áreas queimadas obtidos através dos três sensores selecionados para a validação, nota-se que em todos os casos o sensor MODIS apresentou uma superestimativa de área queimada em relação aos outros sensores, em média 18%. Como referido anteriormente, a superestimativa decorre principalmente de três fatores. O primeiro caso, que ocorre com maior frequência, é devido à presença de pequenas cicatrizes de queimadas próximas umas das outras, fazendo com que o sensor MODIS, por conta da sua resolução espacial, agrupe todas as queimadas que estão próximas em uma única queimada. O segundo fator deve-se a ocorrência de solos escuros na região que acabam sendo confundidos com cicatrizes de queimadas. O último caso decorre da presença de solos úmidos, principalmente próximos às áreas de vereda, açude e rios, podendo ser confundíveis com áreas de queimadas.

Entretanto, mesmo o sensor MODIS apresentando superestimativas em algumas áreas, os resultados apresentaram, de maneira geral, um bom coeficiente de correlação entre os mapeamentos de ambos os sensores, tornando a classificação das cicatrizes de queimadas nas imagens MODIS confiáveis (significantes a $p < 0,05$, teste T *Student*).

6.2. Análise Espacial das Queimadas

A **figura 17** mostra o resultado do mapeamento das cicatrizes de queimadas que ocorreram na área de estudo para o período de quatro anos, compreendido entre 2012 a 2015. As imagens utilizadas foram adquiridas do MODIS, com periodicidade diária, no entanto devido à grande presença de nuvens e/ou defeitos de imageamento foi feita uma seleção e utilizadas apenas as imagens que possuíam nitidez para o mapeamento.

Como demonstrado na **figura 17**, evidencia-se que as queimadas, espacialmente, possuem grande variabilidade, ocorrendo em todas as regiões da área estudada, embora ocorram com maior frequência em algumas áreas. Observa-se que no ano de 2012 as queimadas ocorrem com maior frequência na porção sudeste, sudoeste, nordeste e na porção central da área estudada. Nos anos de 2013 e 2014 as queimadas foram mais frequentes, principalmente na porção sudoeste e na porção central da área de estudo, e no ano de 2015 as regiões que tiveram maior frequência de queimadas foram a sudoeste, nordeste e a porção central da área de estudo.

Em relação à área total anual queimada, os números mais expressivos são para os anos de 2012 e 2015. Cabe ressaltar que a área de estudo possui 731.735 km² de extensão. Assim, para o ano de 2012 a área queimada totalizou 115.768 km², compreendendo 15,8% de toda a área. Para 2013, ano de menor ocorrência de queimadas, a área queimada foi de 52.151 km², abrangendo 7,1% da área total. Em 2014 foram mapeados 74.688 km² de área queimada, que representa 10,2% de toda área. No ano de 2015 a área queimada foi de 93.300 km², compreendendo 12,7% do total da área de estudo.

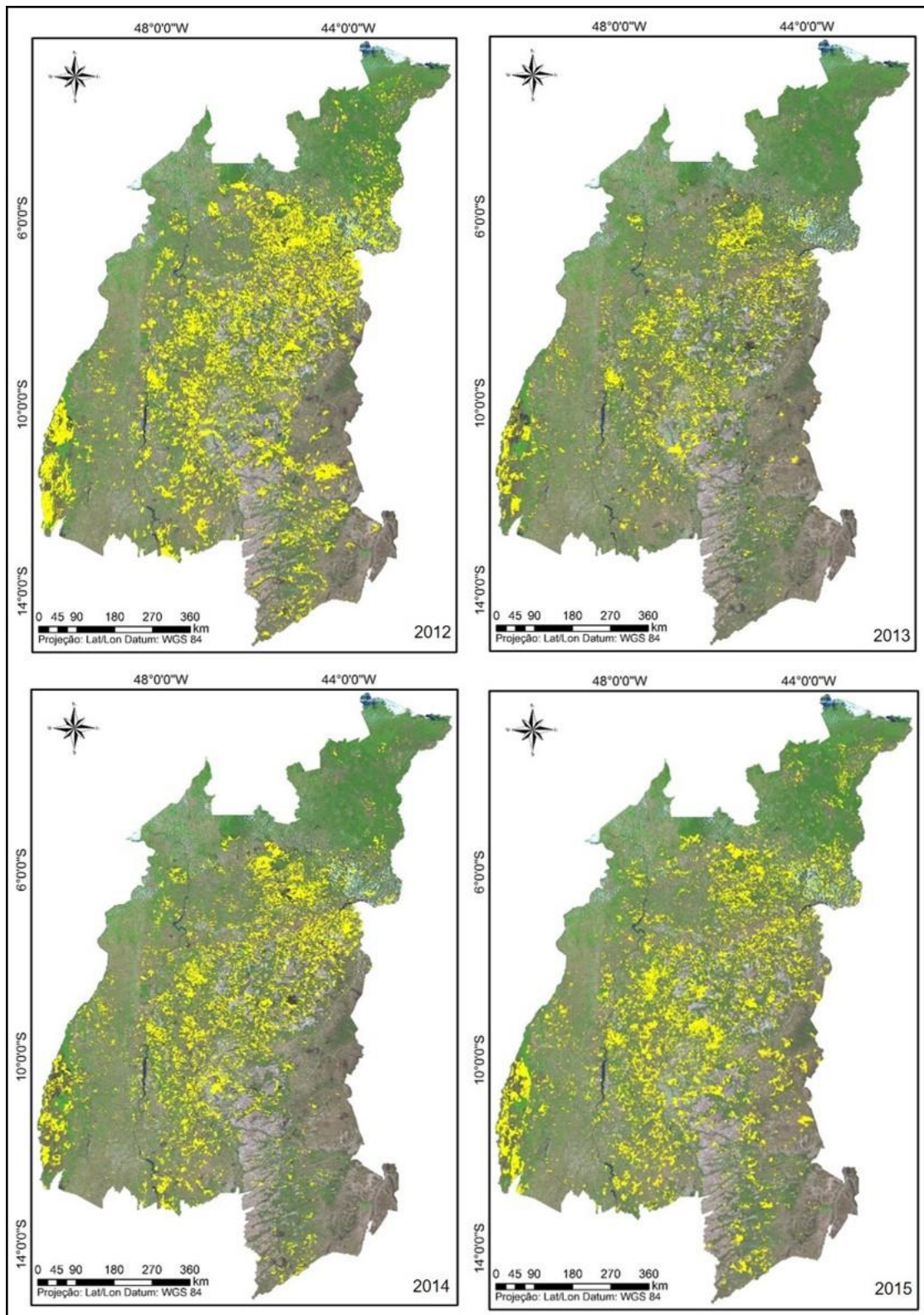


Figura 17: Áreas queimadas (em amarelo) na porção nordeste do bioma Cerrado nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Imagem MOD09 do dia 18/09/2015, composição 1B2G6R.

Nas figuras a seguir são demonstrados quatro histogramas de frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área estudada para os anos de 2012 a 2015. A quantificação do tamanho das áreas queimadas foi gerada a partir dos polígonos resultantes do mapeamento das imagens do sensor MODIS. Os polígonos foram divididos por classes de tamanho em hectares, indicado pela barra azul e a frequência acumulada do tamanho dos polígonos de queimadas é indicada pela linha laranja.

A **figura 18** apresenta o histograma de frequência do tamanho das áreas queimadas para o ano de 2012. Verifica-se que nesse ano aproximadamente 15% das áreas queimadas possuíam tamanho de até 8 hectares, 45% das áreas tinham tamanho de até 64 hectares, 35% das áreas queimadas possuíam tamanho entre 128 e 512 hectares e apenas 20% das áreas queimadas correspondem às grandes cicatrizes, acima de 1028 hectares.

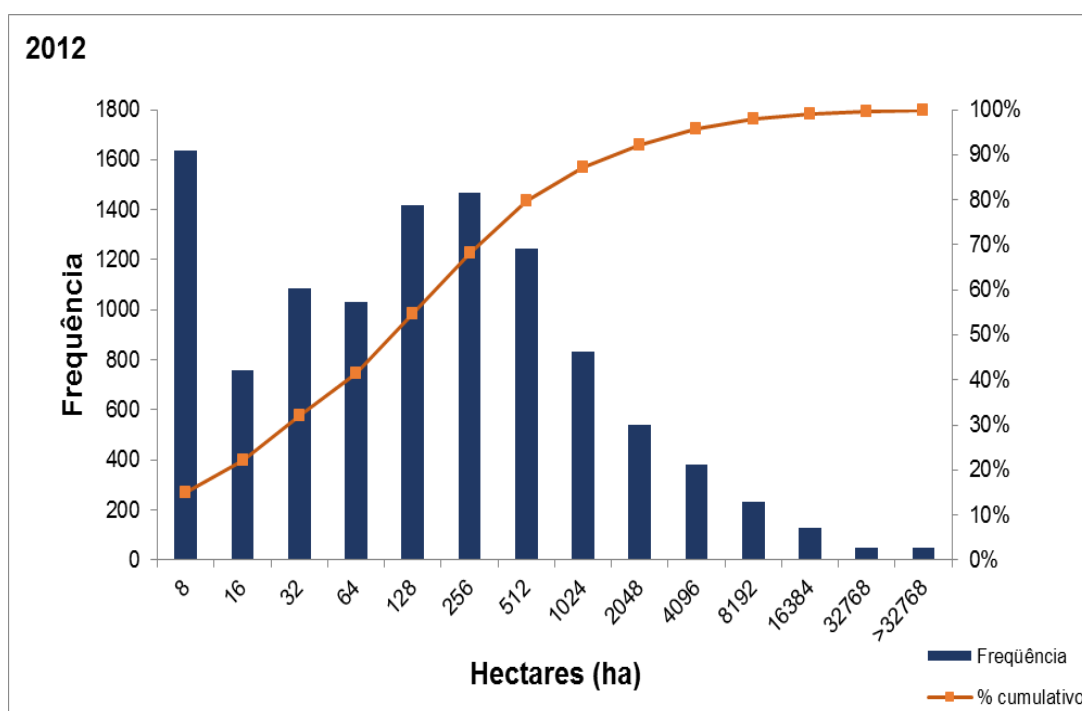


Figura 18: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2012.

No ano de 2013, de acordo com a **figura 19**, observa-se que no total das áreas queimadas 10% são pequenas, de até 8 hectares. Aproximadamente 30% das áreas

queimadas possuíam até 64 hectares, áreas queimadas com tamanhos entre 128 e 512 somaram 35% e apenas uma pequena parcela das áreas queimadas, 20%, são compostas de grandes cicatrizes, acima de 1024 hectares.

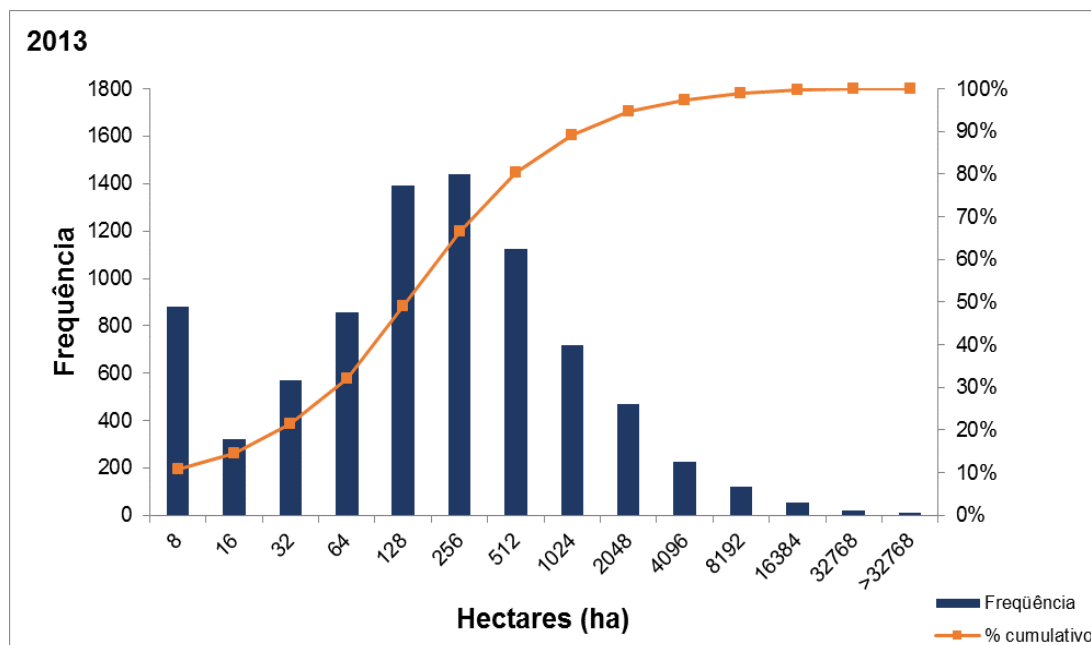


Figura 19: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2013.

O histograma de frequência dos polígonos das áreas queimadas em 2014, de acordo com a **figura 20**, mostra que aproximadamente 15% constituiu-se de áreas queimadas com até 8 hectares e 40% das queimadas mapeadas possuíam tamanho de até 64 hectares. Áreas queimadas com dimensões entre 128 e 512 hectares representaram aproximadamente 35% de frequência e grandes cicatrizes com tamanhos acima de 1024 hectares representaram 20% do total.

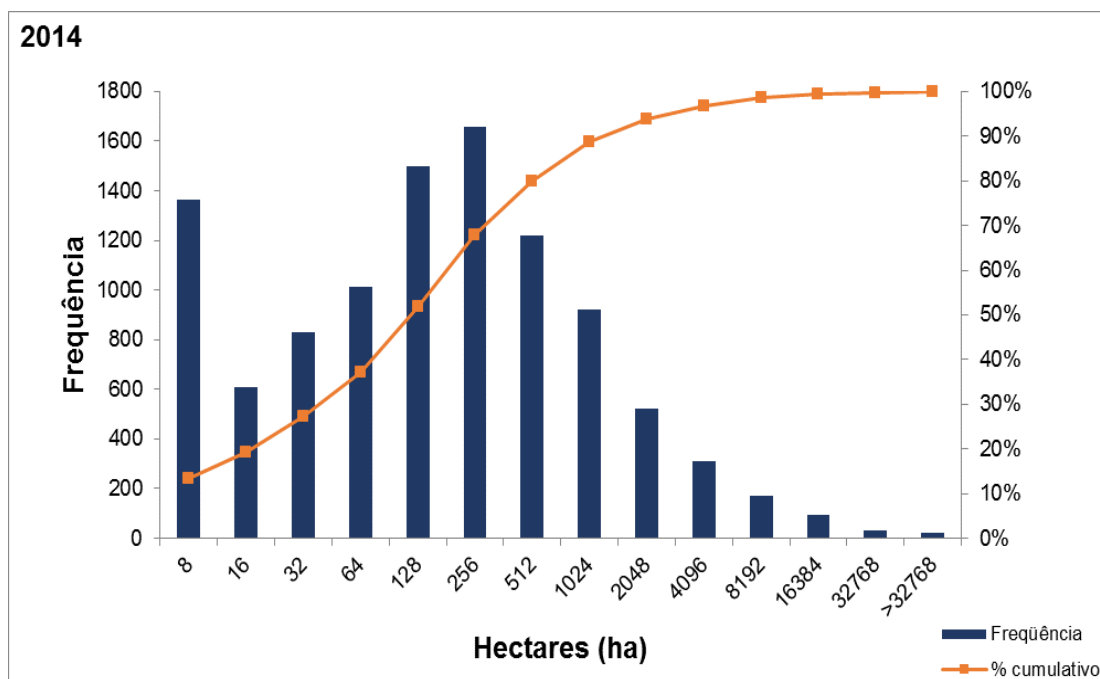


Figura 20: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2014.

No ano de 2015, de acordo com a **figura 21**, a frequência das áreas queimadas apresentou, aproximadamente, 15% dos polígonos com até 8 hectares, áreas queimadas com até 64 hectares somaram 40% do total, 40% das áreas queimadas possuíam entre 128 e 512 hectares e apenas 20% das cicatrizes de queimadas possuíam áreas acima de 1024 hectares.

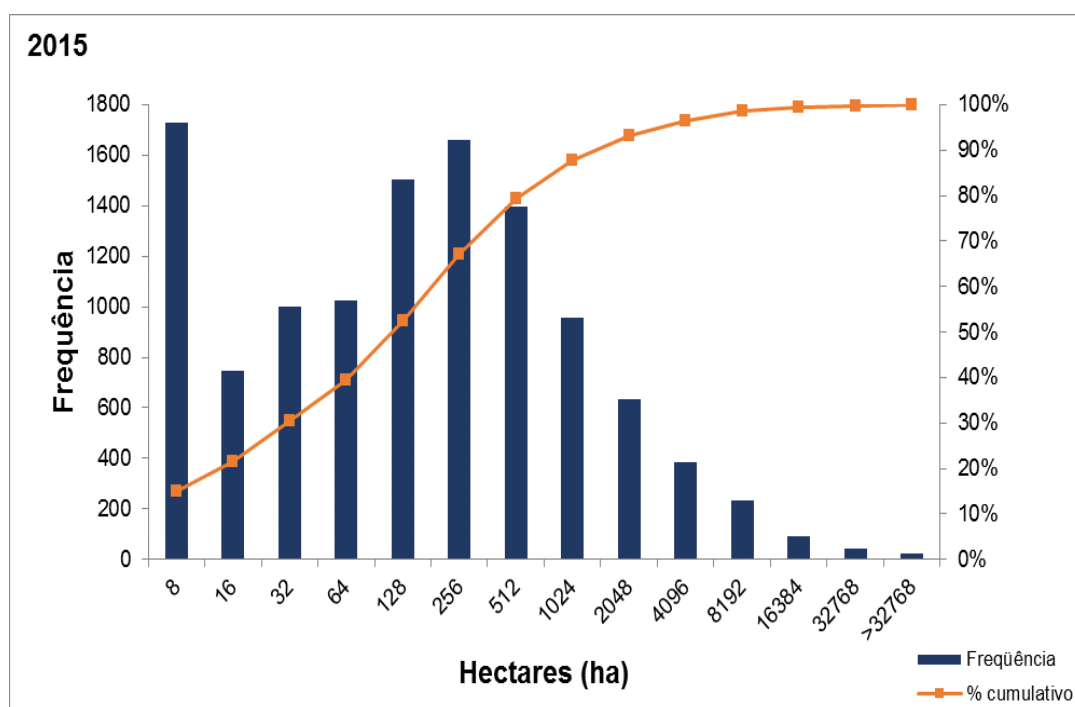


Figura 21: Frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas na área de estudo no ano de 2015.

Nota-se que para todos os anos analisados, a frequência do tamanho dos polígonos das áreas queimadas possuíam distribuições semelhantes. No entanto, percebe-se que as cicatrizes de queimadas não possuem um padrão específico. Presume-se que pequenas cicatrizes, menores que 8 hectares, ocorrem de maneira geral em pequenas propriedades, facilitando para que o fogo não escape do controle.

As cicatrizes de queimadas que possuem proporções maiores, principalmente as queimadas superiores a 50 hectares, ocorrem na maioria das vezes em grandes propriedades rurais, pois o fogo é utilizado pelos produtores de terra de forma negligenciada, e acaba atingindo vegetações que estão localizadas no entorno da área agrícola, ou até mesmo de forma intencional, para abertura de novas agrícolas, exemplo mostrado na **figura 22**. Infere-se que esses eventos são mais recorrentes durante a estação seca do ano devido às condições climáticas e a grande quantidade de biomassa seca que facilita a propagação do fogo.

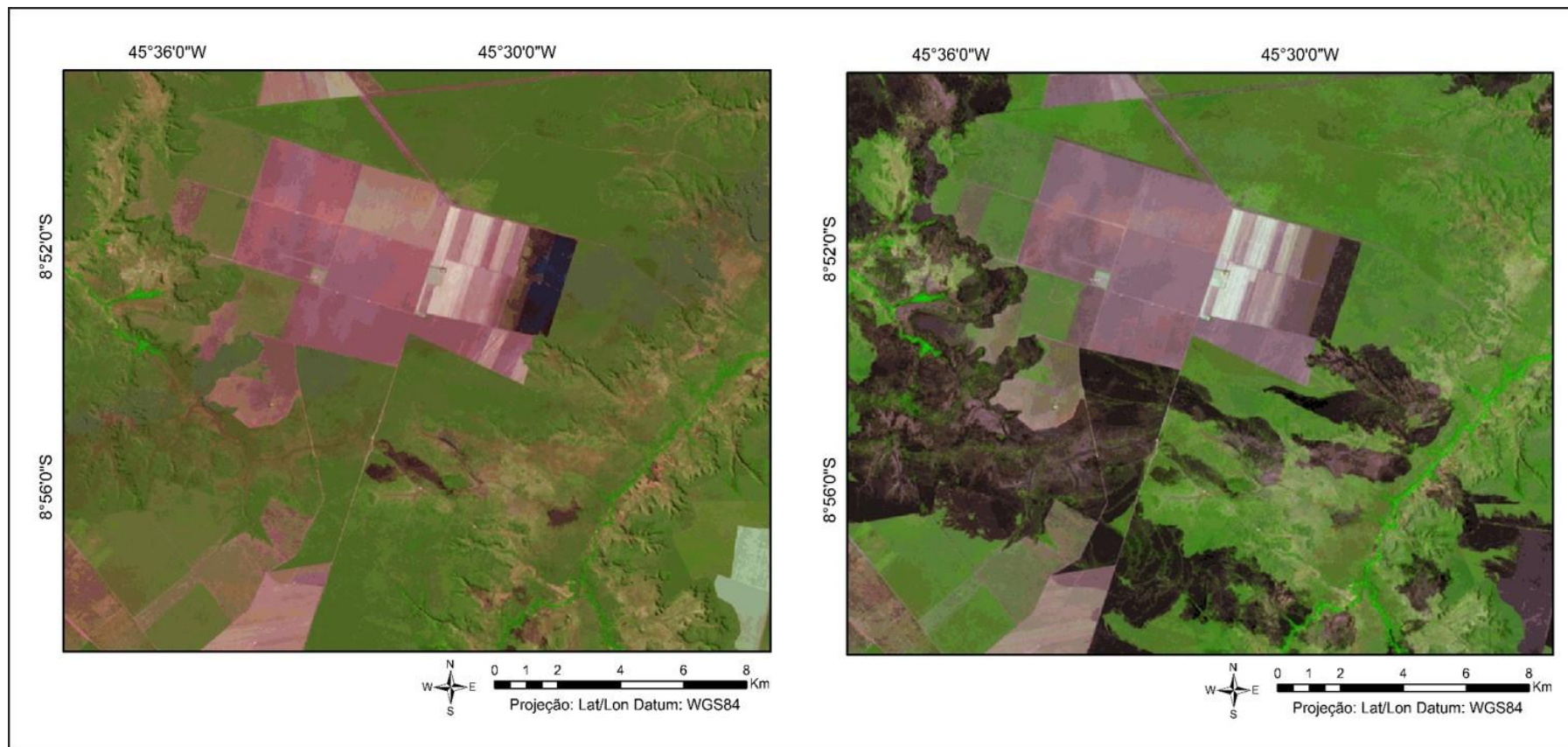


Figura 22: Na primeira imagem, referente a órbita/ponto 220/66 do dia 29-08-2015, visualiza-se a ocorrência de queimadas em uma área agrícola. Na segunda imagem, referente a órbita/ponto 220/66 do dia 30-09-2015, visualiza-se várias queimadas que atingiram vegetações do entorno da área agrícola, que podem ter ocorrido de forma negligenciada ou de forma intencional.

6.3. Variabilidade mensal dos índices de precipitação

Na **figura 23** está representada a variabilidade mensal dos índices de precipitações no período de 2012 a 2015 para a área de estudo. Para todos os anos observa-se grande variabilidade da precipitação durante os meses, passando por períodos com baixa taxa de precipitação principalmente nos meses de junho a setembro, correspondentes à estação seca do ano e por períodos com índices de precipitações mais elevados, devido ao período da estação chuvosa, principalmente entre os meses de novembro a março.

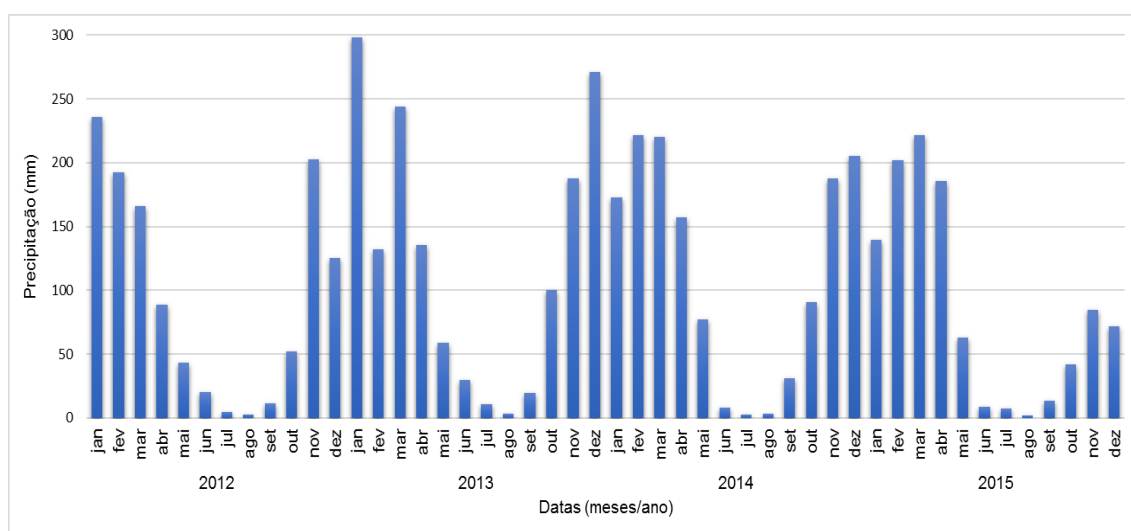


Figura 23: Variabilidade mensal da precipitação no período de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Visualiza-se que entre os quatros anos de análise, 2013 foi o ano que apresentou o maior volume acumulativo anual de precipitações, com 1.487mm, com destaque para os meses de janeiro, março e dezembro, com 298mm, 244mm e 217mm, respectivamente. O ano de 2014 obteve um volume acumulativo anual de 1378mm, sendo que os meses de fevereiro e março foram o que apresentaram maior quantidade de chuvas nesse ano, com 221mm e 220mm, respectivamente.

O ano de 2012 apresentou um volume acumulativo anual de 1144mm, e apesar de não ter sido o ano como menor índice de precipitação acumulada, teve o mês de setembro como o mais seco entre todo o período estudado, com apenas 11mm. Tal fato,

em conjunto com a baixa taxa de precipitação acumulada nos meses de junho e agosto, pode ter influenciado para que o ano de 2012 tenha obtido a maior quantidade de áreas queimadas.

O ano de 2015 foi o mais seco do período analisado, com menor valor cumulativo de precipitações, apenas 1.041mm. É possível observar que no período entre agosto e dezembro o volume mensal de chuvas é muito inferior aos outros três anos que antecederam 2015. O mês de agosto deste mesmo ano foi o que obteve a menor taxa de precipitação para todo o período, com apenas 1,7mm.

Entre os quatro anos analisados, 2012 e 2015 foram os que apresentaram menores taxas de precipitação, e também foram os anos que apresentaram as maiores quantidades de áreas queimadas. Desta forma, nota-se que a distribuição das chuvas ao longo do ano influencia no número de áreas atingidas por queimadas, ou seja, a menor disponibilidade de chuvas, torna a vegetação mais seca e suscetível ao fogo, aumentando o potencial para a ocorrência das queimadas.

A **Figura 24** mostra a distribuição espacial das anomalias de precipitação para os anos de 2012 a 2015. Nota-se anomalias positivas significativas em quase toda a área nos anos de 2012 e 2013, exceto no norte do estado do Maranhão, onde os valores negativos predominaram em 2012. Observa-se que no ano de 2014 a distribuição de anomalias negativas e positivas estiveram distribuídas de uma maneira mais heterogênea sobre a área de estudo, os valores negativos concentram-se principalmente nos estados da Bahia, do Piauí e no leste do Maranhão, enquanto os valores positivos localizam-se sobre o centro-norte do Maranhão e na região noroeste e sul de Tocantins. Em 2015 as anomalias negativas foram significativas para quase a totalidade da área de estudo e os valores negativos de precipitação foram os mais expressivos em comparação com os outros anos analisados, principalmente para o Maranhão e para a região norte e sudeste do Tocantins.

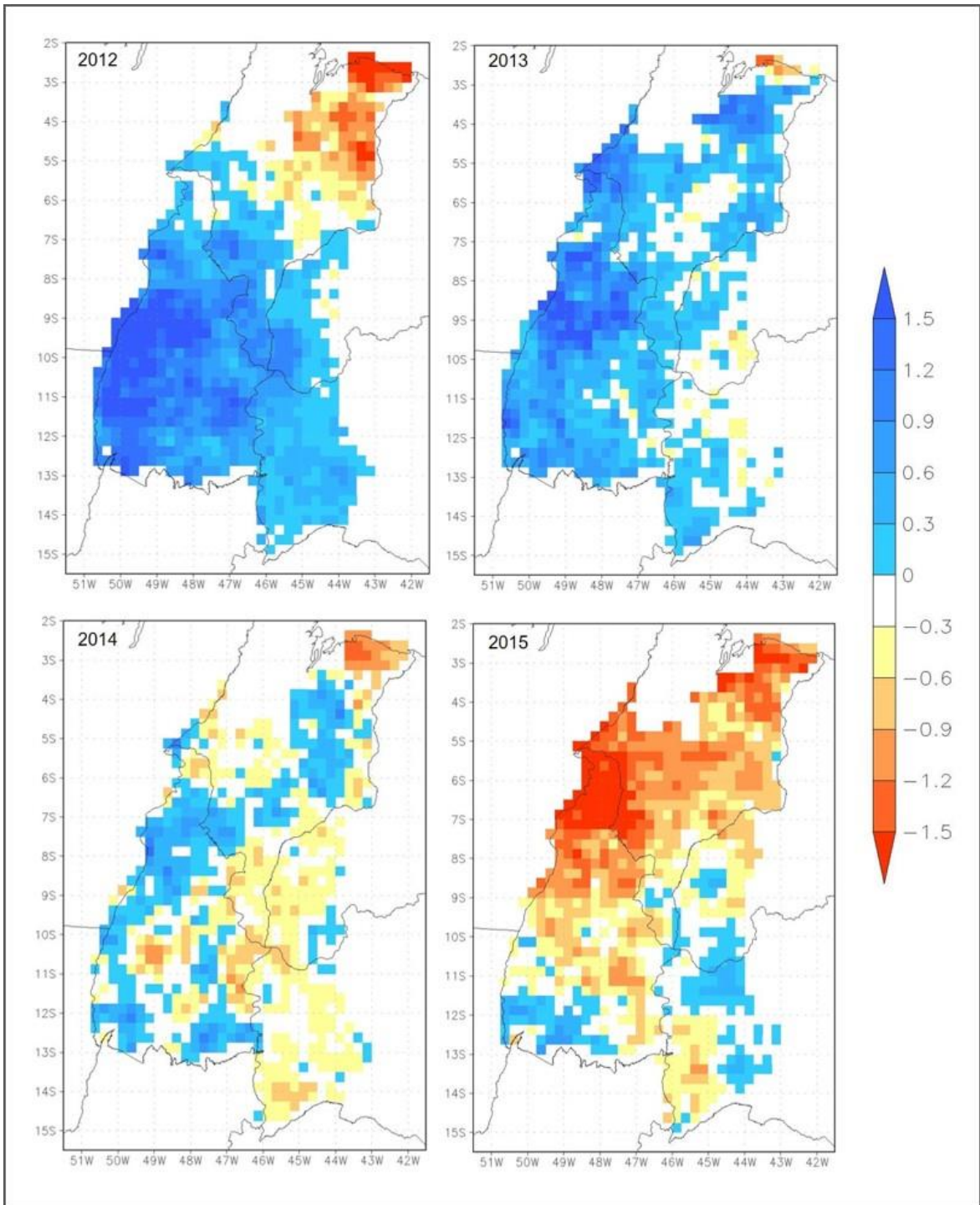


Figura 24: Anomalias da precipitação para a área de estudo nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Ao analisar o mês com maior quantidade de focos de queimada detectados pelos produtos MOD14 e MYD14, de acordo com a **figura 25**, percebe-se que poucas regiões possuem dezembro a maio como o mês de maior frequência de focos, devido principalmente à ocorrência de elevados índices de precipitação. Ressalta-se que a partir de meados de outubro, regiões que se localizam no extremo norte da área de estudo, sofrem redução no volume de precipitação devido ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical em direção ao hemisfério Norte.

Nota-se que a partir do mês de julho (cor amarela) os focos de queimadas começam a ocorrer em maior frequência, sendo intensificados durante os meses de agosto (cor creme) e setembro (cor bege). É nesse período que ocorrem os menores índices de precipitação, como demonstrado na figura 22, e a vegetação do Cerrado torna-se bastante seca, o que propicia maiores ocorrências de queimadas.

O mês de outubro (cor vermelha) apresenta também uma alta frequência de focos de queimadas, tendo vista que é no decorrer desse mês que as taxas de precipitações começam a aumentar novamente, indicando o início do período chuvoso, sendo que nessa época os produtores de terra utilizam o fogo para a renovação da pastagem, limpeza dos seus terrenos e/ou abertura de novas áreas que serão destinadas à agricultura.

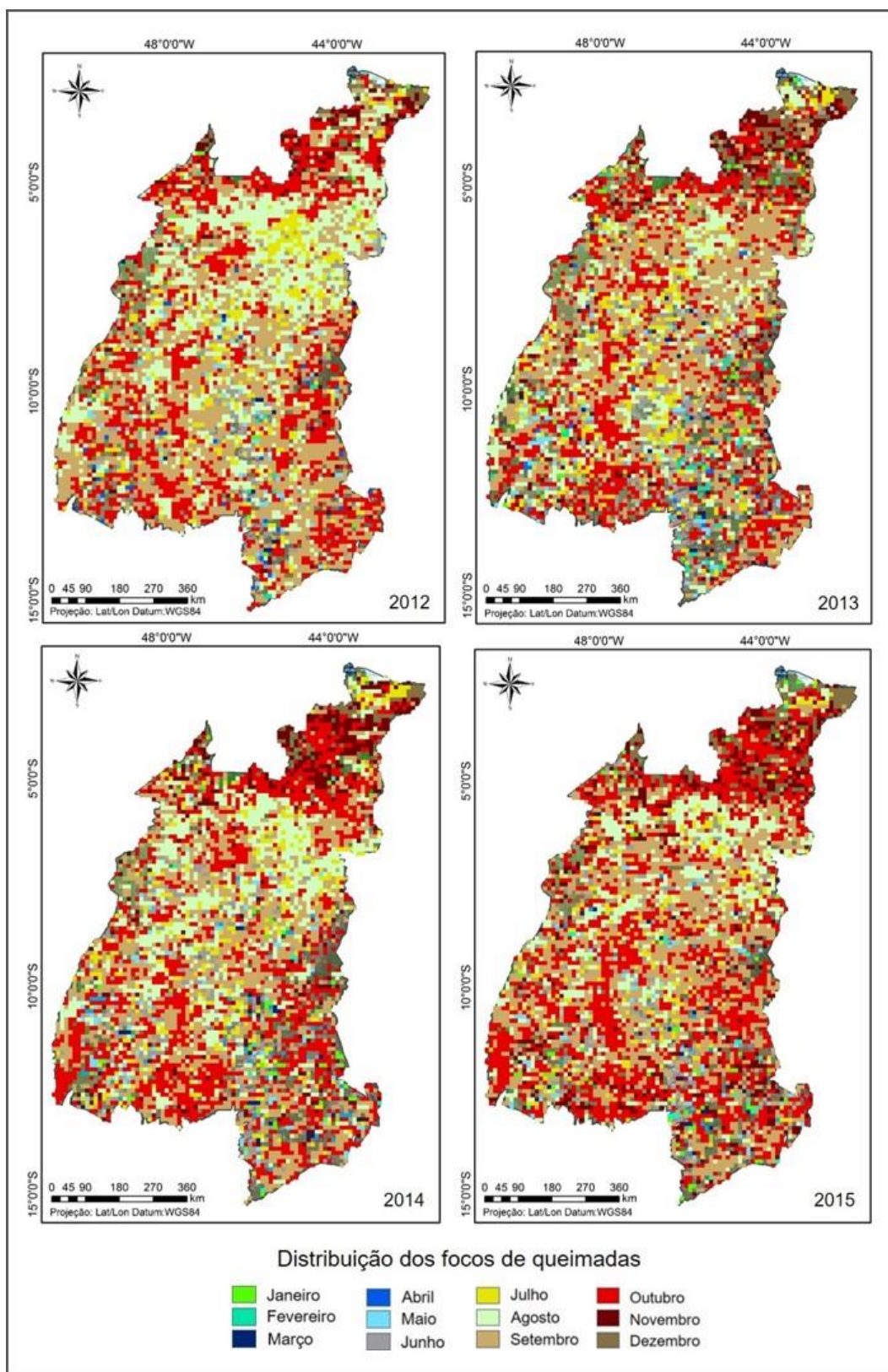


Figura 25: Distribuição mensal dos focos de queimadas para a área de estudo nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

6.4 Frequência das áreas queimadas

Foi elaborado o mapa da frequência da área queimada da região de estudo (**figura 26**), permitindo, desta forma, obter quantitativamente a frequência que uma mesma área foi queimada durante o período analisado (2012-2015). Após a geração e análise dos dados torna-se possível a identificação das áreas mais atingidas pelo fogo.

Como visualizado na **tabela 4**, durante os anos de 2012 a 2015 a área queimada totalizou 221.393 km². Em relação à frequência que uma mesma área foi atingida por queimadas, verifica-se que a maioria das queimadas ocorreram em uma mesma área apenas uma vez, aproximadamente 136.700 km², abrangendo 61% do total da área queimada.

Tabela 4: Frequência de queimadas.

Frequência de queimada (N. de vezes)	Área queimada (km ²)
1	136.700
2	62.408
3	17.560
4	4.723

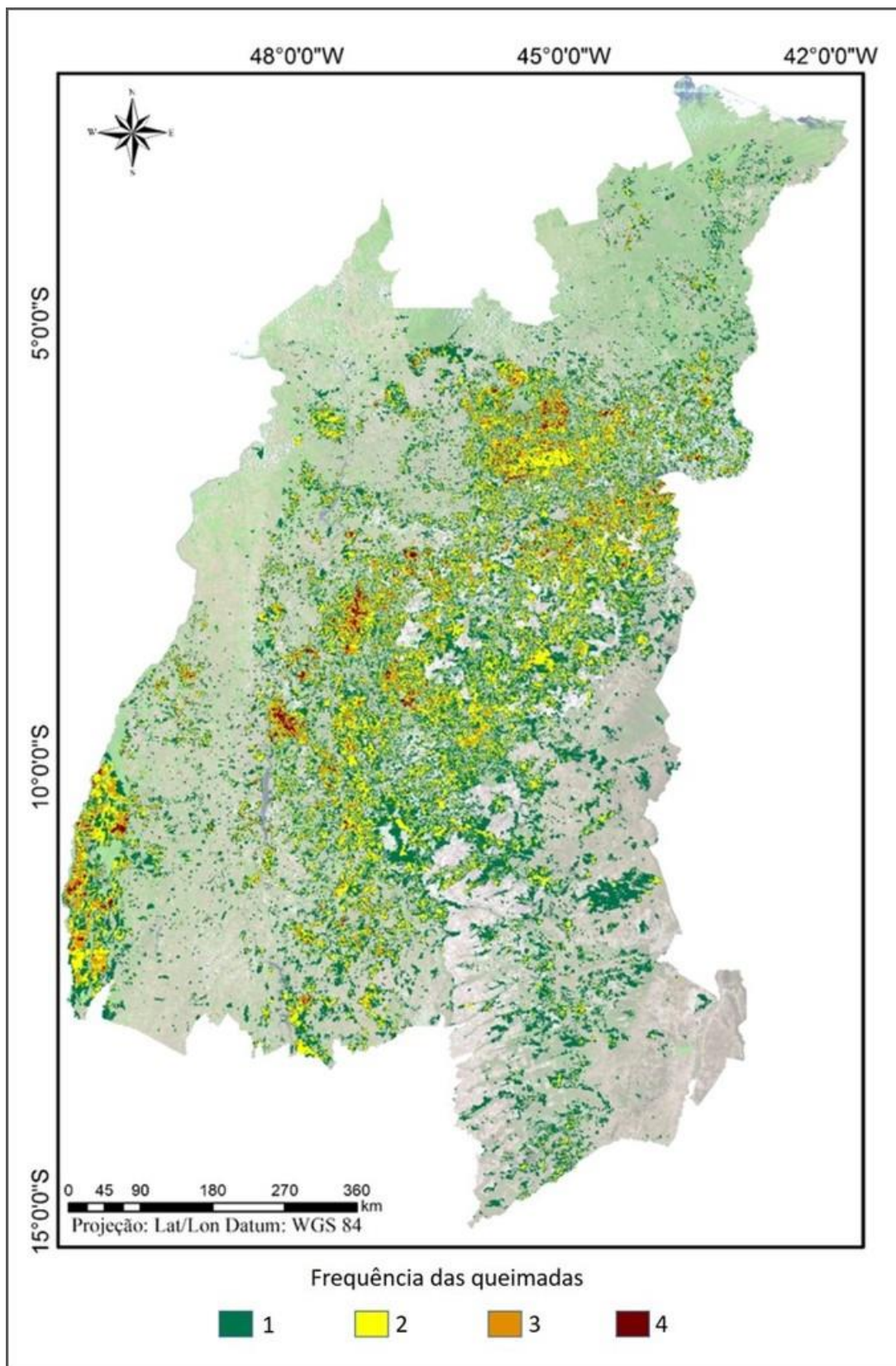


Figura 26: Frequência das áreas queimadas entre os anos de 2012 a 2015.

Apesar da maior parte das áreas terem sido queimadas uma única vez, houve 39% de recorrência de queimada em uma mesma área, sendo que 29% do total as áreas atingidas pelo fogo foram queimadas duas vezes, 8% foram queimadas três vezes e 2% foram queimadas quatro vezes no mesmo local.

Verifica-se que as regiões que possuem maiores recorrências de áreas queimadas estão localizadas na porção sudoeste, centro-oeste e centro-norte da área de estudo. Na porção sudoeste da área de estudo, onde ocorrem grande frequência de queimadas há grandes extensões de áreas agrícolas, principalmente no município de Lagoa das Confusões (TO). Nesta região a rotação de culturas é muito comum, que devido aos ciclos climáticos, permitem a cultivo de até três culturas diferentes em uma mesma área. No período de estiagem (maio a setembro) plantam-se melancia, soja, milho ou feijão e durante a estação chuvosa (outubro a abril) plantam-se arroz nas áreas inundadas (SANTANA, 2016), assim, verifica-se que a recorrência das queimadas nesta região pode estar relacionada à rotação de culturas.

Nas porções centro-oeste e centro-norte da área de estudo verificou que as queimadas mais frequentes (3 ou 4 vezes) ocorreram principalmente em áreas de vegetação típica do bioma, sendo que estas áreas encontravam-se muito próximas de limites agrícolas. Estudo apontados por Freitas e Mendonça (2016) mostraram que a expansão da fronteira agrícola atual está bem definida, possuindo rota Centro-Nordeste, e ocupando novos espaços do território brasileiro, sendo que na região do MATOPIBA a expansão da agricultura encontra-se nas mesorregiões do oriental Tocantins, sul maranhense e extremo oeste baiano. Desta forma, nota-se que as áreas com maior recorrência de queimadas estão associadas à abertura e expansão da agricultura.

Os dados sobre a frequência das queimadas expressam números preocupantes, primeiramente porque 39% das áreas (84.691 km²) foram queimadas entre duas a quatro vezes no mesmo local, principalmente em regiões de Savanas, mostrando que a vegetação do Cerrado não possui tempo hábil de regeneração, e que o uso da terra nessa região é muito intensivo, provavelmente essas áreas estão sendo preparadas para serem transformadas em áreas agrícolas ou de pastagem, fatores que podem provocar o empobrecimento do solo, tornando necessários técnicas de correção para o plantio, além do aumento da extinção da vegetação de savana nesses locais.

Outro fator importante decorre do fato de que 61% dos locais apresentam queimadas uma única vez anualmente, significando que a cada ano novas áreas são desmatadas e queimadas, provavelmente para a inserção de locais destinados às atividades ligadas com a agropecuária, corroborando que o uso e conversão da cobertura da terra nesta região é utilizado de forma extremamente intensiva.

Na **figura 27** está representada a distribuição do Uso e Cobertura Da Terra (UCT) proveniente do produto MCD12 do sensor MODIS para a área de estudo. Nota-se que as classes de uso e cobertura da terra mais expressivas são as Savanas, que se encontra distribuída em praticamente toda a área; a Savana Lenhosa, presente principalmente na região Leste; as Gramíneas, que estão presentes principalmente na porção sudoeste; a Floresta Ombrófila densa, presente na porção norte e a classe Predominância agrícola, mais frequente na porção central e sudeste da área de estudo.

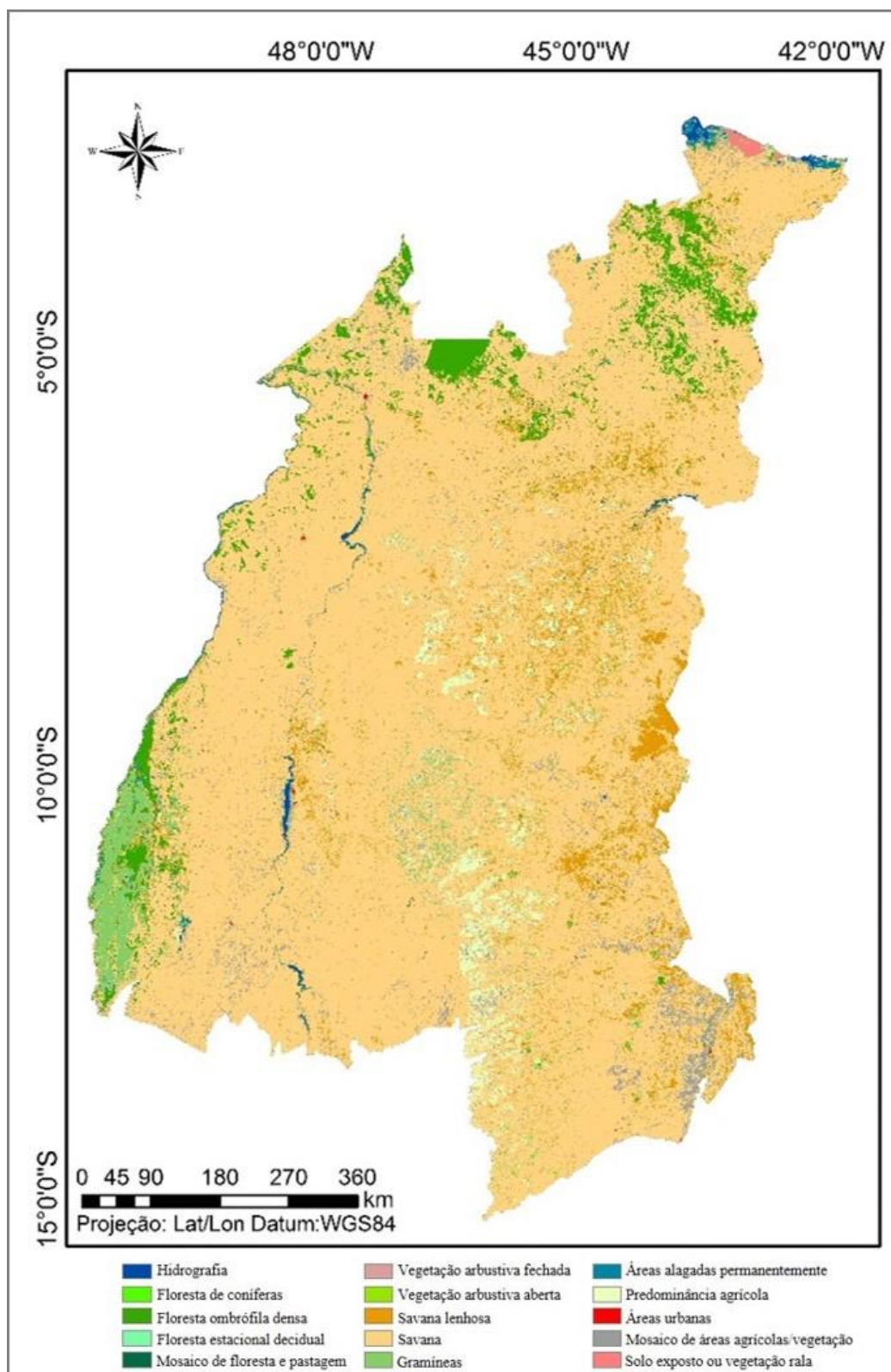


Figura 27: Mapa do uso e cobertura da terra do produto MCD12 referente à porção nordeste do bioma Cerrado.

Para analisar as classes de UCT que ocorrem maior número de queimadas foi realizado o cruzamento entre o mapa de uso e cobertura da terra originado do produto MCD12 e os polígonos das áreas queimadas nos anos de 2012 a 2015, e o resultado está apresentado na **figura 28**.

Observa-se que na área de estudo as áreas queimadas ocorrem com maior frequência em áreas de Savana, com 79,8% do total, 9,8% das queimadas ocorrem em áreas de Savana Lenhosa, 6,6% em áreas de gramíneas, 1,5% em áreas agrícolas, 0,8% em áreas de Floresta Ombrófila Densa e as áreas queimadas em outros usos são minorias, somam apenas 1,3%.

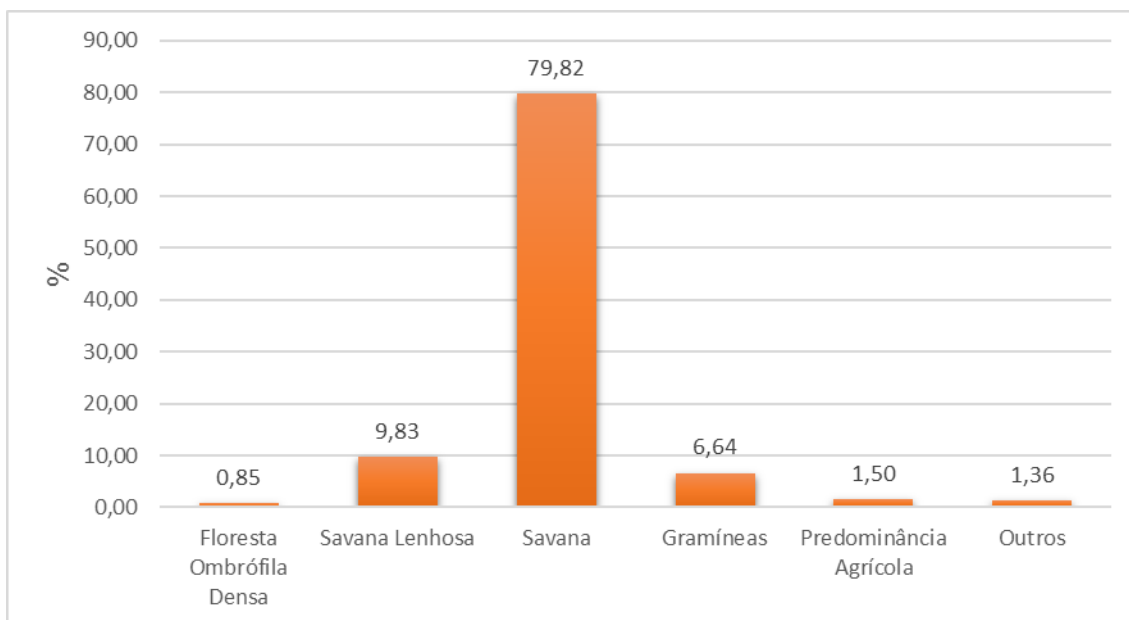


Figura 28: Percentual de área queimada, nos anos de 2012 a 2015, para as classes de uso e cobertura da terra presente na porção nordeste do bioma Cerrado.

Entre as 15 classes de UCT identificadas na área de estudo, 96% das queimadas ocorrem em apenas 3 classes (Savana, Savana Lenhosa e Gramíneas). Nesse sentido, acredita-se que a expansão da fronteira agrícola é a principal causa da ocorrência das queimadas nessa região do Bioma Cerrado, pois as queimadas são em grande maioria utilizadas pelos produtores de terra para a abertura de novas áreas agrícolas.

6.5. Concordância entre os focos de calor e área queimada.

As queimadas podem ser identificadas de duas maneiras distintas através dos sensores orbitais, pelo do mapeamento das cicatrizes de queimadas ou por base nos dados de focos de calor. Nesse sentido, realizou-se a análise entre a concordância dos focos de calor provenientes dos produtos MOD14 e MYD14 do sensor MODIS e o mapeamento das áreas queimadas realizado através do produto MOD09 também do sensor MODIS, para o período de 2012 a 2015.

A **Figura 29** apresenta o total de focos de calor detectados pelos produtos MOD14 e MYD14 do sensor MODIS, nas barras azuis estão apresentados os totais de focos de calor detectados em toda a área de estudo, nas barras em laranja estão apresentados os totais de focos que coincidiram com o *buffer* das áreas queimadas mapeadas.

No ano de 2012 foram detectados 117.382 focos de calor pelo sensor MODIS, sendo que deste total cerca de 66% dos focos de calor coincidiram com o mapeamento das áreas queimadas. No ano de 2013 foram detectados 50.197 focos de calor, sendo que 53% destes focos coincidiram com a área queimada. Em 2014 foram detectados 71.486 focos, deste total cerca de 60% foram coincidentes com o mapeamento das áreas queimadas. Já em 2015 foram detectados 89.230 focos de calor, com 68% deste total coincidindo com o mapeamento das áreas queimadas.

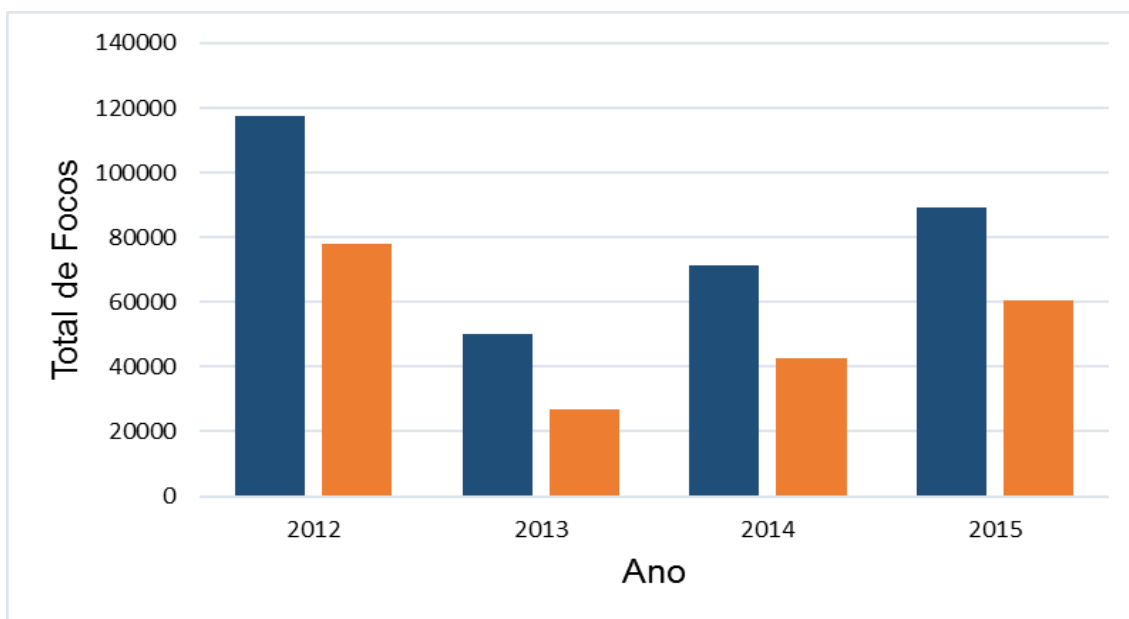


Figura 29: Total dos focos de calor detectados pelo sensor MODIS nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Barras azuis apresentam os totais de focos detectados em toda área de estudo e barras laranja apresentam os totais de focos localizados dentro do *buffer* das áreas queimadas.

Observa-se que há uma concordância na variação anual entre os focos de calor e o mapeamento das áreas queimadas, já que houve maior número de focos de calor em 2012 em relação aos outros anos e expressiva diminuição do número de focos de calor no ano de 2013, tendo em vista que tais análises também foram concluídas nos resultados do mapeamento das cicatrizes de queimadas nas imagens do produto MOD09 do sensor MODIS. Contudo, nos quatro anos de análises cerca de 38% dos focos de calor detectados pelos produtos MOD14 e MYD14 não estavam inseridos dentro área delimitada pelo *buffer*.

Entretanto, vale ressaltar que os produtos MOD14 e MYD14 provenientes do sensor MODIS possuem resolução espacial de 1 km, podendo detectar focos de calor em locais que não há incidência de fogo. Na **figura 30** pode ser visualizado a detecção, por parte do sensor MODIS, de dois focos de calor dentro de determinado corpo hídrico, que não podem ser considerados como áreas queimadas. Em outros casos, os produtos MOD14 e MYD14 podem identificar focos de calor em áreas que ocorrem pequenas queimadas, sendo que, as cicatrizes deixadas por estas não podem ser identificadas pelo produto MOD09, devido a sua resolução espacial. Na **figura 30**,

também, é possível visualizar a detecção de alguns focos de queimadas que não foram identificados pelas imagens do MOD09 como cicatrizes de queimadas.

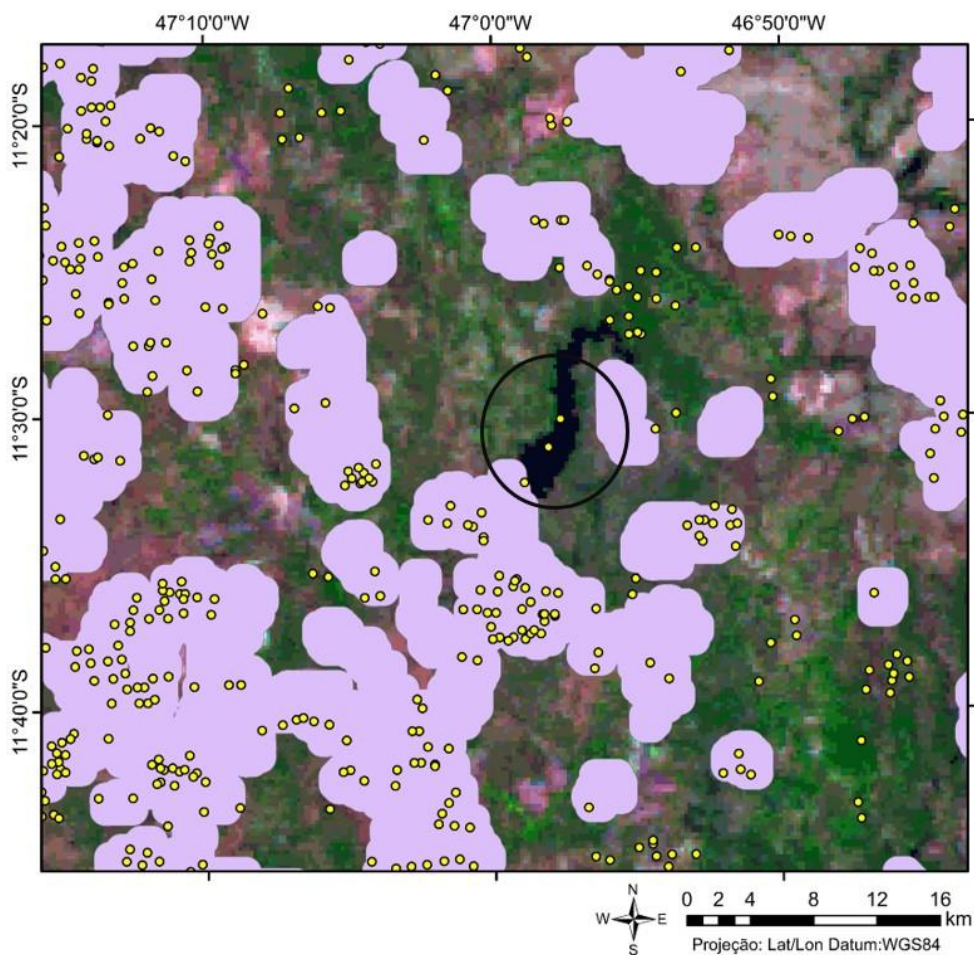


Figura 30: Exemplo de erros na detecção focos de calor pelos produtos MOD14 e MYD14 provenientes do sensor MODIS. Em amarelo estão representados os focos de calor e em lilás o *buffer* das áreas queimadas.

6.6. Relação espacial das queimadas nas Unidades de conservação

As Unidades de Conservação presentes na área de estudos são administradas por órgãos estaduais ou federais, sendo separadas em Parque de Proteção Integral, Parque Nacional, Reserva Extrativista, Área de Proteção Ambiental, Estação Ecológica,

Floresta Nacional, Refúgio da Vida Silvestre e Monumento Natural. Na **figura 31** pode ser visualizado o percentual de área queimada ocorrida em cada UC.

Entre as UCs mais afetadas por queimadas nos quatro anos analisados a Estação Ecológica de Uruçuí-Una foi a que apresentou o maior percentual de queimadas. A UC está localizada no estado do Piauí e foi criada em 1981, tem como órgão administrador o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) órgão governamental de esfera federal, possui uma extensão territorial de 135 mil hectares e teve 54% de sua área afetada por queimadas no ano de 2012, 18% em 2013, 31% em 2014 e 43% em 2015.

O Parque Nacional do Araguaia, criado em 1959, está localizado no Sudoeste do Tocantins, possui extensão de 562 mil hectares e também apresentou um percentual elevado de áreas atingidas por queimadas. Os anos de 2012 e 2015 apresentaram os maiores valores, com 43% e 39% de áreas queimadas, respectivamente. Em 2013, 17% das áreas do Parque foram queimados e em 2014 queimou 25% da área total.

Criado recentemente em 2002, o Parque Nacional Nascentes do Rio Parnaíba possui uma extensão de 724 mil hectares e está localizado na divisa dos Estados do Piauí, Maranhão, Tocantins e Bahia. Observa-se que no entorno da UC ocorre uma grande quantidade de áreas agrícolas, o que possivelmente torna a unidade mais vulnerável à ocorrência de queimadas. Em relação ao percentual de áreas queimadas, ocorreram 22% no ano de 2012, 23% em 2013, 21% em 2014 e em 2015 a área queimada ocorre em 30% da área total do Parque.

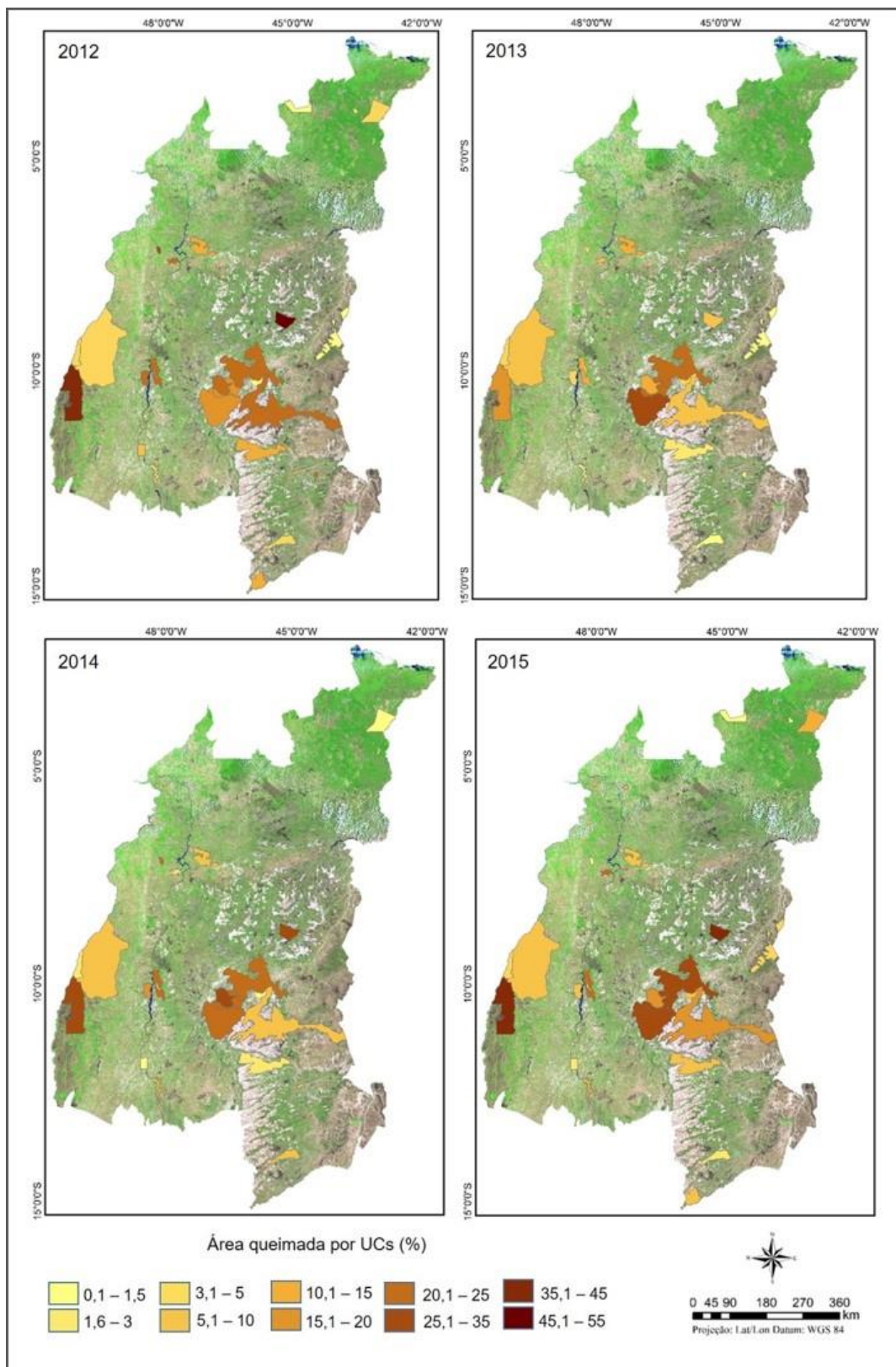


Figura 31: Percentual de área queimada em Unidades de Conservação localizadas na porção nordeste do bioma Cerrado para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Localizada na porção leste do estado do Tocantins, a Área de Proteção Ambiental do Jalapão foi criada no ano 2000, é regida pelo órgão Estadual Instituto Natureza do Tocantins, possui 461 mil hectares e funciona como uma zona de amortecimento para o Parque Estadual do Jalapão. A UC apresentou 18% da sua área queimada em 2012, em 2013 o percentual foi de 23%, em 2014 apresentou 24% e em 2015 a área atingida por queimadas foi de 28%.

O Parque Nacional Serra das Confusões, criado em 1998, possui partes das suas terras sobre domínio do bioma Cerrado e partes sobre domínio da Caatinga. A UC está localizada no estado do Piauí e destaca-se pelo baixo percentual de áreas queimadas. A área sobre domínio do Cerrado, para os quatro anos de análise, apresentou um número de queimadas pouco expressivo em relação às outras UCs presentes na área de estudo, para os anos de 2012, 2013 e 2014 foi queimado menos de 1% de área e no ano de 2015 queimou-se 4% da área total do Parque.

As Unidades de Conservação desempenham um papel importante para a preservação da biodiversidade do Cerrado, mas as inúmeras queimadas que afetam as UCs anualmente acabam dificultando a preservação de suas áreas. Destaca-se que a UC que teve o menor percentual de áreas queimadas, o Parque Nacional Serra das Confusões, possui plano de manejo. Quanto às UCs que apresentaram maior percentual de áreas queimadas, apenas o Parque Nacional do Araguaia possui o plano de manejo.

Nesse sentido, atenta-se para a importância da criação de planos de manejo para todas as UCs, seja ela de esfera municipal, estadual ou federal, tendo em vista que o plano de manejo estabelece normas e restrições que visam minimizar os impactos negativos que afetam às UCs, fundamental para que a implementação se torne eficiente.

6.7. Relação espacial das queimadas por município

Na **figura 32** pode-se visualizar o percentual de área queimada por município. Ao analisar os mapas anuais, infere-se que a maioria dos municípios que possuem maior área queimada no ano de 2012 também são recorrentes nos outros três anos, com destaque para os municípios de Tocantínia (TO), Fernando Falcão (MA), Benedito Leite

(MA), Marcos Parente (PI), Landri Sales (PI), Mirador (MA), Antônio Almeida (PI) e Porto Alegre do Piauí (PI), apresentando o maior percentual de área queimada em todos os quatro anos analisados.

Os municípios de Marcos Parente (PI) e Landri Sales (PI), localizados na porção nordeste da área de estudo, possuem uma extensão territorial de 750,33 km² e 1.089 km², respectivamente, e apresentaram em 2012 e 2014 uma grande quantidade de áreas queimadas. No município de Marcos Parente no ano de 2012 o percentual queimado foi de 72% e em 2014 foi de 47%. Landri Sales apresentou um percentual de área queimada em 2012 de 48% e 49% em 2014, ou seja, praticamente metade da extensão desses dois municípios foram afetados por queimadas nesses dois anos. Nos outros anos, o percentual de área queimada foi menor, 14% em 2013 e 15% em 2015 de área queimada no município de Landri Sales, e de 25% em 2013 e 27% em 2015 no município de Marcos Parente.

No estado do Maranhão três municípios se destacaram com o maior percentual de áreas queimadas. Benedito Leite, localizado na região nordeste da área de estudo, possui uma área territorial de 1.782 km² e teve 39% de sua área queimada nos anos de 2012 e 2013, em 2014 apresentou 32% e em 2015 a quantidade de área queimada foi de 41%. Fernando Falcão, município localizado na porção centro-norte da área de estudo, possui área de 5.087 km², e no ano de 2012 foi queimado 58% da sua área, 2013 e 2014 queimou 33% de área e em 2015 a área foi atingida por queimadas em 36%. Outro município que teve grande percentual de áreas queimadas foi Mirador, localizado na região centro-norte da área de estudo, possuindo a maior extensão territorial entre os municípios já apresentados, com 8.521 km², sendo que 58% da sua área foi queimada em 2012, 28% em 2013, 32% em 2014 e em 2015 a área queimada foi de 40%.

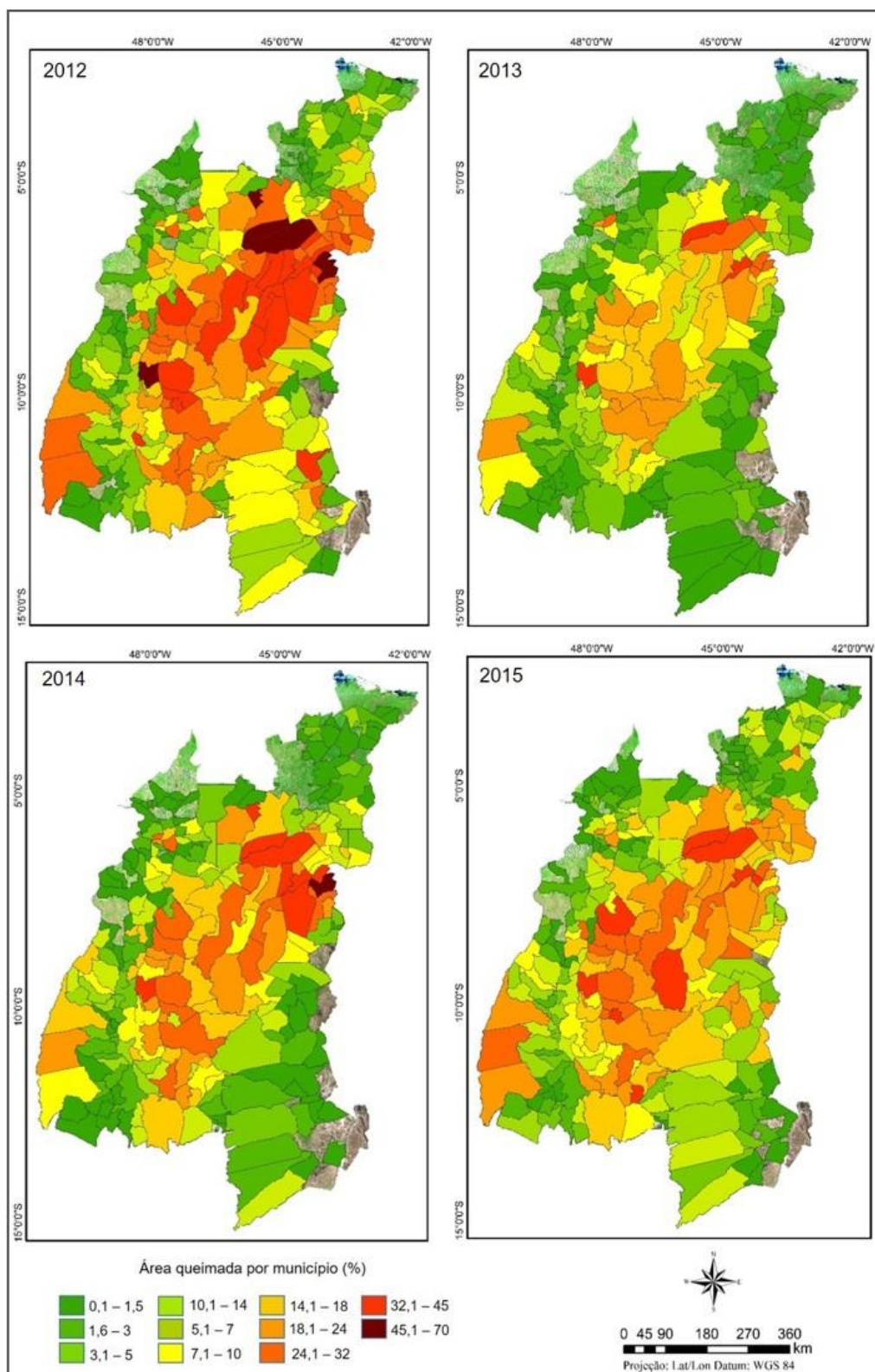


Figura 32: Percentual de área queimada para cada município localizado na porção nordeste do bioma Cerrado nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Outro município que teve grande extensão de área queimada foi Tocantínia no Tocantins, que está localizada na região central da área de estudo. Possui extensão territorial de 2.601km²e a área queimada nesse município em 2012 foi de 56%, em 2013 e em 2014 queimou 43% e no ano de 2015 ocorreu 45% de área queimada.

Os municípios que apresentaram maior quantidade de áreas queimada estão localizados na região central e nordeste da área de estudo, principalmente nos estados do Piauí e do Maranhão, e nota-se que o percentual de áreas queimadas é elevado para quase todos nos municípios localizados nesta região. Este fato que pode ser relacionado com o avanço da expansão da fronteira agrícola para áreas ainda não convertidas, sendo que o fogo é uma técnica muito utilizada pelos proprietários de terras para a abertura de novas áreas agricultáveis, além de limpar o terreno do emaranhado de troncos e galhos derrubados, esse método é mais barato do que investir em máquinas pesadas para esse tipo de limpeza (NESPTAD, 1999).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Cerrado brasileiro tornou-se uma das regiões mais ameaçadas do mundo, grande parte das suas áreas estão destinadas à expansão do agronegócio. Mas a abertura de novas áreas agrícolas pode acarretar em grandes impactos negativos para a biodiversidade do bioma, como a eliminação da fauna e flora e a degradação dos solos e dos mananciais hídricos, tendo em vista que a queimada muitas vezes é a primeira alternativa do agricultor para a eliminação da vegetação natural em áreas ainda não convertidas.

A validação dos mapeamentos das áreas queimadas realizadas nas imagens do produto MOD09 do sensor MODIS, tendo como dados de referência o mapeamento nas imagens do sensor LISS-III e OLI, apresentaram uma boa correlação. Sendo que as menores correlações deve-se, principalmente, às diferenças de resolução espacial entre os sensores. O sensor MODIS, por possuir resolução de 250 m, teve uma superestimava de áreas queimadas em relação aos sensores LISS-III e OLI, em grande parte devido à presença de cicatrizes de queimadas próximas que acabam sendo consideradas como apenas uma única queimada pelo MODIS. Ressalta-se que, mesmo apresentado algumas limitações, os resultados obtiveram um bom coeficiente de correlação, tornando o mapeamento das áreas queimadas em imagens do sensor MODIS confiáveis.

Percebe-se que as queimadas continuam a serem muito utilizadas pelos agricultores, pois em todos os quatro anos de análise estas atingiram grande extensão de área na região de estudo. O ano de 2012 foi o que apresentou maior ocorrência de queimadas, seguido por 2015 e por 2014, sendo que o menor número de queimadas ocorreu no ano de 2013. Tal fato pode ser correlacionado com os índices de precipitação, já que o ano de 2013 foi o que apresentou maior volume acumulativo anual de chuvas e os anos mais secos foram 2012 e 2015. Nesse sentido, nota-se que em anos que possuem menores volumes de precipitações a ocorrência de áreas atingidas por queimadas tornam-se mais frequentes, bem como os impactos ao meio ambiente.

Os resultados obtidos sobre a frequência que uma mesma área foi atingida por queimadas durante os quatro anos de análise são preocupantes, pois em 39% dos casos houve recorrência de queimadas em uma mesma área, demonstrando assim que a vegetação do Cerrado não possui tempo hábil de regeneração. Infere-se que quando a

vegetação queimada não é convertida para áreas agrícolas, a recorrência dessas queimadas podem fazer com que as fisionomias vegetacionais que possuem estrato arbóreo (denominados de Cerradão, Cerrado denso ou Savana Lenhosa), por não possuírem tempo hábil para se regenerarem, acabem se transformando em fisionomias de estrato herbáceo (denominados de Cerrado sujo, Cerrado ou Savana), sendo que a frequência anual de queimadas em uma mesma área podem ainda suprimir totalmente os fragmentos vegetacionais do bioma Cerrado.

Nota-se que mesmo nas áreas localizadas dentro dos limites das Unidades de Conservação, que têm como prioridade a preservação da biodiversidade do bioma, ocorrem grande quantidade de queimadas, sendo que nos anos mais secos (2012 e 2015) do período analisado, algumas UCs apresentaram quase metade da totalidade de suas áreas atingidas por queimadas. Este fato demonstra que mesmo se tratando de áreas protegidas por órgão governamentais, estas unidades não estão livres dos impactos ambientais que as queimadas podem ocasionar.

O conjunto de dados e reflexões apresentados ao logo do presente texto permite inferir que a porção nordeste do bioma Cerrado encontra-se em profundas mudanças, principalmente devido à expansão agrícola que propicia a degradação de extensas áreas do bioma. Mesmo com a modernização da agricultura nas últimas décadas, que utiliza-se de insumos e maquinários modernos, as queimadas continuam muito frequentes nesta região, já que, para muitos agricultores, utilizar o fogo para limpeza do terreno ou para renovação da pastagem é a forma mais rápida e barata que eles possuem.

Neste contexto, ressalta-se a importância implementar medidas efetivas para preservação da biodiversidade do bioma Cerrado, sendo através da identificação de áreas prioritárias, da conscientização da população sobre o uso adequado do fogo, através de fiscalização mais eficiente, do monitoramento através de imagens de satélites, entre outras alternativas que visem a conservação da grande diversidade de ambientes existentes no Cerrado.

Ressalta-se que o conhecimento por ora adquirido com o presente trabalho não encerra as análises sobre as áreas queimadas na porção nordeste do bioma cerrado, ao contrário, abre outras possibilidades para novas pesquisas, atualizações e/ou levantamentos de informações desta e de outras regiões do bioma Cerrado.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê editorial, 2003.

ALEXANDER, Peter et al. Drivers for global agricultural land use change: The nexus of diet, population, yield and bioenergy. **Global Environmental Change**, [s.l.]. v. 35, p.138-147, 2015.

AQUINO, F. de G. MIRANDA, G. H. B. Consequências Ambientais da Fragmentação de Habitats no Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**, 2008, p. 385-397.

ARINO, O; PICCOLINI, I. Development and testing of algorithms for a global burnt area product from ERS ATSR-2. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International**. IEEE, 2000. p. 304-306.

BATISTA, A. C. **Deteção de Incêndios Florestais por Satélites**. Floresta, v. 34, n. 2, p. 237 - 241, 2004.

BARNETT, V.; LEWIS, T. **Outliers in statistical data**. Chichester: John Wiley, 1995. p. 584.

BELWARD, A. S.; ESTES, J. E.; KILNE, K. D. The IGBP-DIS global 1- km land-cover data set DISCover: a project overview. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 65, 1013 – 1020, 1999.

BERGERON, Y.; GAUTHIER, S.; KAFKA, V.; LEFORT, P.; LESIEUR, D. **Natural fire frequency for the eastern Canadian boreal forest: Consequences for sustainable forestry**. Can. J. For. Res. 2001, p. 384–391.

BERNARDES, J. A. Novas fronteiras do capital no cerrado: dinâmica e contradições da expansão do agronegócio na região Centro-Oeste, Brasil. **Scripta Nova**. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, v. 19, 2015.

BOURGEOU-CHAVEZ, L. L. et al. Mapping fire scars in global boreal forests using imaging radar data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 20, p. 4211-4234, 2002.

CARDOZO, F. S. **Estimativas de áreas queimadas para o estado de Rondônia e suas implicações na modelagem do balanço de radiação**. 2014. 131 p. (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/05.26.19.46-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3GCG6CH>>. Acesso em: 25 jul. 2016

CASTILLO, R. Transporte e logística de granéis sólidos agrícolas: componentes estruturais do novo sistema de movimentos do território brasileiro. *Investigaciones Geográficas – Boletín del Instituto de Geografía*, UNAM, p. 79-96, nº 55, 2004.

CHU, T.; GUO, X. Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in Boreal forest regions: A review. **Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 470-520, 2013.

CHUVIECO, E.; RIAÑO, D.; DANSON, F. M.; MARTIN, P. Use of a radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 111, n. G4, 2006.

COLE, M. M. **The savanas: biogeography and geobotany**, London: Academic Press, 1986.438p.

COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. **Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.59, p.93-99, 2007.

COUTINHO, L.M. **Contribuição ao conhecimento do papel ecológico das queimadas na floração de espécies do Cerrado**. Tese de livre docência. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1976.

CRUTZEN, P. J.; HEIDT, L. E.; KRASNEC, J. P.; POLLOCK, W. H.; SEILER, W. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃ Cl and COS. **Nature**, v. 282, p. 253-256, 1979.

DIAS, B. F. S. **Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. Brasília: IBAMA: Fundação Pro-Natureza, 1992. 97 p.

DINIZ, B. P. C. **O Grande Cerrado do Brasil Central: geopolítica e economia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2006.

DWYER, E.; PEREIRA, J.M.C.; GREGOIRE, J. M. Global spatial and temporal distribution of vegetation fire determined from satellite observations. **International Journal of Remote Sensing**. 1999.

EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. **Botanical review**. v. 38, n. 2, p. 201-341, 1972.

FERGUSON, S. A.; SANDBERG, D. V.; OTTMAR, R. Modelling the effect of landuse changes on global biomass emissions. In: **Biomass Burning and Its Interrelationships With the Climate System**. Springer Netherlands, 2000. p. 33-50.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA Jr., L.G.; SOARES, B.; MIZIARA, F. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. **Journal of Land Use Science**, v. 7, p. 1-19, 2012.

FILGEIRAS, T. S.; WECHSLER, F. S. **Alternativas de desenvolvimento dos Cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis**. 1992.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto**. 3ª edição ampliada e atualizada – São Paulo. Editora Oficina de Textos. 2013.

FRANÇA, H. Identificação e mapeamento de cicatrizes de queimadas com imagens AVHRR/NOAA. In: Ferreira, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 57-78.

FRANÇA, D. A.; FERREIRA, N. J. **Considerações sobre o uso de satélites na detecção e avaliação de queimadas**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005. p. 3017- 3023.

FREDERICO, S.; CASTILLO, R. Dinâmica Regional e Globalização: espaços competitivos agrícolas no território brasileiro. **Mercator** - volume 9, número 18, 2010.

FREITAS, R. E.; MENDONÇA, M. A. A. Expansão Agrícola no Brasil e a Participação da Soja: 20 anos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 3, p. 497-516, 2016.

FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO (FUNAI). **Terras Indígenas**. Disponível em: <http://www.funai.gov.br/index.php/indios-no-brasil/terras-indigenas>. Acesso em: 11 de fevereiro de 2017.

GARMIN. **GPS-64S: Manual do Utilizador**. Disponível em: <http://www.garmin.com/en-US/>. Acesso em: 20 de maio de 2017.

GEORGE, C.; ROWLAND, C.; GERARD, F.; BALZTER, H. Retrospective mapping of burnt areas in Central Siberia using a modification of the normalised difference water index. **Remote Sens. Environ.** 2006, 104, 346–359.

GILPIN, M. E.; SOULÉ, M. E. Minimum viable populations: process of species extinction. In SOULÉ, M. E. (Ed.) **Conservation biology, the Science of scarcity and diversity**. Sunderland: Sinauer Associates, 1986. P. 19-34.

GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.; WAGNER, E. Potencial agrícola da região dos cerrados brasileiros. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 15, n. 1, p. 1-17, 1980.

GOODLAND, R. J. A.; FERRI, M. G. **Ecologia do Cerrado**. Tradução Eugenio Amado. Belo Horizonte. Ed. Itatiaia. 1979. P. 11-193.

GRANIER, A.; LOUSTAU, D.; BRÉDA, N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. **Annals of Forest Science**, v. 57, n. 8, p. 755-765, 2000.

HIRST, P.; THOMPSON, G. **Globalização em questão**: a economia internacional e as possibilidades de governabilidade. Petrópolis: Vozes, 1998. 364 p.

ICHOKU, C.; GIGLIO, L.; WOOSTER, M.; REMER, L. Global characterization of biomass burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 6, p. 2950-2962, 2008.

INNES, J. L.; KOCH, B. Forest biodiversity and its assessment by remote sensing. **Global Ecology & Biogeography Letters**, v. 7, n. 6, p. 397-419, 1998.

INNES, J. L.; HARON, A. H. (Ed.). **Air pollution and the forests of developing and rapidly industrializing regions**. CABI, 2000.

INOCÊNCIO, M. E. **Estado e território no Brasil: reflexões a partir da agricultura**. In: IDeAS. Programa de Pós-Graduação de Ciências Sociais em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010. p. 1-48.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/>. Acesso em 18 de dezembro de 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). **Plano de Manejo**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/planosmanejo>. Acesso em: 20 de janeiro de 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Divisão de Geração de Imagens. Imagens RESOURCESAT-1. São José dos Campos, SP, INPE, acessado em 03 de julho de 2016. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/ir-p6.html>. Acesso em: 03 de julho de 2016.

JORDAN, G. et al. Cropland/pastureland dynamics and the slowdown of deforestation in Latin America. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, p. 034017, 2015. ISSN 1748-9326.

JUSTICE, C. O.; GIGLIO, L.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MRISSETTE, J.; ROY, D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire product. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 244-262, 2002.

KAWAKUBO, F. S. **Metodologia de classificação de imagens multiespectrais aplicada ao mapeamento do uso da terra e cobertura vegetal na Amazônia: exemplo de caso na região de São Félix do Xingu, sul do Pará**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

KAMPEL, M. **Características gerais dos satélites NOAA**: histórico, instrumentos e comunicação de dados In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N.1 ed.São Paulo: Oficina de Textos, v.1, p. 15-40, 2004.

KAUFFMAN, J. B.; UHL, C. Interactions of anthropogenic activities, fire, and rain forests in the Amazon. In: **Fire in the tropical biota**. Springer Berlin Heidelberg. p. 117-134, 1990.

KLEMAS V.; HARDISKY, M. A. SMART. The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of *Spartina Alterniflora* Canopies. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 49:77-83. 1983.

KLINK, C. A. Relação entre o desenvolvimento agrícola e a biodiversidade. Pp. 25-27. In: R.C. Pereira, L. C. B. Nasser (Eds.). **Anais VIII Simpósio sobre o Cerrado, 1 International Symposium on Tropical Savanas - Biodiversidade e Produção Sustentável de Alimentos e fibras nos Cerrados**. Embrapa CPAC. Brasília. 1996.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian cerrado. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 707-713, 2005.

KLINK, C. A.; Santos, H. G.; CAMPARI, J.; Matsumoto, M. H.; Freitas, G. K.; e Baumgarten, L. Conservação dos recursos naturais em terras privadas: o papel das reservas legais no arranjo funcional das paisagens produtivas do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora**, 2008, p. 399-406.

KUMMEROW, C., BARNES, W., KOZU, T., SHIUE, J., & SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, n. 3, p. 809-817, 1998.

LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANDERSON, L. O. Sensor MODIS: Produtos para ecossistemas terrestres - MODLAND In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Ed.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. Arêntese, 2007. p. 23-35.

LAUK, C.; ERB, K. H. Biomass consumed in anthropogenic vegetation fires: Global patterns and processes. **Ecological Economics**, v.69, n.2, p. 301-309, 2009.

LEVINE, J. S. Global biomass burning: a case study of the gaseous and particulate emissions released to the atmosphere during the 1997 fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia. In: **Biomass burning and its inter-relationships with the climate system**. Springer Netherlands. p. 15-31, 2000.

LONFAT, M.; MARKS JR, F. D.; CHEN, S. S. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: A global perspective. **Monthly Weather Review**, v. 132, n. 7, p. 1645-1660, 2004.

LAPOLA, D. M.; MARTINELLI, L. A.; PERES, C. A.; OMETTO, J. P.; FERREIRA, M. E.; NOBRE, C. A.; JOLY, C. A. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Clim. Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 01//print 2014. ISSN 1758-678X.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; SALAZAR, L. F. Regional climate change cenarios in South America in the Late XXI Century: projections and expected impacts. **Nova Acta**, p. 251-265, 2010.

MARTIUS, C. F. P. V. 1824. **Die Physiognomie des Pflanzenreiches in Brasilien**. Eine Rede, gelesen in der am 14. Gehaltnen Sitzung der Königlichen Bayerischen Akademie der Wissenschaften. München, Lindauer. 1824.

MAZZETTO SILVA, C. E. **O cerrado em disputa: apropriação global e resistências locais**. CONFEA, 2009.

MILLER, J. D.; THODE, A.E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). **Remote Sens. Environ.** 2007, 109, 66–80.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Áreas Protegidas**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas>. Acesso em: 06 de janeiro de 2017.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403(6772), 853-858. (2000).

NEPSTAD, D. C.; MOREIRA A. ALENCAR, A. A. **A Floresta em Chamas: Origens, Impactos e Prevenção de Fogo na Amazônia**. Programa Piloto para a Proteção das Florestas Tropicais no Brasil, Brasília, Brasil. 1999.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 422 p.

NOGUEIRA NETO, P. **Conservação da Natureza do Cerrado**. IV Simpósio sobre o Cerrado. Ed. Itatiaia, Belo Horizonte, 1977. P. 349-352.

NOOJIPADY, P.; MORTON, C. D.; MACEDO, N. M.; VICTORIA, C. D.; HUANG, C., GIBBS, K. H.; BOLFE, L. E. Forest carbon emissions from cropland expansion in the Brazilian Cerrado biome. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 025004, 2015.

PEDRINI, H.; SCHAWARTZ, W. R. **Análise imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações**. São Paulo, Thomson Learning, 2008.

PEREIRA E. F.; Santos, J. D.; Kageyama, P. Y.; Hardt, E. Florística e fitossociologia dos estratos arbustivo e arbóreo de um remanescente de cerradão em uma Unidade de Conservação do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, n. 3, p. 533-544, 2004.

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 (1), 2008. pg. 77 – 84.

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

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 2009. 127p. Editora Parêntese.

RATTER, J.A.; RIBEIRO, J. F.; BRIDGEWATER, S. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Annals of Botany**, London, v.80. p. 223-235, 1996.

REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S.T. Solos do bioma Cerrado. In: SANO, S.; ALMEIDA, S. P. (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília: Embrapa Cerrados, 1998 p.47-86.

REMMEL, T. K.; PERERA, A. H. Fire mapping in a northern boreal forest: assessing AVHRR/NDVI methods of change detection. **Forest Ecology and Management**, v. 152, n. 1, p. 119-129, 2001.

RIBEIRO, J. F.; SANO, S. M.; MACEDO, J.; SILVA A. J. da. **Os principais tipos fitofisionômicos da região dos cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1983.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Brasília, Embrapa Cerrados, 1998. p.87-166.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (eds.). **Cerrado: Ambiente e Flora**, p. 87-166. Planaltina: EMBRAPA CPAC, 2008.

RICHARDS, P. W. **The tropical rain forest: an ecological study**. Cambridge University Press, 1976. 451 p.

ROBINSON, J. M. Fire from space: Global fire evaluation using infrared remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v.12, n. 1, p. 3-24, 1991.

ROY, D. P.; LEWIS, P. E.; JUSTICE, C. O. Burned area mapping using multitemporal moderate spatial resolution data-a bi-directional reflectance model based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 263–286, 2002.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, n. 34, p. 1-7, 2007.

SANTANA, V. M. de. **Encurtamento da cadeia produtiva do arroz no município de lagoa da confusão**: estudo de caso. Dissertação de mestrado. Universidade Vale do Rio dos Sinos. P.93 2016.

- SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. São Paulo: Hucitec, 1996. 308 p.
- SANTOS, M. A. D., BARBIERI, A. F., DE CARVALHO, J. A. M., & MACHADO, C. J. **O cerrado brasileiro: notas para estudo**. Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais. 2010.
- SANTOS, P. R.; PEREIRA, G.; ROCHA, L. C. Análise da distribuição espacial dos focos de queimadas para o bioma Cerrado (2002-2012). **Caderno de Geografia - PUC Minas**, v. 24, n. 1, p. 133-142, 2014.
- SCHEPERS, L.; HAEST, B.; VERAVERBEKE, S.; SPANHOVE, T.; VANDEN BORRE, J.; GOOSSENS, R. Burned area detection and burn severity assessment of a heathland fire in Belgium using airborne imaging spectroscopy (APEX). **Remote Sensing**, v. 6, n. 3, p. 1803-1826, 2014.
- SETZER, A.; MORELLI, F.; RIVEIRA-LOMBARDI, R. Estimativa Quinzenal de Áreas Queimadas In: In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Ed.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. Arêntese, 2007. P. 403-415.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.29, p.16-20, 1991.
- SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**, v. 1, p. 69-88, 2008.
- SOARES, J. V.; BATISTA, G. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensor MODIS: Histórico e Descrição In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Ed.) **O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. Arêntese, 2007. p. 03-22.
- TAVARES, C. E. C. Análise da competitividade da cadeia produtiva da soja em Mato Grosso. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, Ano XIV, N.3, P.75-84, 2005.
- TEIXEIRA, C. G. **Validação do Modelo Linear de Mistura Espectral em Imagens ASTER/TERRA a partir de dados Ikonos**. 2004. 127 p. (INPE-13183-TDI/1029). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Landsat Missions: Frequently Asked Questions about the Landsat Missions. Disponível em: http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php. Acesso em: 03 de julho de 2016.
- WALTER, H. **Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global**. São Paulo: pedagógica e universitária Ltda., 1986. 325 p.

WARMING, E. **Lagoa Santa**. São Paulo: EDUSP/Belo Horizonte: Itatiaia, 1982. 284p. (Original de 1892. Inclui “A vegetação de cerrados brasileiros” por M.G.Ferri, 1892).

WILCOVE, D.S.; MCLELLAN, C.H.; DOBSON, A. P. Habitat fragmentation in the temperate zone. In SOULÉ, M. E. (Ed.) **Conservation biology, the Science of scarcity and diversity**. Sunderland: Sinauer Associates, 1986. P. 237-258.