

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA**

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS NA APA DE ALTER DO CHÃO

MENDELL DE SALES SOUZA

Santarém-PA, Setembro/2017

Mendell de Sales Souza

**DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE
QUEIMADAS NA APA DE ALTER DO CHÃO**

ORIENTADORA: DRA. SUSAN ARAGÓN CARRASCO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Recursos Naturais da Amazônia, junto ao Programa de Pós- Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Naturais da Amazônia.

Área de concentração: Estudos e Manejo de Ecossistemas Amazônicos.

Santarém-PA, Setembro/2017

DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS NA APA DE ALTER DO CHÃO

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais, Área de concentração: Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos. Aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Naturais da Amazônia, nível mestrado, da Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, em 26 de setembro de 2017.

Prof. Dr. Troy Patrick Beldini (UFOPA)
Coordenador do PPGRNA

Apresentada à Comissão Examinadora, integrada pelos Professores:

Prof. Dr. Rodrigo Ferreira Fadini (UFOPA)
Examinador 1

Prof. Dr. Mauricio Torres (UFOPA)
Examinador 2

Prof. Dr. Thiago Jose de Carvalho André (UFOPA)
Examinador 3

Profa. Dra. Susan Aragón Carrasco (UFOPA)
Orientadora

Santarém, 26 de Setembro/2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CAMPUS RONDON - UFOPA
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: Nome

10,0 cm (deve ser colocada no verso da folha de rosto)

0000 Souza, Mendell.

Distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas na APA de Alter
do Chão. - Santarém, 2017.

58 páginas.

Bibliografia.

Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Oeste do Pará, 2017.

Orientadora: Susan Aragón Carrasco.

1. Focos de queimadas 2. Sensoriamento remoto 3. Alter do Chão

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que no princípio criou os céus e a terra.

Agradeço à minha família, principalmente à minha esposa e ao meu filho pela mansidão na minha ausência.

Agradeço à Dra. Susan Aragón por compartilhar seus conhecimentos.

Agradeço aos membros da banca por sua paciência.

Agradeço aos discentes do PPGRNA pelo companheirismo.

Agradeço aos docentes do PPGRNA que ministraram aulas que mostraram as carências e as lacunas da pesquisa brasileira.

Agradeço aos desenvolvedores dos aplicativos (LibreOffice, Mendeley, QGIS, BioEstat e Past) gratuitos utilizados neste projeto.

Agradeço às instituições de pesquisas brasileiras (INPE e INMET) e estadunidenses (NOAA e USGS) que propiciaram os dados históricos.

Agradeço ao meu empregador (Ibama) por permitir o meu afastamento funcional por três meses para capacitação.

E agradeço a todos os colegas que de forma pontual ou contínua iluminaram o caminho para a conclusão deste trabalho.

SOUZA, Mendell. **Distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas na APA de Alter do Chão**. 2017. 57 páginas. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia. Área de concentração: Estudos e Manejo de Ecossistemas Amazônicos - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2017.

RESUMO

As atividades antrópicas a partir do século XX têm alterado paisagens com uso do fogo, cujo regime, no clima tropical, é presente nas superfícies das savanas e ausente nas florestas úmidas, as quais representam estados alternativos da vegetação perturbada pelo fogo (bi-estabilidade). A APA de Alter do Chão em Santarém-PA é a área do estudo da distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas que foram correlacionados com variáveis ambientais (precipitação, umidade relativa, temperatura do ar, ONI e AMO). Sendo a correlação forte só com o ONI. Os focos de queimada foram localizados considerando as alterações de três décadas na cobertura do solo classificadas a partir de imagens de sensoriamento remoto usando uma classificação supervisionada (algoritmo da distância mínima) usando o *Semi-automatic Classification Plugin* do QGIS. Em 19 anos (1998-2016) foram registrados 276 focos de queimadas na APA, sendo dezembro o mês com maior número de focos de queimadas. No ano de 2015 foi registrado o maior valor histórico dos focos de queimadas (89). Em 30 anos (1986-2016) foram destruídos 2.367,3 ha de floresta e 1.422,4 ha de savana na APA de Alter do Chão, perfazendo 22,9% da cobertura do solo. A correlação entre os focos de queimadas em áreas de savana e em áreas desmatadas é forte.

Palavras-chave: Focos de queimadas. Sensoriamento remoto. Alter do Chão

SOUZA, Mendell. **Distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas na APA de Alter do Chão**. 2017. 57 páginas. Dissertação de Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia. Área de concentração: Estudos e Manejo de Ecossistemas Amazônicos - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, Santarém, 2017.

ABSTRACT

Anthropic activities from the twentieth century have altered landscapes using fire, which theoretically would be present on the savanna surfaces and absent in the rainforests, this represent alternative states of vegetation disturbed by fire (bi-stability). The APA of Alter do Chão in Santarém-PA is the area of study of the spatial-temporal distribution of hotspots that were correlated with environmental variables (precipitation, relative humidity, air temperature, ONI and AMO). A strong correlation was only found with ONI. Hotspots were located considering changes over three decades on soil cover, classified using remote sensing imagens using a supervised classification (minimum distance algorithm) by the Semi-automatic Classification Plugin of QGIS. In 19 years (1998-2016), 276 hotspots were registered in the APA, with December being the month with the highest number of hotspots. 2015 registered the highest historical number of hotspots (89). In 30 years (1986-2016) 2,367.3 ha of forest and 1,422.4 ha of savanna were destroyed in the APA of Alter do Chão, making 22.9% of soil cover. The correlation between hotspots in savanna and deforested areas is strong.

Keywords: Hotspots. Remote sensing. Alter do Chão.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii e iii
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	iv
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
1.2 OBJETIVOS	8
1.2.1 Objetivo Geral	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	10
2.2 COLETA DE DADOS	12
2.2.1 Focos de queimadas	13
2.2.2 Variáveis metereológicas	15
2.2.3 <i>Oceanic Niño Index e Atlantic Multidecadal Oscillation</i>	16
2.2.4 Aquisição de imagens	20
2.3 ANÁLISE DE DADOS	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 CLASSIFICAÇÃO	40
3.2 MAPA DE CALOR	46
3.3 SOBREPOSIÇÃO COM O CAR	49
4 CONCLUSÃO	52
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores anuais das variáveis ambientais partir de dados do INPE, INMET e da NOAA.	18
Tabela 2 – Focos de queimadas por missão.	20
Tabela 3 – Características das bandas do sensor TM.	21
Tabela 4 – Características das bandas do sensor OLI TIRS a partir de dados do USGS.	23
Tabela 5 – Relatório de classificação da APA de Alter do Chão (imagem <i>Landsat 5</i> órbita/ponto 227/62 de 17 de outubro de 1986).	40
Tabela 6 – Relatório de classificação da APA de Alter do Chão (imagem <i>Landsat 8</i> órbita/ponto 227/62 de 4 de novembro de 2016).	40
Tabela 7 – Indica as alterações da cobertura do solo e das interferências na APA de Alter do Chão num intervalo de trinta anos.	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudo: APA de Alter do Chão a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA, do IBGE (2010) e <i>RapidEye</i> (2015).	11
Figura 2 – Distribuição dos focos de queimadas acumulados por mês num período de 19 anos (1998-2016) a partir de dados do INPE.	29
Figura 3 – Temperatura máxima média e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	30
Figura 4 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da temperatura máxima média (°C) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	31
Figura 5 – Precipitação total e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	32
Figura 6 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da precipitação total média (mm) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	33
Figura 7 – Umidade relativa média e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	34
Figura 8 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da umidade relativa média (%) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.	35
Figura 9 – Índice Niño oceânico e focos de queimadas a partir de dados do INPE e da NOAA.	36
Figura 10 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função do índice El Niño e dos focos de queimadas a partir de dados do INPE e da NOAA.	37
Figura 11 – Classificação da cobertura do solo na APA de Alter do Chão em 1986 a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA e do USGS.	38
Figura 12 – Classificação da cobertura do solo na APA de Alter do Chão em 2016 a partir de dados do USGS.	39
Figura 13 – Percentual da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 1986 a partir de dados do USGS.	42

Figura 14 – Percentual da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 2016 a partir de dados do USGS.	43
Figura 15 – Mapa de calor a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA, do INPE e do USGS.	44
Figura 16 – Focos de queimadas por cobertura do solo e índice El Niño a partir de dados do USGS e da NOAA.	44
Figura 17 – Sobreposição dos polígonos CAR a partir de dados da Semas-PA, Prefeitura de Santarém-PA e do USGS.	47
Figura 18 – Focos de queimadas por cobertura do solo e ONI a partir de dados do USGS e da NOAA.	48
Figura 19 – Sobreposição dos polígonos CAR a partir de dados da Semas-PA, Prefeitura de Santarém-PA e do USGS.	51

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

- AMO** – *Atlantic Multidecadal Oscillation.*
- APA** – *Área de Proteção Ambiental.*
- ENSO** – *El Niño Southern Oscillation.*
- ESA** – *European Space Agency.*
- GOES** – *Geostationary Operational Environmental Satellites.*
- IBGE** – *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*
- INMET** – *Instituto Nacional de Meteorologia.*
- INPE** – *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.*
- MODIS** – *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer.*
- NASA** – *National Aeronautics and Space Administration.*
- NOAA** – *National Oceanic and Atmospheric Administration.*
- NPP** – *National Polar-orbiting Partnership.*
- NWS** – *National Weather Service.*
- OLI** – *Operational Land Imager.*
- ONI** – *Oceanic Niño Index.*
- SCP** – *Semi-automatic Classification Plugin.*
- SEMAS** – *Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade.*
- SST** – *Sea Surface Temperature.*
- TM** – *Thematic Mapper.*
- USGS** – *United States Geological Survey.*
- VIIRS** – *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite.*

1 INTRODUÇÃO GERAL

Apresento este trabalho com intuito de contribuição para as ciências ambientais na área de concentração Estudos e Manejo de Ecossistemas Amazônicos. A linha de pesquisa é denominada Processos de Interação da Biosfera e Atmosfera que abrange o estudo e a descrição ambiental das relações que caracterizam o clima da Amazônia e os processos físico-químicos existentes na interação solo-planta-atmosfera, moderados por fatores fisiológicos e ambientais que dominam as trocas de energia e água nos ecossistemas amazônicos.

Nesta dissertação busquei atingir plena convergência com a linha de pesquisa, considerando minha experiência profissional e lacunas do conhecimento sobre os recursos naturais da Amazônia, as quais motivaram perguntas relacionadas à energia e água da biosfera e da atmosfera, sendo: Qual a relação dos focos de queimadas com as variáveis ambientais? Qual a relação dos focos de queimadas na savana e nas áreas desmatadas?

A área de estudo que delimita os ecossistemas analisados é a Área de Proteção Ambiental (APA) de Alter do Chão no município de Santarém no Oeste do Pará, caracterizada pela presença de ecótonos entre floresta e savana, sob condições ambientais muito semelhantes, distribuídos em um mosaico de fragmentos de vegetação com um certo grau de ação antrópica recente.

Nesta pesquisa as variáveis utilizadas consistem em dados históricos de institutos de pesquisas brasileiros e internacionais que disponibilizam informações atmosféricas, como os focos de queimadas, indicados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a partir do comparativo de imagens digitais, resultantes das ondas eletromagnéticas refletidas pela Terra, via sensores remotos em missões satélites internacionais à centenas de quilômetros do nível do mar.

Outras variáveis da atmosfera empregadas foram registradas na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no município de Belterra no Oeste do Pará, à apenas quinze quilômetros do centróide da APA municipal de Alter do Chão. Esta estação, através de séries históricas sobre temperatura, precipitação e umidade, indica características do clima regional que

auxiliam no manejo dos ecossistemas e em estimativas do risco de queimadas.

Neste estudo também foram adotados os índices *Oscillation Niño Index* (ONI) e *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), disponibilizados pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), que quantificam os processos de oscilação da temperatura da superfície do oceano (*Sea Surface Temperature* (SST)) no Pacífico e no Atlântico respectivamente, visto que a bibliografia indica associação da seca amazônica à estes eventos, assim como aponta a vulnerabilidade dos recursos naturais da Amazônia ao fogo durante estas oscilações da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico.

A literatura não só indica que estudos mais complexos sobre distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas carecem de informação da cobertura do solo e da atividade antrópica, mas também que dados de sensoriamento remoto são profícuos e cada vez mais disponíveis para análise da Amazônia domesticada. O *United States Geological Survey* (USGS) propicia dados históricos da cobertura do solo da APA de Alter do Chão, cujas reflexões do espectro eletromagnético foram coletadas pelos sensores à 705 quilômetros de altitude nas missões *Landsat*.

Neste trabalho foram exploradas todas as bandas espectrais reunidas pelo sensor *Thematic Mapper* (TM) em 17 de outubro de 1986, exceto a termal, as quais foram processadas no *Semi-automatic Classification Plugin* (SCP) do sistema de informação geográfica *QGIS*, assim como as bandas eletromagnéticas de 2 a 7 recebidas pelo sensor *Operational Land Imager* (OLI) em 4 de novembro de 2016. Os indicativos da estrutura e da dinâmica da cobertura do solo foram derivados deste processamento de dados do sensoriamento remoto.

A aplicação do conceito de bi-estabilidade da vegetação perturbada pelo fogo, cujo regime no clima tropical, é presente na superfície de savana e ausente na floresta umida, as quais representam estados alternativos, foi fundamental para o reconhecimento e indicação dos focos de queimadas sobre desmatamento, em análise conjunta com a classificação da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 2016.

Não foi só o entendimento de que no clima tropical o regime do fogo é ausente na floresta e presente na superfície de savana que incutiu os métodos analíticos deste trabalho, mas também a noção de que é imprescindível a interação

entre vegetação seca, fonte de inflamação e condições da atmosfera propícias ao fogo para que ocorra uma queimada. Uma atuação isolada das variáveis ambientais mesmo que em condições secas não provocam queimadas, pois é necessária uma fonte de inflamação. Portanto foi elegido o teste não paramétrico denominado Correlação de Spearman para os métodos estatísticos, no qual não há projeção de padrão de classificação e de parâmetros, e que permite uma análise da variação conjunta entre duas séries cronológicas, temporais, evolutivas ou históricas. Uma característica deste pesquisa é o estudo retrospectivo, que é longitudinal no qual os dados a serem investigados estão em registros anteriores e há fixação da área de estudo e do fenômeno estudado dos focos de queimadas.

Em 19 anos (1998-2016) foram registrados 276 focos de queimadas na APA, de Alter do Chão, sendo dezembro o mês com maior número de focos de queimadas. No ano de 2015 foi registrado o maior valor histórico dos focos de queimadas (89).

Os relatórios de classificação das coberturas do solo da APA de Alter do Chão em 1986 e 2016 permitiu uma análise quantitativa das coberturas do solo inicial e final da área de estudo. Para análise espacial foi elaborado um mapa de calor com a localização da série histórica dos focos de queimadas sobre a imagem de 2016 com isso foi possível ratificar via série histórica o entendimento das três circunstâncias imprescindíveis para a ocorrência das queimadas. Em 30 anos (1986-2016) foram destruídos 2.367,3 ha de floresta e 1.422,4 ha de savana na APA de Alter do Chão, perfazendo 22,9% da cobertura do solo. A correlação entre os focos de queimadas em áreas de savana e em áreas desmatadas é forte.

Os processos de interação da energia eletromagnética com ecossistemas terrestres amazônicos foram estudados, interpretados e descritos, via sensoriamento remoto, visando inferir a estrutura e a dinâmica destes ecossistemas numa análise conjunta com o histórico dos focos de queimadas, correlacionando estes com as variáveis ambientais que caracterizam o clima e que são utilizadas para estimativa do risco de queimadas.

Foram feitas sugestões sobre o manejo da APA de Alter do Chão e indicativos do Cadastro Ambiental Rural como fonte de dados de informações geográficas do uso e ocupação do solo nesta unidade de conservação municipal.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Podemos dizer a respeito da distribuição espacial e variabilidade interanual do fogo na Amazônia que:

Evidências a partir de observações de carvão sugerem baixa frequência de eventos de fogo causadores de alteração das florestas amazônicas no período anterior ao século vinte. Entretanto, a distribuição espacial e temporal do fogo mudou drasticamente nas últimas décadas. O fogo tornou-se uma das forças motrizes do uso da terra e da mudança da cobertura vegetal na Amazônia. A crescente intervenção humana na região, juntamente com anomalias climáticas, expuseram as florestas tropicais a um número sem precedentes de fogos em vegetação com consequências importantes para o funcionamento do complexo sistema amazônico e concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa. (SCHROEDER et al., 2009)

Nas últimas décadas, devido ao uso do fogo nas atividades humanas na terra e às extraordinárias estiagens, tem sido causados impactos negativos para biodiversidade pela maior susceptibilidade das florestas tropicais à recorrentes queimadas (SILVEIRA et al., 2015), que passaram a ameaçar a sustentabilidade de algumas paisagens, devido à ampliação do uso do fogo entre humanos, cujas atividades passaram a domesticar alguns ecossistemas e a transformar processos naturais (PAUSAS; KEELEY, 2009).

A interação humana com a natureza, segundo a ecologia humana de paisagens, gera a paisagem, cujo entendimento dos efeitos do padrão espacial nos processos ecológicos é estudado pela ecologia de paisagens (METZGER, 2001), um dos objetivos é descrever a distribuição espacial de fragmentos florestais (PIROVANI et al., 2014), para desenhar melhores estratégias de conservação fundamentadas em evidências científicas.

A conservação, gestão e antecipação dos impactos das alterações ambientais resultam do imprescindível entendimento da dinâmica espaço-temporal do fogo que influencia entre outros processos a propagação do fogo em diferentes ecossistemas (MORALES et al., 2015) como a savana e a floresta de clima tropical, que são estados alternativos de estabilidade, determinados principalmente por retroalimentações com o fogo (HOFFMANN et al., 2009), cuja dinâmica ocorre nas camadas de arbustos ou de árvores de média biomassa e nas camadas de ervas perenes (formação vegetal aberta) (MAGNUSSON et al., 2008). Nos mosaicos de

savanas e florestas, a interferência antrópica vem configurando o ambiente, influenciado principalmente pela interação entre a transformação do solo pela agricultura em grande escala, a expansão da infraestrutura (estradas e loteamentos) e as queimadas descontroladas (CARVALHO; MUSTIN, 2017).

O fogo é um componente funcional chave dos ecossistemas de savana e é um poderoso preditor da cobertura por árvores, que pode indicar a diferença entre a floresta e os ecossistemas de savana (ABADES; GAXIOLA; MARQUET, 2014), pois o fogo pode transformar a composição das espécies, a diversidade e a estrutura da vegetação de savana, alterando assim as taxas de crescimento e mortalidade (REIS et al., 2015). Embora a distribuição da vegetação no clima tropical tenha sido tradicionalmente explicada pelo clima e solo, tipos de vegetação contrastantes ocorrem frequentemente como mosaicos com fronteiras nítidas sob condições ambientais muito semelhantes (DANTAS et al., 2016), e sob o regime de fogo como a savana e a floresta da APA de Alter do Chão.

As queimadas desempenharam um papel determinante na distribuição, composição e estrutura de muitos ecossistemas em todo o mundo e as mudanças climáticas são amplamente consideradas como um dos principais impulsionadores das futuras mudanças no regime do fogo (PAUSAS; KEELEY, 2014). As projeções de respostas da vegetação às mudanças climáticas nas partes secas da Amazônia, requerem mais do que a estimativa do poder atribuído ao clima global e devem incluir também as interações dos eventos climáticos extremos, com a mudança no uso da terra e o regime do fogo (BRANDO et al., 2014).

A futura intensificação da seca na Amazônia resultante das alterações climáticas pode provocar um aumento de atividade do fogo, da mortalidade de árvores e das emissões de carbono para a atmosfera através de grandes áreas da Amazônia (DUFFY et al., 2015). Os efeitos prejudiciais das queimadas na biodiversidade, na precipitação, na dinâmica da circulação atmosférica, na saúde humana, na estrutura da floresta, na biomassa e no estoque de carbono têm sido reconhecidos na literatura (FONSECA et al., 2015). Além disso, a queima de biomassa é uma fonte considerável de poluição atmosférica, que inclui o dióxido de carbono, o maior responsável pelo efeito estufa (VEDOVATO et al., 2015) cujo alcance é planetário.

Com os indicativos de perturbação das queimadas na biosfera e atmosfera, o fogo está se tornando uma força motriz de alterações ambientais na Amazônia, onde a intensificação do regime do fogo é esperada, considerando as previsões de redução da precipitação e da cobertura florestal (GUTIÉRREZ-VÉLEZ et al., 2014).

A maior parte dos índices de risco de incêndio utiliza parâmetros meteorológicos (principalmente precipitação, umidade relativa e temperatura do ar) para determinar as condições da vegetação, pois medidas diretas de umidade de vegetação são complexas e requerem custosas amostragens espaciais (NARCISO, 2009).

No início de 1998, os incêndios de Roraima e o desmatamento foram considerados de baixo impacto quando comparados às queimadas catastróficas que a Amazônia está sujeita numa conjuntura de aumento da frequência de eventos El Niño (NEPSTAD; MOREIRA; ALENCAR, 1999), que levaram a anos secos na Amazônia, e poderiam contribuir para futuros aumentos na frequência de queimadas, indicando as mudanças climáticas (BARBOSA; FEARNSSIDE, 2005).

A danificação de florestas no ano de 1999 foi uma ordem de grandeza maior do que a danificação durante o El Niño no período de 1997-1998 (MORTON et al., 2011), cujo aumento da atividade de fogo emitiu cerca de $\frac{2}{3}$ do CO₂ atmosférico planetário e das anomalias de aerossóis durante o período de 1997 a 2001 (DE ARAÚJO; FERREIRA; ARANTES, 2012). A Amazônia oriental é mais vulnerável ao fogo durante o El Niño, enquanto que a porção sul e sudoeste é mais relacionada ao *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) (CHEN et al., 2011).

Durante as rigorosas estiagens nos anos de El Niño, a umidade do solo na Amazônia brasileira atinge valores alarmantes tornando a floresta suscetível às queimadas (SCHROEDER et al., 2009), que são recorrentes em paisagens fragmentadas sujeitas às influências das mudanças climáticas causadas por uma forte ENSO (ALENCAR et al., 2011). As atividades antrópicas vem alterando o estado vegetacional alternativo (bi-estabilidade) original guiado pelo fogo, gerando queimadas mais frequentes do que o esperado pela teoria da ecologia do fogo sobre a bi-estabilidade (PAUSAS, 2015a), que no clima tropical é exemplificada pelo regime do fogo que é presente nas coberturas de savana e ausente nas de florestas úmidas (PAUSAS, 2015b).

A ausência do fogo na floresta é devida a alta densidade atingida pela camada de árvores, o que torna a densidade das gramíneas insuficiente para permitir a propagação efetiva do fogo, cujo manejo, deve ser acoplado a outros fatores (pastagem e desbaste mecânico) para reduzir a densidade das árvores nas paisagens (ACCATINO et al., 2016). Só quando a floresta é alterada o desmatada é que se pode apresentar queimadas nela.

A distribuição de savana e florestas ocorrem como mosaicos contrastantes e nítidos tem sido explicada pelo clima e solo, embora sob condições ambientais muito semelhantes (DANTAS et al., 2016), assim como a savana e a floresta tropical que representam estados alternativos de estabilidade determinados principalmente pelas retroalimentações com o fogo (HOFFMANN et al., 2009). As retroalimentações guiadas pelo fogo poderiam ter consequências relevantes dentro da extensão da vida útil humana, insinuadas pela reação veloz da savana ao fogo (HOFFMANN, 2002), que no clima tropical é imprescindível na dinâmica das fronteiras entre floresta e savana e frequentemente vem mantendo uma estabilidade entre o avanço e o recuo da floresta (HOFFMANN; ORTHEN; DO NASCIMENTO, 2003).

Foi observado que a avaliação da dinâmica dos regimes de fogo na Amazônia domesticada pelas ações antrópicas é vantajosa a partir de dados de sensoriamento remoto (MORTON et al., 2013), os quais são representados por imagens digitais que foram submetidas a uma classificação semiautomática (um tipo de classificação supervisionada), que é uma técnica de processamento de imagem que permite a identificação de materiais em uma imagem, de acordo com as suas assinaturas espectrais (CONGEDO, 2016). Os dados sobre o uso do solo a partir de sistemas de informações geográficas estão cada vez mais disponíveis e também podem ser derivados de dados de sensoriamento remoto (STOJANOVA et al., 2012), assim como os focos de queimadas cujos estudos mais complexos sobre a distribuição espaço-temporal necessitam do conhecimento da atividade antrópica e da cobertura do solo na área de ocorrência das queimadas (MATAVELI; CHAVES, 2014).

Para que uma queimada aconteça, é necessário um processo de interação entre três circunstâncias: a presença de vegetação seca; uma fonte de inflamação; e condições da atmosfera favoráveis ao fogo (SILVA; DE MORISSON, 2014), que se tornará mais frequente e generalizado na Amazônia à medida que as fontes de

inflamação se dispersam com o avanço da ocupação humana (DE RESENDE et al., 2014).

A potencial redução da prevalência de queimadas através da promoção de modos de vida sustentáveis e gestão de recursos pelas áreas protegidas, indica a imprescindibilidade das unidades de conservação nas estratégias de proteção das florestas e áreas de importância ambiental (CARMENTA et al., 2016). Todavia a execução do objetivo de conservação regional é comprometida pela criação de unidades que nem sempre é precedida de estudos técnicos e/ou socioambientais (SILVA et al., 2013).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é descrever a distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas na APA de Alter do Chão (APA) no período de 1998 a 2016, sendo a frequência dos focos de queimadas descrita e correlacionada com variáveis ambientais, e a energia eletromagnética refletida pela área de estudo submetida à uma classificação da cobertura do solo semiautomática via classificação de imagens de sensoriamento remoto.

1.2.2 Objetivos Específicos

Descrever a frequência dos focos de queimadas na APA de Alter do Chão, correlacionando estes com as variáveis ambientais, sendo estas meteorológicas (temperatura máxima média, precipitação total e umidade relativa média) e índices de medidas das oscilações dos oceanos Pacífico sul e Atlântico norte.

Classificar a cobertura do solo na APA de Alter do Chão via sensoriamento remoto de modo supervisionado e semiautomático, para que sejam localizados os focos de queimadas (1998-2016) por cobertura do solo, e correlacioná-los considerando as transformações da vegetação num período de 30 anos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

A APA de Alter do Chão foi criada pela lei municipal nº. 17.771 de 2 de Julho de 2003 no município de Santarém no Oeste do Pará e compreende uma área de 16.180 hectares, delimitada ao norte e ao oeste pela margem direita do rio Tapajós. O limite sul coincide com a APA Aramanaí e o igarapé Jurutuí, e ao leste faz fronteira com a Gleba Mojui dos Campos.

A Área de Proteção Ambiental (APA) foi instituída pelo governo federal a partir do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) na Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000.

Constitui o grupo das unidades de uso sustentável e é comumente um território extenso, com atividade antrópica evidente, que possui características abióticas, bióticas, estéticas ou culturais notadamente imprescindível para a qualidade de vida e o bem-estar da população humana.

É formada por terras públicas e particulares, que estão sujeitas às normas de utilização e assim como na Reserva Particular do Patrimônio Natural a zona de amortecimento não é obrigatória.

Numa APA é prevista a realização de pesquisas científicas, que independe de aprovação prévia e sujeitas à fiscalização do órgão gestor, assim como como a Reserva Particular do Patrimônio Natural, e visitação pública nas áreas sob domínio comum, condicionadas pelo órgão gestor da unidade. Nas áreas sob propriedade privada, cabe ao proprietário estabelecer as condições para pesquisa e visitação do público, considerando as exigências e restrições legais.

A APA será disposta de um conselho presidido pelo órgão responsável por sua gestão e formado por agentes de instituições públicas, organizações da sociedade civil e representantes da população residente.

Alguns dos objetivos da APA de Alter do Chão são: estimular a pesquisa científica e a conservação de valores culturais, históricos e arqueológicos; acompanhar e disciplinar ao longo do tempo as interferências no meio ambiente; manter paisagens e atributos culturais relevantes; e assegurar o caráter sustentável

de ação antrópica na região (SANTARÉM, 2016).

Os propósitos essenciais de uma Área de Proteção Ambiental são proteger a biodiversidade, corrigir o sistema de ocupação e garantir o atendimento das demandas do presente sem comprometer o futuro.

A APA de Alter do Chão é uma unidade de conservação municipal de uso sustentável coberta por uma área relativamente pequena de savana próxima à vila de Alter do Chão, onde se acumulam grande parte dos estudos sobre savanas amazônicas desenvolvidos no Brasil (CARVALHO; MUSTIN, 2017)

O ano é dividido em dois períodos climáticos distintos na APA de Alter do Chão, sendo os primeiros seis meses o período da estação chuvosa, e o último semestre é caracterizado pela estação seca (DA SILVA; FELIPPE-BAUER; OKADA, 2010).

Esta sazonalidade é uma peculiaridade da área de estudo, assim como a presença de ecossistemas, sob condições ambientais muito semelhantes, entre floresta e savana distribuídas em um mosaico de fragmentos de vegetação com um certo grau de ação antrópica.

Dentre as atividades que evidenciam o antropismo na APA de Alter do Chão estão os festivais peculiares que expressam a cultura regional, sendo os mais famosos, o festival profano religioso do Sairé, e o da comunidade tradicional Borari de Alter do Chão.

Estas manifestações culturais alavancam o turismo regional, proporcionando uma considerável atividade econômica durante os festivais. No restante do ano Alter do Chão é palco de manifestações globais como o carnaval e *reveillon*, que também são relevantes economicamente para a população de Alter do Chão. A população de Alter do Chão atualmente é representada por comunidades tradicionais e não tradicionais, com interações temporais com a cobertura do solo antagônicas, muitas vezes indicadas como conflitos territoriais.

A APA de Alter do Chão (Figura 1) é dotada de uma paisagem feérica com atributos ecológicos, paisagísticos, culturais, históricos e arqueológicos relevantes, que são evidências das ações antrópicas no passado e onde atualmente com o uso do fogo, os processos naturais são transformados e a paisagem continuamente domesticada.

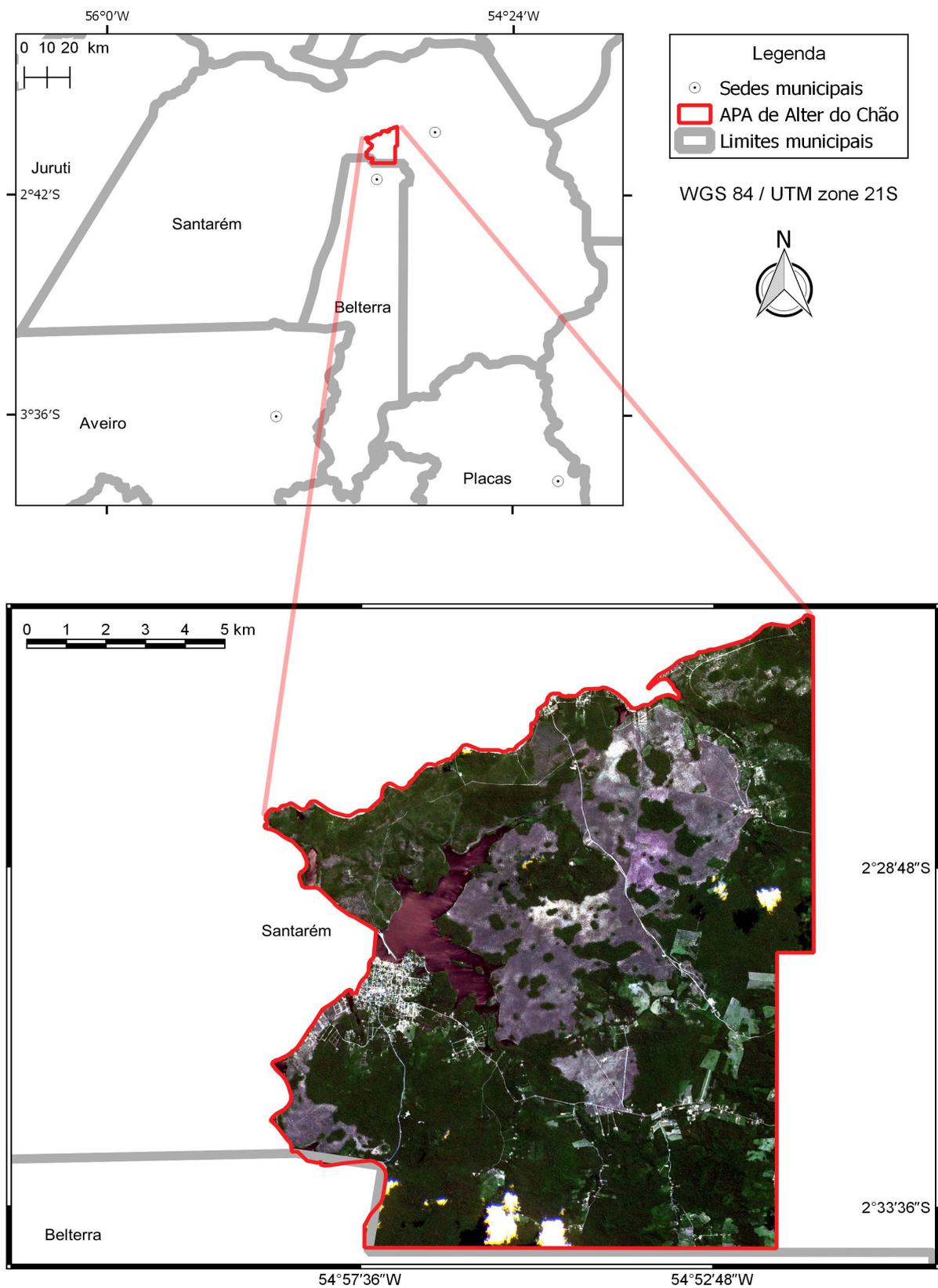


Figura 1 – Área de estudo: APA de Alter do Chão a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA, do IBGE (2010) e RapidEye (2015).

2.2 Coleta de dados

Foram coletadas as variáveis que consistem em dados históricos de institutos de pesquisas brasileiros e internacionais que disponibilizam informações atmosféricas, como os focos de queimadas, indicados pelo INPE a partir do comparativo de imagens digitais, resultantes das ondas eletromagnéticas refletidas pela Terra, via sensores remotos em missões satélites internacionais à centenas de quilômetros do nível do mar. (Fonte: <https://landsat.usgs.gov/>).

Outras variáveis da atmosfera coletadas foram registradas na estação meteorológica do INMET no município de Belterra no Oeste do Pará, à apenas quinze quilômetros do centróide da APA municipal de Alter do Chão. Esta estação, através de séries históricas sobre temperatura, precipitação e umidade, indica características do clima regional que auxiliam no manejo dos ecossistemas e em estimativas do risco de queimadas.

Neste estudo também foram coletados os índices ONI e AMO, disponibilizados pela NOAA, que quantificam os processos de oscilação da temperatura da superfície do oceano (*Sea Surface Temperature* (SST)) no Pacífico e no Atlântico respectivamente, visto que a bibliografia indica associação da seca amazônica à estes eventos, assim como aponta a vulnerabilidade dos recursos naturais da Amazônia ao fogo durante estas oscilações da temperatura da superfície dos oceanos pacífico e atlântico.

A literatura não só indica que estudos mais complexos sobre distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas carecem de informação da cobertura do solo e da atividade antrópica, mas também que dados de sensoriamento remoto são profícuos e cada vez mais disponíveis para análise da Amazônia domesticada, os quais foram coletados a partir do USGS que propicia dados históricos da cobertura do solo da APA de Alter do Chão, cujas reflexões do espectro eletromagnético foram recebidas pelos sensores à 705 quilômetros de altitude nas missões *Landsat*. (Fonte: <https://landsat.usgs.gov/>). Também se obteve dados do cadastro rural (CAR) para ter uma forma de avaliar o avanço das propriedades privadas na região. Estes dados se foram obtidos a partir da Semas-PA que disponibilizou polígonos CAR.

Os dados sobre os focos de queimadas, registrados a partir de 1998, foram

coletados anualmente até o ano de 2016, assim como as informações das variáveis ambientais, e as imagens *Landsat*, sendo a mais antiga (1986) e recente (2016) com menor interferência de nuvens, foram coletadas para inferência da estrutura e dinâmica da área de estudo.

2.2.1 Focos de queimadas

O Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) oferece sem custo dados de queimadas úteis para regiões remotas que não são continuamente monitoradas, ou seja, não abrigam estações. Neste estudo foram utilizadas as coordenadas geográficas dos focos de queimadas em séries mensais a partir de 1998 até 2016.

Uma estratégia decisiva para a criação de planos de prevenção e de combate às queimadas é o conhecimento de quando, como e onde os incêndios acontecem (GONTIJO et al., 2011) Os focos de queimadas detectados pelo INPE numa série histórica de 19 anos localizam 80% dos focos num raio de 1 km.

Os dados de focos de queimadas foram adquiridos no sítio eletrônico do INPE, a partir do Banco de Dados de Queimadas (BDQueimadas) <https://prodwww-queimadas.dgi.inpe.br/bdqueimadas/>, foram exportados dados de focos de queimadas no formato shapefile do município de Santarém-PA, disponibilizados a partir do mês de junho de 1998 até 31 de dezembro de 2016.

O INPE utiliza todos os satélites que possuem sensores óticos operando na faixa espectral termal-média de 4 micrômetros. Atualmente são processadas operacionalmente, na Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) as imagens AVHRR/3 dos satélites polares NOAA-15, NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B, as MODIS dos NASA TERRA e AQUA, as VIIRS do NPP-Suomi, e as imagens dos satélites geoestacionários, GOES-13 e MSG-3.

Cada satélite de órbita polar produz pelo menos dois conjuntos de imagens por dia, e os geoestacionários geram várias imagens por hora, sendo que no total são processadas mais de 200 imagens por dia para detecção dos focos de queima da vegetação. (<http://www.inpe.br/queimadas/informacoes/perguntas-frequentes>)

No continente sulamericano segundo o INPE, a partir das imagens GOES são detectadas as queimadas por algoritmos baseados nos limites espectrais da luz

visível, do infravermelho e do infravermelho médio, que indica a emissão termal e a reflexão solar na Terra.

A temperatura de brilho satura a 70 °C no canal do infravermelho médio. A porcentagem de luz solar refletida no espectro visível é o albedo, que quando menor que 3%, temperatura de brilho maior que 35 °C no infravermelho médio e maior que -10 °C no infravermelho, e a diferença entre estas é maior que 16 °C, considera-se queimada na detecção noturna simples.

O erro de localização dos focos de queimadas é de aproximadamente 400 m na média. Num raio de 1 km das coordenadas do foco concentram-se 80% dos focos com desvio padrão de aproximadamente 3 km.

Segundo o aviso de mudança de satélite de referência do INPE:

A partir de 22/Agosto/2011, o satélite de referência deixou de ser o NOAA-15 (sensor AVHRR) e passou a ser o AQUA (sensor MODIS). O satélite de referência é aquele cujos dados de focos de queima de vegetação são utilizados para comparações temporais no monitoramento do INPE. Nos dados dos relatórios automáticos atuais, a série AQUA abrange o período de 10/Agosto/2007 em diante. Para a série de dados de referência, manteve-se os focos NOAA-12 de 01/Julho/1998 até 09/Agosto/2007. Esta alteração para o AQUA decorreu de limitações e degradação na qualidade das imagens do NOAA-15, que apresentam muito ruído devido a restrições em sua antena transmissora, impedindo o monitoramento da região mais norte e noroeste do País. Desta forma, em termos de impacto nos dados de focos, com o AQUA o norte do Amazonas e do Pará, Roraima e Acre passam a ter cobertura regular e, portanto, mais adequados nas comparações temporais. De maneira geral, os focos nas imagens AQUA são em número maior que os do NOAA-15, porém mantendo a mesma distribuição espacial e a mesma variação percentual ao longo do tempo que os do NOAA-15 (exceto no norte e noroeste do País). Por último, os focos NOAA-15 continuam sendo gerados pelo INPE e incluídos no SIG-Queimadas (BDQ) para consulta e aplicação pelos usuários que preferirem sua base de focos. (INPE, 2011)

Os dados são disponibilizados em séries diárias, localizados no município de Santarém-PA, foram agrupados em intervalos anuais desde 1998 até 2016. Foram selecionados todos os satélites [AQUA_M-T (referência), TERRA_M-M, TERRA_M-T, AQUA_M-M, GOES, GOES-16, NOAA-15 Noite, NOAA-15 Manhã, NOAA-18 Tarde, NOAA-18 Manhã, MSG-03, METOP-B, NOAA-19 Tarde, NOAA-19 Manhã, NPP VIRS_700m e NPP VIRS_375m].

Segundo (EOS, 2017), AQUA é uma missão satélite da NASA *Earth Science* que coleta informações sobre o ciclo da água na Terra, abrangendo nuvens,

precipitação e umidade do solo, e de modo adicional outras variáveis estão sendo medidas como fluxo de energia radiativa e cobertura vegetal do solo.

Na missão TERRA, segundo (NASA, 2017a) são três os instrumentos para monitoramento de queimadas, o *Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), e o *Multi-angle Imaging Spectroradiometer* (MISR).

Conforme (NOAA, 2014), o *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) possuem órbita geossíncrona no plano equatorial da Terra a 35.800 quilômetros de altitude, o que permite uma visão do disco completo da Terra.

O NOAA-15, segundo a (NASA, 2017b) era um satélite operacional, em órbita polar (inclinação de 98,7°) num período de 101,2 minutos em altitude entre 808 a 824 quilômetros, operado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

O NOAA-18, segundo a (NASA, 2017c) continua a quarta geração da série de satélites meteorológicos de órbita polar operacional (inclinação de 98,74°) num período de 102 minutos em altitude entre 847 a 866 quilômetros, operados pelo *National Environmental Satellite Service* (NESS) da NOAA.

O *Meteosat Second Generation 3* (MSG-03) também conhecido como *Meteosat-10*, conforme o (PROJECT, 2015) fornece imagens do disco Terra completo e dados para previsões meteorológicas, a uma altitude de 36.000 quilômetros.

O *Meteorological Operational satellite programme B* (METOP-B), segundo a (ESA, 2012) é o segundo dos três satélites METOP de órbita polar obtidos pela *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) via *European Space Agency* (ESA).

A missão *National Polar-orbiting Partnership* (NPP), conforme a (NASA, 2017d) contém o sensor *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) (NOAA, 2017) que possui 22 bandas de imagem e bandas radiométricas que abrangem os comprimentos de onda de 0,41 a 12,5 microns.

2.2.2 Variáveis meteorológicas

Foram analisados os atributos de temperatura máxima média em graus

Celsius (°C), precipitação total em milímetros (mm) e umidade relativa média em porcentagem (%), os quais são indicativos da condição atmosférica, que é uma das três circunstâncias que devem ser interadas para que uma queimada aconteça (SILVA; DE MORISSON, 2014).

A maior parte dos índices de risco de incêndio utiliza parâmetros meteorológicos (principalmente precipitação, umidade relativa e temperatura do ar) para determinar as condições da vegetação, pois medidas diretas de umidade de vegetação são complexas e requerem custosas amostragens espaciais (NARCISO, 2009).

Os dados foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep> no sítio eletrônico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram exportadas séries históricas de dados mensais da estação convencional operante 82246 (longitude: 54,95 W; latitude: -2,63 S) localizada na sede do município de Belterra-PA a 175,74 metros de altitude, datadas a partir de 1º de janeiro de 1998 até 31 de janeiro de 2016.

Para correlação anual com os focos de queimadas foi calculada a média anual das variáveis ambientais: temperatura máxima média, precipitação total e umidade relativa média. Não foram atribuídos pesos que ponderem os períodos climáticos distintos (estação seca e chuvosa).

Nos dados mensais de temperatura máxima média no ano de 1998, não há registros nos meses de fevereiro a abril, e no ano de 1999 não há registros nos meses de maio a agosto. Devido a estas lacunas os dados de temperatura máxima média dos anos de 1998 e 1999 foram descartados na análise de correlações com os focos de queimadas.

Além das variáveis analisadas, o BDMEP disponibiliza os números de dias com precipitação, que foi descartado por apresentar uma série incompleta (registro até dezembro de 2013), principalmente pela ausência de informações mais recentes do ano de 2015, que possui dados com valores extremos de focos de queimadas que motivaram este estudo.

2.2.3 Oceanic Niño Index e Atlantic Multidecadal Oscillation

O centro de previsão climática estadunidense disponibiliza a série histórica do *Oceanic Niño Index* (ONI), que é uma medida do *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) representada pelo aumento da temperatura da superfície do mar e a diminuição dos ventos alísios assim como outros índices que podem confirmar se características consistentes com um fenômeno da interação oceano-atmosfera acompanham esses períodos de anomalia.

As secas na Amazônia são associadas com o *El Niño Southern Oscillation* (ENSO), mas elas também são influenciadas pelas anomalias da *Sea Surface Temperature* (SST) do Atlântico tropical relatadas como *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) (MARENGO et al., 2008). A Amazônia oriental é mais vulnerável ao fogo durante o El Niño, enquanto que a porção sul e sudoeste é mais relacionada ao *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) (CHEN et al., 2011). As porções sul e oriental na bacia amazônica são relativamente secas, com baixa precipitação anual e forte estação seca, enquanto o interior da Amazônia é mais úmido (NEPSTAD et al., 1994).

Os dados ONI dos anos de 1998 a 2016 foram adquiridos no sítio eletrônico http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml do *National Weather Service* (NWS) da NOAA, os quais são disponibilizados em série mensal e foram inseridos em gráfico a média por ano.

Os dados AMO dos anos de 1998 a 2016 foram obtidos no sítio eletrônico <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.data> da *Physical Sciences Division* (PSD) do *Earth System Research Laboratory* (ESRL) da NOAA.

As séries de dados são calculadas a partir do conjunto de dados Kaplan SST, que é atualizado mensalmente. É basicamente um índice das temperaturas do Atlântico norte cujas séries temporais são criadas em versões suavizada e não suavizada, cujos dados a partir de 1948 são produzidos para serem usados nas páginas da correlação das variáveis da média sazonal da reanálise do *National Centers for Environmental Predictions* (NCEP) com séries temporais de outros índices ambientais. (Fonte: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>).

Neste estudo foi adotado a versão não suavizada por ser a única com informações do ano de 2016 e não visa se aprofundar na metodologia que determina

os índices *Oscillation Niño Index* (ONI) e *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), pois estes são relacionados ao aquecimento global.

A NOAA, de maneira sintética indica que os índices quantificam os processos de oscilação da *Sea Surface Temperature* (SST) no Pacífico (ONI) e no Atlântico (AMO). A bibliografia indica associação da seca amazônica à estes eventos (MARENGO et al., 2008), assim como aponta a vulnerabilidade dos recursos naturais da Amazônia ao fogo durante estas oscilações da temperatura da superfície dos oceanos (CHEN et al., 2011) Pacífico e Atlântico.

Este estudo se propôs a utilizar os índices ONI e AMO com objetivo de identificar as correlações dos mesmos com o fenômeno objeto deste estudo que são os focos de queimadas. Ressalto que apesar de algumas informações restarem ocultas nos sítios eletrônicos, estas instituições de pesquisas brasileiras e estadunidenses representam os governos da sociedade e disponibilizam estes dados como oficiais.

Tabela 1 – Valores anuais das variáveis ambientais a partir de dados do INPE, INMET e da NOAA.

Ano	Focos	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	Umidade (%)	ONI	AMO
1998	0	-	101,51	84,55	-0,4	0,354
1999	0	-	175,53	88,42	-1,05	0,065
2000	2	30,27	186,63	88,72	-0,75	0,014
2001	8	30,89	145,78	87,32	-0,3	0,1475
2002	13	31,01	146,05	85,11	0,7	0,0555
2003	16	30,96	137,44	87,63	0,25	0,2165
2004	16	31,34	155,57	86,58	0,4	0,212
2005	6	31,49	169,55	85,03	0,1	0,2905
2006	13	31,25	183,49	86,35	0,05	0,301
2007	6	31,51	166,22	85,72	-0,35	0,1305
2008	0	31,35	200,49	87,60	-0,65	0,146
2009	15	31,46	202,97	86,02	0,45	0,066
2010	3	31,36	168,60	87,51	-0,65	0,3775
2011	10	31,03	185,14	88,03	-0,75	0,1025

2012	4	31,16	128,27	87,87	-0,15	0,167
2013	20	31,01	203,30	88,45	-0,3	0,135
2014	23	31,58	166,82	86,94	-0,05	0,063
2015	89	31,99	108,46	85,58	1,1	0,0905
2016	32	32,07	123,13	86,47	-0,1	0,3645

2.2.4 Aquisição de imagens

Foram adquiridas duas imagens Landsat da órbita/ponto 227/62 no sítio eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov/> do USGS. Foi selecionada a data com menor interferência de nuvens no ano de 1986 (Landsat 5 de 17 de outubro) assim como no ano de 2016 (Landsat 8 de 4 de novembro), as quais apresentam nos seus respectivos metadados a projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM) do *World Geodetic System* (WGS 84) na *Zone 21 North hemisphere* (Zona 21N), cujo código do *European Petroleum Survey Group* (EPSG) é 32621.

Em 1986 o sensor do LandSat 5 era o *Thematic Mapper* (TM) no modo *Scan Angle Monitor* (SAM). Em 2016, o sensor do LandSat 8 era o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal InfraRed Scanner* (TIRS).

No QGIS as imagens adquiridas foram pré-processadas e submetidas a classificações supervisionadas através do *Semi-automatic Classification Plugin* (SCP), onde foram classificadas quatro cores como coberturas do solo (floresta, savana, água e desmatamento) e duas cores como interferências (nuvem e sombra).

Finalmente cada um dos focos de queimadas foi localizado sobre a cobertura de solo correspondente: savana, floresta ou desmatamento. Os focos de queimadas no intervalo 1998 a 2016, localizados sobre a cobertura florestal na imagem classificada inicial do ano 1986, entraram nas estatísticas como focos em áreas desmatadas, considerando que o regime do fogo no clima tropical é ausente nas florestas úmidas (PAUSAS, 2015b).

Para indicar a distribuição espacial dos focos de queimadas na APA de Alter do Chão foram utilizadas imagens de sensoriamento remoto que foram classificadas e analisadas em conjunto com os focos de queimadas.

O registro mais antigo e com menor interferência de nuvens da cobertura do solo da APA de Alter do Chão utilizado neste estudo é encontrado nas imagens do

Land Remote-Sensing Satellite System (LandSat) que é uma iniciativa conjunta entre o USGS e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

A imagem Landsat 5 que indica a cobertura do solo inicial neste estudo, apresenta os seguintes metadados: sensor TM modo SAM às 13:07:44; cobertura de nuvens 5%; qualidade da imagem 9; azimute do sol 102.26348818; elevação do sol 55.77301407, As imagens do sensor TM consistem em seis bandas espectrais (1 a 5 e 7) com resolução espacial de 30 metros e uma banda termal (6) com resolução espacial de 120 metros (Tabela 2).

Tabela 2 – Características das bandas do sensor TM a partir de dados do USGS.

Bandas	Comprimentos de onda (micrometros)	Utilidades
1 Azul	0,45 – 0,52	Distinguir o solo da vegetação
2 Verde	0,52 – 0,60	Avaliar o vigor da vegetação
3 Vermelho	0,63 – 0,69	Discernir bordas da vegetação
4 Infravermelho próximo	0,77 – 0,90	Realçar conteúdos de biomassa e bordas
5 Infravermelho onda curta	1,55 – 1,75	Discernir conteúdos de solo e vegetação úmidos; e penetrar nuvens finas
6 Infravermelho termal	10,40 – 12,50	Mapear a temperatura e estimar a umidade do solo
7 Infravermelho onda curta	2,09 – 2,35	Distinguir rochas hidrotermicamente alteradas associadas a depósitos minerais

A imagem Landsat 8 que indica a cobertura do solo final neste estudo, apresenta os seguintes metadados: sensor OLI TIRS às 13:48:33; cobertura de nuvens 36,36%; qualidade da imagem OLI 9; qualidade da imagem TIRS 7; azimute do sol 120.62681685; elevação do sol 63.91036817. As imagens OLI TIRS consistem em onze bandas espectrais, cujas resoluções espaciais das bandas são:

30 metros (1 a 7 e 9); 100 metros (termais 10 e 11); e 15 metros (pancromática 8) (Tabela 3).

Tabela 3 – Características das bandas do sensor OLI TIRS a partir de dados do USGS.

Bandas	Comprimentos de onda (micrometros)	Utilidades
1 Ultra azul	0,435 – 0,451	Estudos de bordas e aerossóis
2 Azul	0,452 – 0,512	Distinguir solo da vegetação, e vegetação rasteira de árvores
3 Verde	0,533 – 0,590	Avaliar o vigor da vegetação
4 Vermelho	0,636 – 0,673	Discernir bordas da vegetação
5 Infravermelho próximo	0,851 – 0,879	Realçar conteúdos de biomassa e bordas
6 Infravermelho onda curta 1	1,566 – 1,651	Discernir conteúdos de solo e vegetação úmidos; e penetrar nuvens finas
7 Infravermelho onda curta 2	2,107 – 2,294	Aprimorar o discernimento de conteúdos de solo e vegetação úmidos e penetrar nuvens finas
8 Pancromática	0,503 – 0,676	Definir imagem mais nítida
9 Cirros	1,363 – 1,384	Aprimorar a detecção de contaminação por nuvens cirros
10 Infravermelho termal 1	10,60 – 11,19	Mapear a temperatura e estimar a umidade do solo
11 Infravermelho termal 2	11,50 – 12,51	Aprimorar o mapeamento da temperatura e a estimar a umidade do solo

2.3 Análises de dados

O estudo de correlação propicia um recurso de investigação do nível de

variação conjunta entre duas variáveis, as quais neste estudo não foi pré-determinada uma dependência estatística de classificação, caracterizando uma medida não paramétrica, visto que esta dissertação busca indicar a semelhança entre o fenômeno estudado (focos de queimadas) e as variáveis ambientais.

Neste estudo foi utilizado o teste não paramétrico denominado Correlação de Spearman, que visa indicar o nível de aproximação entre no mínimo duas variáveis de classe ordinal arranjadas em funções determinadas em duas séries, através do coeficiente de Spearman (r_s), que avalia com que intensidade a relação entre duas variáveis pode ser descrita pelo uso de uma função monótona (SPEARMAN, 1904).

Esta dissertação trata de um estudo retrospectivo, que é longitudinal no qual as informações a serem exploradas estão disponibilizados em registros anteriores, como os bancos de dados do INPE, INMET, USGS e NOAA, os quais possuem uma série cronológica, temporal, evolutiva ou histórica, na qual há variação do tempo e fixação da área de estudo e o fenômeno estudado.

As análises estatísticas foram realizadas através do algoritmo de correlação para o cálculo do coeficiente de correlação de Spearman, na aba Estatísticas do programa BioEstat 5.3, desenvolvido por um grupo de pesquisadores liderado pelo professor emérito da Universidade Federal do Pará Manuel Ayres no ano de 2007 e pelo software livre Past 3.17 desenvolvido por Øyvind Hammer da *University of Oslo*.

Os dados de focos de queimadas anuais foram correlacionados com os dados das médias anuais de temperatura máxima média, precipitação total, umidade relativa média, o ONI e AMO, gerando cinco coeficientes de correlação de Spearman (r_s), que assumem apenas valores entre menos um e um, sendo uma correlação perfeita quando $r=1$ (positiva) e $r=-1$ (negativa), e quando $r=0$ não há correlação.

Os dados dos anos de 1998 e 1999 da temperatura máxima média foram retirados da análise de correlação, pois não havia registro em alguns meses do ano, o que mascararia a média anual, atribuindo peso diferente a uma estação do ano.

Para qualificação dos coeficientes de correlação de Spearman foram denominadas cinco intensidades de correlação, sendo muito forte quando o valor absoluto do coeficiente de correlação é maior que 0,9 ($|r_s| > 0,9$), forte ($0,7 < |r_s| < 0,9$), moderada ($0,5 < |r_s| < 0,7$), fraca ($0,3 < |r_s| < 0,5$) e desprezível ($0 < |r_s| < 0,3$).

À Tabela 4 é indicada o número de focos de queimadas por missão satélite internacional, segundo o metadados do arquivo vetorial disponibilizado pelo INPE. Para análise conjunta dos dados raster e vetoriais, na qual foram verificadas as classes da cobertura do solo e seus respectivos focos de queimadas, foi utilizado um sistema de informação geográfica livre e aberto denominado QGIS, (QGIS, 2016), versão 2.14.15 – Essen.

Tabela 4 - Focos de queimadas por missão.

Focos de queimadas	Missão	% Acumulada 1998-2016
3	AQUA_M-M	1,09
69	AQUA_M-T	25,00
18	AQUA-T	6,52
1	ATSR	<0,01
1	GOES-10	<0,01
3	GOES-12	1,09
1	GOES-13	<0,01
23	NOAA-12	8,33
2	NOAA-15	0,72
4	NOAA-16	1,45
4	NOAA-18	1,45
2	NOAA-19D	0,72
29	NPP	10,51
75	NPP_375	27,13
5	TERRA_M-M	1,81
33	TERRA_M-T	11,96
2	TERRA-M	0,72
1	TERRA-T	<0,01
276	Total	

2.3.1. Pré-processamento e classificação das imagens

Os números digitais das imagens foram convertidos para as medidas físicas reflectância e a temperatura de brilho no topo da atmosfera (*Top Of Atmosphere* (TOA)), na aba *Preprocessing* da aba Landsat do SCP, onde foi executada a correção atmosférica *Dark Object Subtraction 1* (DOS1). Assim foram criados os

conjuntos de bandas das imagens *Landsat* corrigidas.

Na aba Vetor do QGIS foi investigado o polígono para extensão dos limites da APA de Alter do Chão, onde os conjuntos de bandas foram recortados na extensão do polígono investigado, utilizando a opção *Clip multiple rasters*.

Na aba *Band set* foram criadas as imagens dos conjuntos de bandas (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 para o Landsat 5 e bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 para o Landsat 8), através da seleção das configurações rápidas de comprimento de onda pré-determinadas.

Na aba Raster fora do complemento SCP, os conjuntos de bandas foram reprojatados para o EPSG 32721, que projeta o sistema de coordenadas para a área de estudo, e onde foram recortados nos limites da APA de Alter do Chão.

Novamente no complemento SCP, na aba SCP *Dock*, foram inseridos os conjuntos de bandas e o vetor treinamento da *Region Of Interesting* (ROI), que representa a parte supervisionada da classificação, pois é o conjunto de pontos, georreferenciados e validados para uma classificação desejada, que são atribuídos pelo usuário.

Na aba *Classification Dock* foram calculadas automaticamente as listas de assinaturas ROI, que representam as partes da imagem com assinaturas espectrais semelhantes. Na aba ROI *creation* foram definidas seis Macro Classes (MC ID/Info – floresta, savana, água, desmatamento, nuvem e sombra) e 179 Classes (C ID/Info).

O algoritmo de classificação selecionado foi o da Distância Mínima, no qual os pixels não são classificados se a distância for superior ao valor limiar. Foi definido também para o ROI: área mínima (Min) de 60 pixels; largura máxima (Max) de 100 pixels; e 0.05 unidades radiométricas do intervalo que define a distância espectral máxima entre o pixel semente e os pixels no entorno (Dist). Exceto para classificação das áreas desmatadas, na qual a área mínima (Min) foi definida em 10 pixels e a largura máxima (Max) em 20 pixels.

2.3.2. Pós-processamento das imagens

Na aba “Classification Report” no SCP, foi gerado o relatório de classificação do recorte das imagens Landsat 5 e 8 para APA de Alter do Chão, o qual indica o somatório de pixels por classe e a área em metros quadrados (m²) da cobertura do solo e interferências. A partir da análise comparativa dos relatórios de classificação

das imagens, foram reveladas as alterações quantitativas da cobertura do solo e interferências da área de estudo num período de trinta anos.

Todos os focos de queimadas oficiais disponíveis até 2016 foram anualmente localizados sobre a classificação da cobertura do solo inicial (1986), gerado pela classificação semi-automática, na qual há seis classes (água, nuvem, sombra, floresta, savana e desmatamento) para localização.

A partir de uma análise em conjunto do raster da cobertura do inicial com os focos de queimadas, foram localizados os focos sobre a cobertura do solo savana e antrópica, que foram correlacionados entre si, considerando as variações da cobertura do solo reveladas no relatório de classificação.

A reunião dos focos de queimadas com o raster da cobertura do solo final, gerou um mapa útil na análise espacial de dados pontuais. Foi possível visualizar a distribuição e a frequência dos focos de queimadas sobre a cobertura do solo recente da APA Alter do Chão.

2.3.3. Focos de queimadas sobre a floresta

Os focos de queimadas localizados sobre a cobertura do solo classificada como floresta no ano de 1986 foram contabilizados como focos de queimadas sobre a cobertura do solo desmatado, pois segundo Pausas (2015) no clima tropical úmido o regime do fogo é presente nas superfícies de savana e ausente nas florestas. Estes estados de vegetação alternativos ao regime (presença ou ausência) do fogo representa um exemplo de bi-estabilidade (PAUSAS, 2015a).

A ausência do fogo na floresta segundo Accatino (2016) é devida à insuficiente densidade das gramíneas em relação a alta densidade alcançada pela camada de árvores que impede a propagação efetiva do fogo, cujo manejo, deve ser acoplado a outros fatores (pastagem e desbaste mecânico) para reduzir a densidade das árvores nas savanas quando o propósito é conservar estas.

2.3.4. Mapa de calor

Também conhecido como Mapa de Densidade de Kernel ou simplesmente Mapa de Kernel, é uma ferramenta para análise espacial útil na visualização da concentração de dados do tipo ponto, podendo indicar a frequência de atividades

numa localidade. O termo Kernel significa núcleo na língua inglesa e é utilizado como referência para o método de estimação de curvas de densidades o qual indica os pontos contidos no entorno de um núcleo através da ponderação da distância (ACTION, 2017).

Através do complemento denominado Mapa de calor versão 0.2 de domínio do QGIS versão 2.14.15, foi criado um raster para os pontos vetoriais de entrada, que são 276 focos de queimadas registrados na APA de Alter do Chão entre os anos de 1998 e 2016. À saída do raster foi atribuído o *GeoTagged Image File Format* (GeoTIFF). Foi selecionado um raio de 500 unidades do mapa com 567 linhas, 500 colunas e forma do Kernel Epanechnikov, que é uma estimativa não paramétrica de uma probabilidade de densidade multivariada. Os valores de saída foram escalados pelo tamanho do Kernel.

Em relação ao estilo do raster, a renderização da banda foi do tipo banda simples cinza, onde o gradiente de cores foi de branco para preto, onde quanto mais escuro o raster gerado, maior é o número de pontos agrupados numa localidade. O contraste foi melhorado com a opção “estender para MinMax”, onde o contraste entre os valores máximos e mínimos dos pixels foi realçado. Os dados para renderização da cor são: modo de mistura normal, brilho -50, saturação -50, contraste 50 e escalas de cinza desligado. A transparência global definida foi de 40% cheio e sem valores de dados (0).

Para elaboração do mapa foi utilizado o raster gerado através do complemento do QGIS denominado Mapa de calor sobre a classificação da cobertura do solo no ano de 2016, cujo sistema de referência de coordenadas utilizado no projeto foi o sistema geodésico mundial definido no ano de 1984 (WGS84) e o sistema de coordenadas projetado usado foi UTM na zona 21 do hemisfério sul, cujo EPSG é 32721.

2.3.5. Cadastro Ambiental Rural (CAR)

O governo federal brasileiro estabeleceu o Cadastro Ambiental Rural (CAR) em 28 de maio de 2012, dispondo na esfera do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA) conforme Art. 29 da Lei nº 12.651/2012. Esta lei federal altera a Política Nacional de Meio Ambiente, e revoga as Leis nºs 4.771/1965

e 7.754/1989 que dispõem sobre o Código Florestal e sobre as medidas para proteção das florestas existentes nas nascentes dos rios, respectivamente.

O CAR é um arquivo público de domínio nacional imprescindível para todos os imóveis rurais, com a meta de reunir os dados ambientais das propriedades e posses rurais, desenvolvendo uma fonte de conhecimento para fiscalização, monitoramento, plano econômico-ambiental e combate ao desmatamento.

O matrícula do imóvel rural no CAR deve ser efetuada na secretaria ambiental municipal ou estadual, e é condicionada à identificação do proprietário ou possuidor rural, comprovação da propriedade ou posse, e georreferenciamento do imóvel via memorial descritivo contendo informações sobre vegetação nativa, Áreas de Preservação Permanente, Áreas de Uso Restrito, Reserva Legal e áreas consolidadas.

O registro no CAR é o primeiro ato para a regularidade ambiental do imóvel rural e não será julgado título para fins de confirmação do direito de propriedade ou posse, logo os polígonos do CAR são indicativos de propriedade, que são entregues de maneira declaratória à Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Estado do Pará (Semas-PA). Portanto esta dissertação utiliza estas informações geográficas apenas como indicativos que não atribuem responsabilidade sobre a terra.

A Semas-PA disponibilizou em formato shapefile declarações de propriedade recebidas a partir do ano de 2010 até o ano de 2015 no sítio eletrônico <http://car.semas.pa.gov.br/#/consulta/mapa>.

Os polígonos das propriedades declaradas no CAR à Semas-PA foram analisados em conjunto com o raster da cobertura do solo final (2016) da área de estudo. Isto representa um indicativo do uso e ocupação das propriedades privadas na APA de Alter do Chão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em 19 anos (1998-2016) foram registrados 276 focos de queimadas na APA de Alter do Chão, sendo que o maior valor histórico (89 focos) foi registrado em 2015 e o menor valor histórico (nenhum foco) nos anos de 1998, 1999 e 2008.

O mês de dezembro, que compreende a estação seca, é o mês com maior número de focos de queimadas, sendo 99 em 19 anos na APA de Alter do Chão (Figura 2). Nos meses de março e abril nunca foram registrados focos de queimadas.

A temperatura máxima média e os focos de queimadas (Figura 3), possuem fraca correlação. Em 2016 a temperatura máxima média atingiu o maior valor histórico (32,07 °C), um ano após o maior valor histórico de focos de queimadas, que foi um ano de temperatura máxima média extrema (31,99 °C) atingindo o segundo maior valor histórico.

A precipitação total e os focos de queimadas (Figura 5), possuem fraca correlação. A precipitação total atingiu o segundo menor valor histórico no ano de 2015 (108 mm) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro.

A umidade relativa média e os focos de queimadas (Figura 7), possuem fraca correlação. A umidade relativa média atingiu o quarto menor valor histórico no ano de 2015 (85,58%) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro.

O *Oceanic Niño Index* (ONI) e os focos de queimadas (Figura 9), possuem forte correlação. O ONI atingiu o maior valor histórico em 2015 (1,1) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro. O índice *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) e os focos de queimadas (Figura 11) apresentam uma correlação desprezível.

Numa série histórica de 19 anos (1998-2016) os resultados indicam que o ano de 2015 é um ponto fora da curva, pois registrou valores extremos para o fenômeno estudado. O mapa de calor à Figura 17 indica o esperado para a APA de Alter do Chão, visto que a variação da cobertura no espaço consiste na presença e na ausência de material seco.

3.1. Focos de Queimadas e variáveis ambientais.

A distribuição dos focos de queimadas acumulados por mês num período de 19 anos indica uma sazonalidade que acompanha dois períodos climáticos distintos, sendo a estação chuvosa de janeiro a junho, e a seca de julho a dezembro, o que

ratifica o esperado sobre queimadas e alerta sobre os maiores cuidados no final do ano. À Figura 2 foi indicado que o mês de dezembro, que compreende a estação seca, é historicamente a parte do ano civil mais crítica em relação à incêndios em quase duas décadas na APA de Alter do Chão, acumulando noventa e nove (99) focos de queimadas.

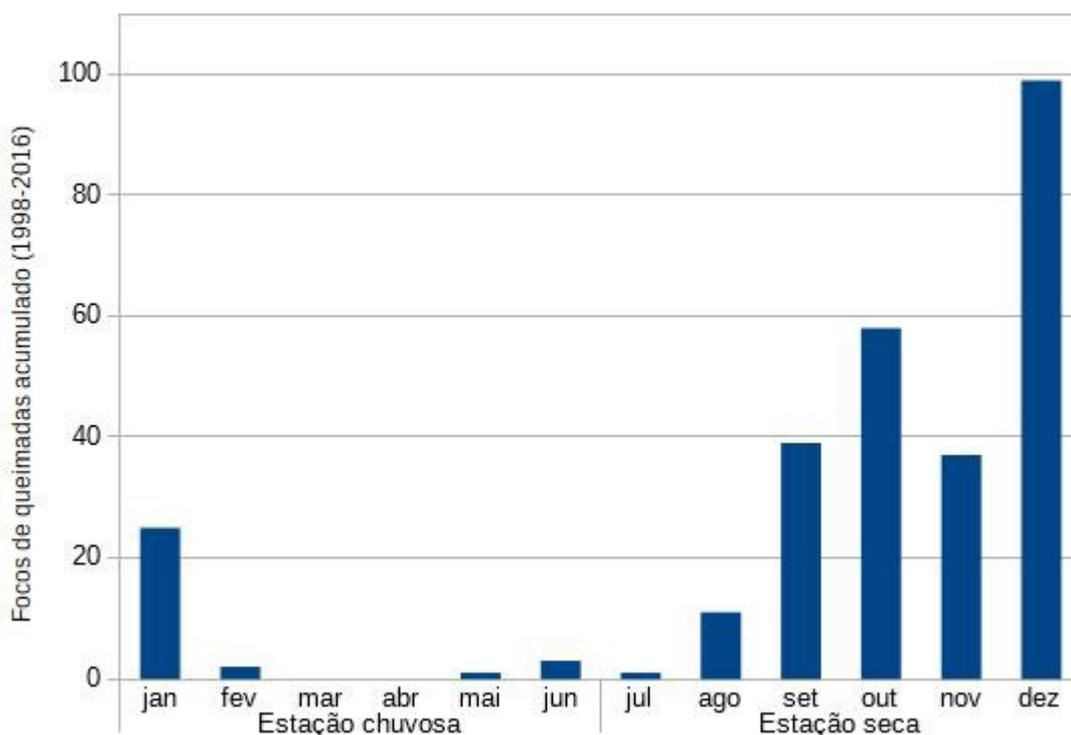


Figura 2 – Distribuição dos focos de queimadas acumulados por mês num período de 19 anos (1998-2016) a partir de dados do INPE.

De 1998 a 2016 não há registros de focos de queimadas nos meses de março e abril, que compreendem a estação chuvosa na área de estudo, os quais como indicado à Figura 2 são os meses menos críticos em relação às queimadas, seguidos por maio com um (1) foco, fevereiro com dois (2) focos e junho com três (3) focos. Há indicativo do mês de janeiro, que acumula vinte e cinco (25) focos de queimadas, compreender um período de transição entre as estações, assim como o mês de julho que acumula um (1) foco de queimada.

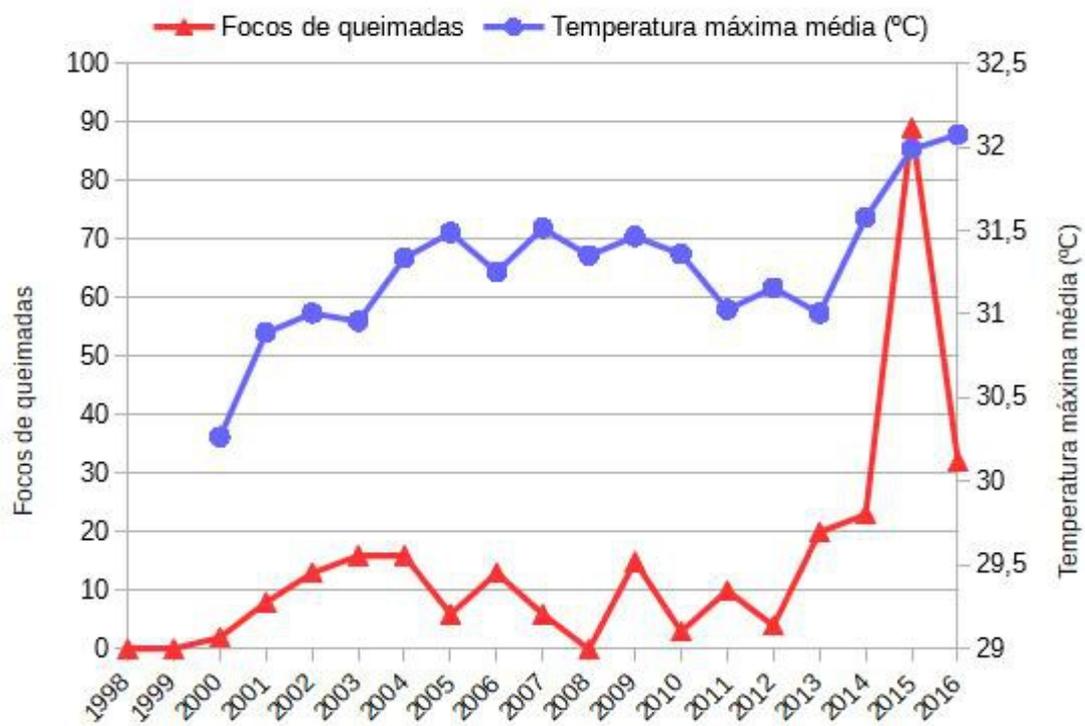


Figura 3 – Temperatura máxima média e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

Em 2016 a temperatura máxima média atingiu o maior valor histórico (32,07 °C), um ano após o maior valor histórico de focos de queimadas em 2015 (Figuras 3 e 4 e Tabela 1), que foi um ano de extremos, em relação à: temperatura máxima média (31,99 °C – segundo maior valor histórico); precipitação total (108,4 mm - segundo menor valor histórico); umidade relativa média (85,58 % - quarto menor valor histórico); e índice El Niño (1,1 – maior valor histórico).

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a 0,3364; e o nível de significância (p) igual a 0,1867. Estes resultados indicam um teste estatisticamente insignificante e que a correlação entre os focos de queimadas e a temperatura máxima média é fraca.

Os resultados indicam que apesar da temperatura representar a energia das moléculas da atmosfera, uma variação isolada da temperatura na APA de Alter do Chão não é determinante para a variação dos focos de queimadas, o que está em conformidade com o conceito da imprescindibilidade da interação das três circunstâncias (condições atmosféricas propícias ao fogo, fonte de ignição e presença de material seco) para a ocorrência de queimadas.

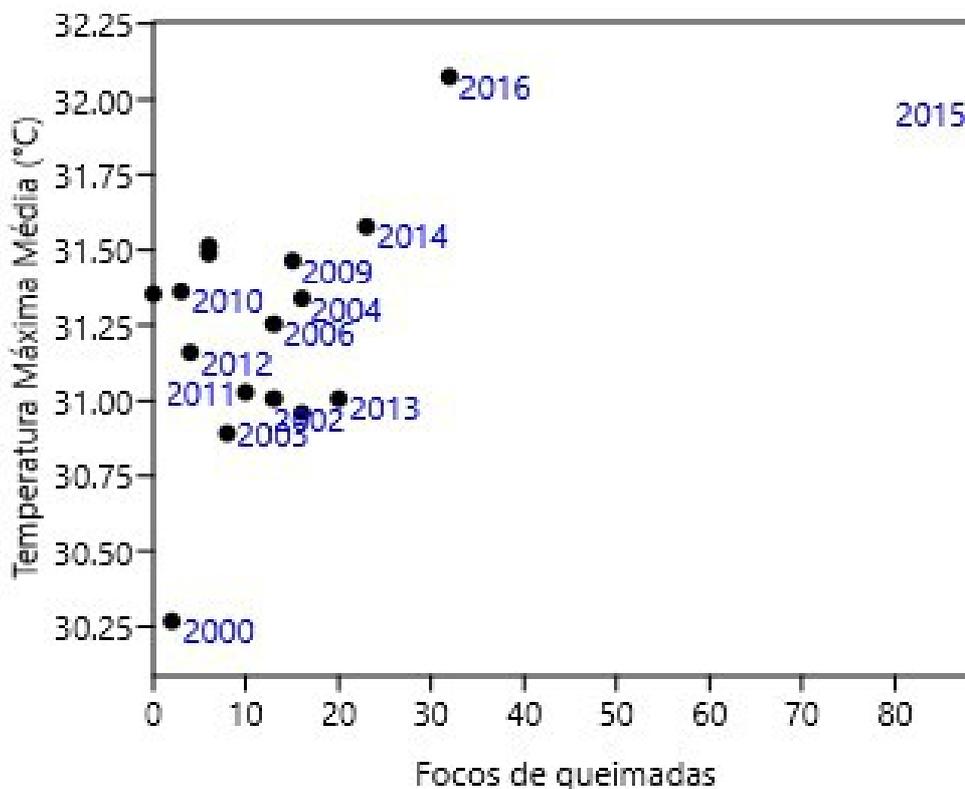


Figura 4 - Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da temperatura máxima média (°C) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

À figura 4 é demonstrativa que o ano de 2015 é um ano destacado dos demais na série histórica de 19 anos na APA de Alter do Chão.

Os focos de queimadas registrados no ano de 2015 representam 32% de todos os focos de queimadas já registrados na APA de Alter do Chão, entretanto em relação a temperatura máxima média não há o mesmo destaque, pois foi superado no ano seguinte.

O ano de 2016 é o que mais se aproxima do ano de 2015, entretanto apenas em relação a variável temperatura, pois apesar de 2016 ter registrado a temperatura máxima média mais alta da série histórica, neste ano os focos de queimadas reduziram em 64%.

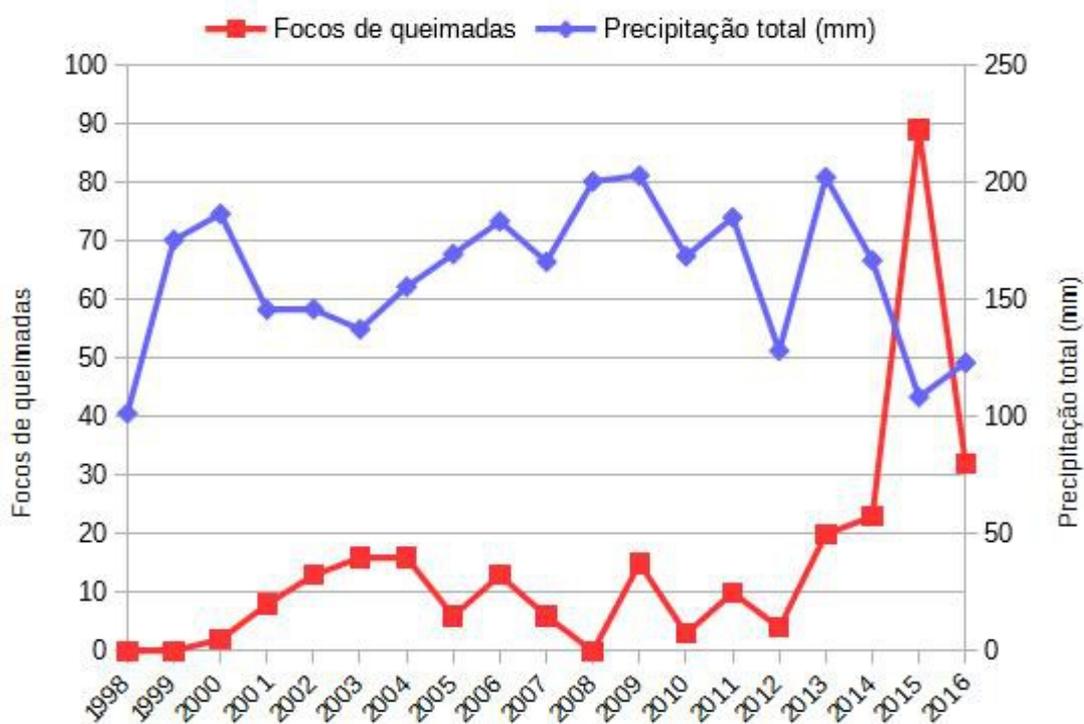


Figura 5 – Precipitação total e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

O menor valor histórico de precipitação total ocorreu no ano de 1998 (101 mm), no qual não há registro de focos de queimadas. O maior valor histórico de precipitação total foi registrado no ano de 2013 (202 mm), no qual foi registrado o quarto maior número de focos de queimadas (20 focos). A precipitação total atingiu o segundo menor valor histórico no ano de 2015 (Figuras 5 e 6 e Tabela 1) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro. Os resultados indicam que a variação da precipitação de maneira isolada não representa uma variação dos focos de queimadas.

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a -0,1874; e o nível de significância (p) igual a 0,4423. Estes resultados indicam um teste estatisticamente insignificante e que a correlação entre os focos de queimadas e a precipitação total é fraca.

À Figura 6, o ano de 2015 é mostrado em evidência aos demais, pois é o ano com o recorde de focos de queimadas e é o segundo mais seco em 19 anos. É também evidenciado que na série histórica, a maioria dos anos houve no máximo 20 focos por ano, conforme demonstra a concentração dos anos anteriores a 2014.

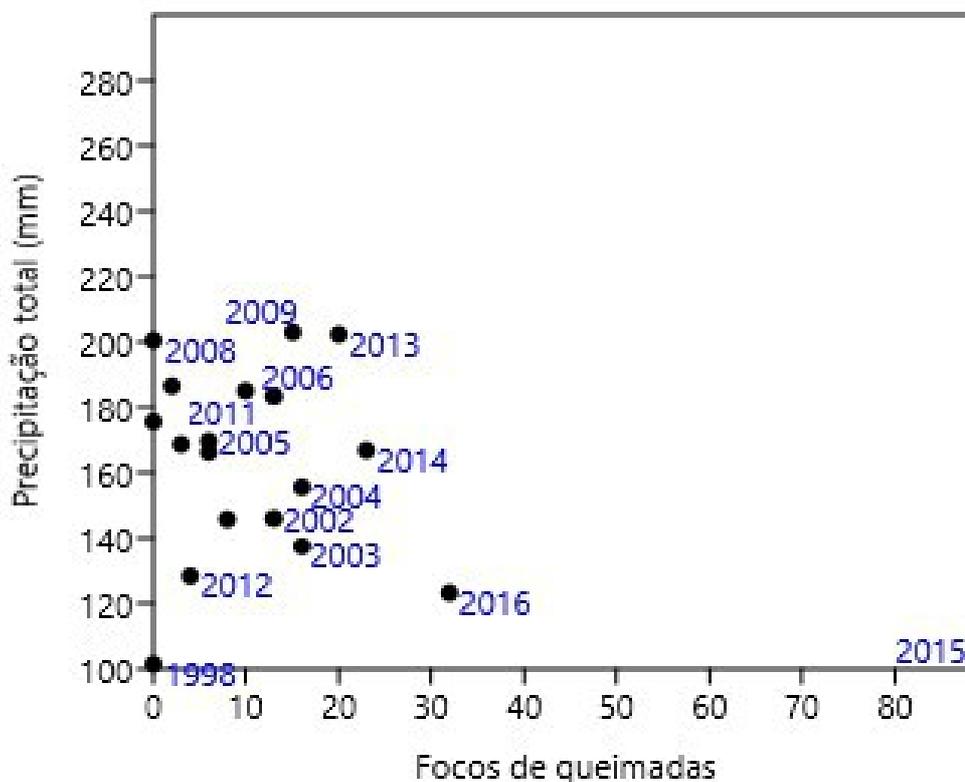


Figura 6 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da precipitação total média (mm) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

O ano de 2015 é considerado uma anomalia na história dos focos de queimadas, pois neste ano foram registrados quase quatro vezes mais focos de queimadas que o ano anterior (2014) e quase três vezes mais focos que o ano seguinte (2016).

Vale ressaltar também que no ano de 1998 houve menos precipitação do que o ano de 2015, entretanto não foram registrados focos de queimadas. E o ano de 2009, que é o recorde em precipitação, apresentou 15 focos de queimadas.

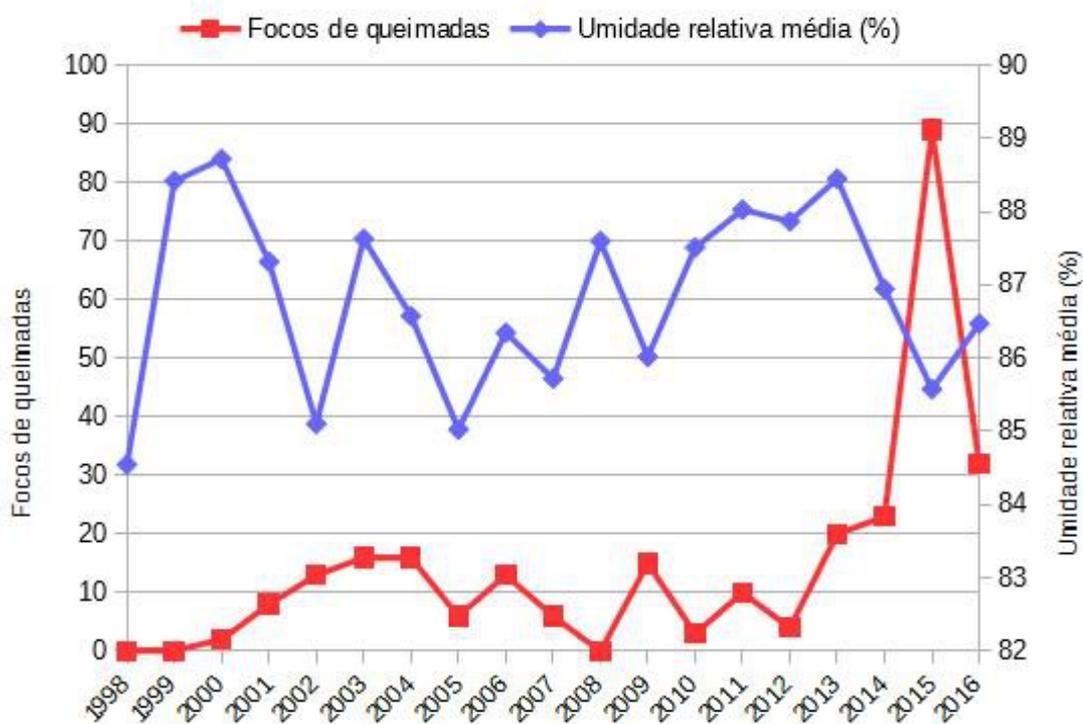


Figura 7 – Umidade relativa média e focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

A partir do demonstrativo acima foi possível visualizar as curvas que indicam o comportamento de uma variação meteorológica em conjunto com o registro de queimadas por ano.

A umidade relativa média atingiu o quarto menor valor histórico no ano de 2015 (Figura 7 e Tabela 1) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro. O menor valor histórico de umidade relativa média ocorreu no ano de 1998 (84,55%), no qual não há registro de focos de queimadas. O maior valor histórico de umidade relativa média foi registrado no ano 2000 (88,72%), no qual foi registrado o quarto menor valor histórico de focos de queimadas (2 focos).

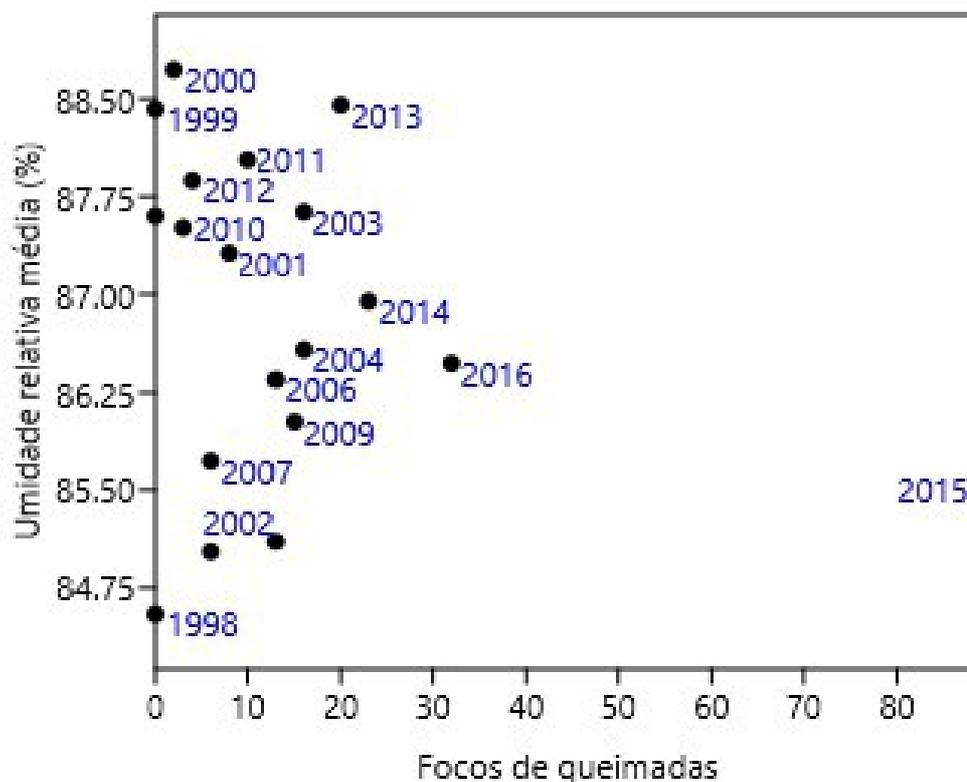


Figura 8 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função da umidade relativa média (%) e os focos de queimadas a partir de dados do INPE e do INMET.

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a -0,1689; e o nível de significância (p) igual a 0,4893. Estes resultados indicam um teste estatisticamente insignificante e que a correlação entre os focos de queimadas e a umidade relativa média é fraca.

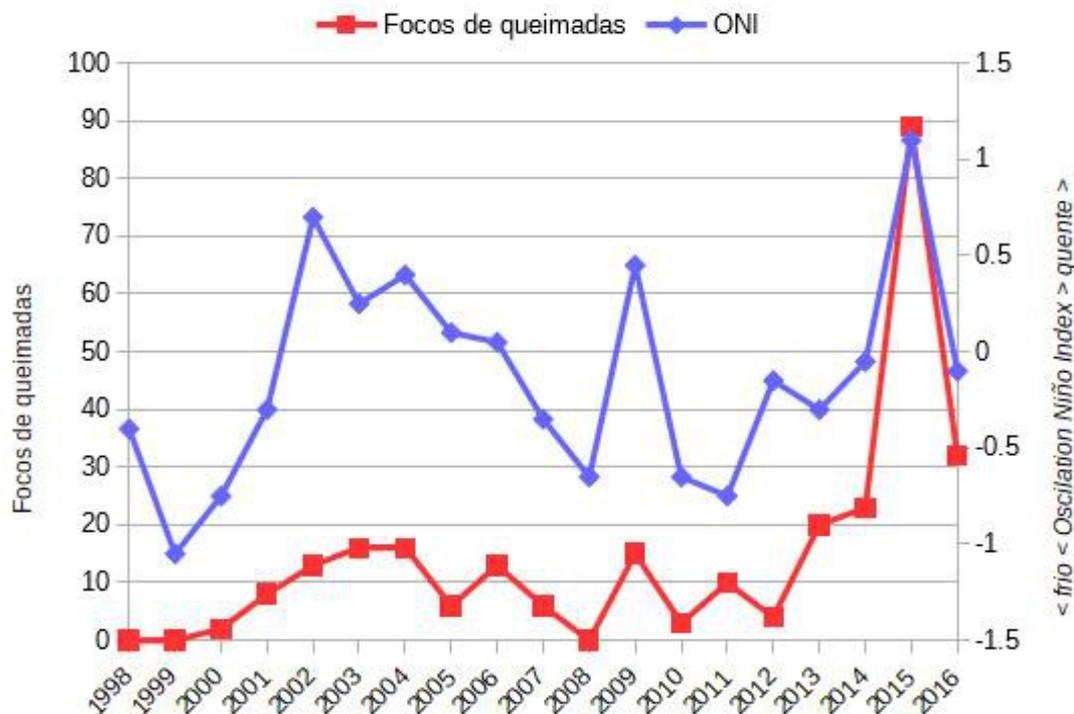


Figura 9 – *Oceanic Niño Index* (ONI) e focos de queimadas a partir de dados do NOAA e do INPE, respectivamente.

O *Oceanic Niño Index* (ONI) atingiu o maior valor histórico em 2015 (Figuras 9 e 10, e Tabela 1) e neste mesmo ano houve o maior número de focos de queimadas (89 focos) que se tem registro. O menor valor histórico do *Oceanic Niño Index* (ONI) foi registrado em 1999 (-1,05), no qual não há registro de focos de queimadas.

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a 0,7057; e o nível de significância (p) igual a 0,0007. Estes resultados indicam um teste estatisticamente significativo e que a correlação entre os focos de queimadas e o *Oceanic Niño Index* (ONI) é forte.

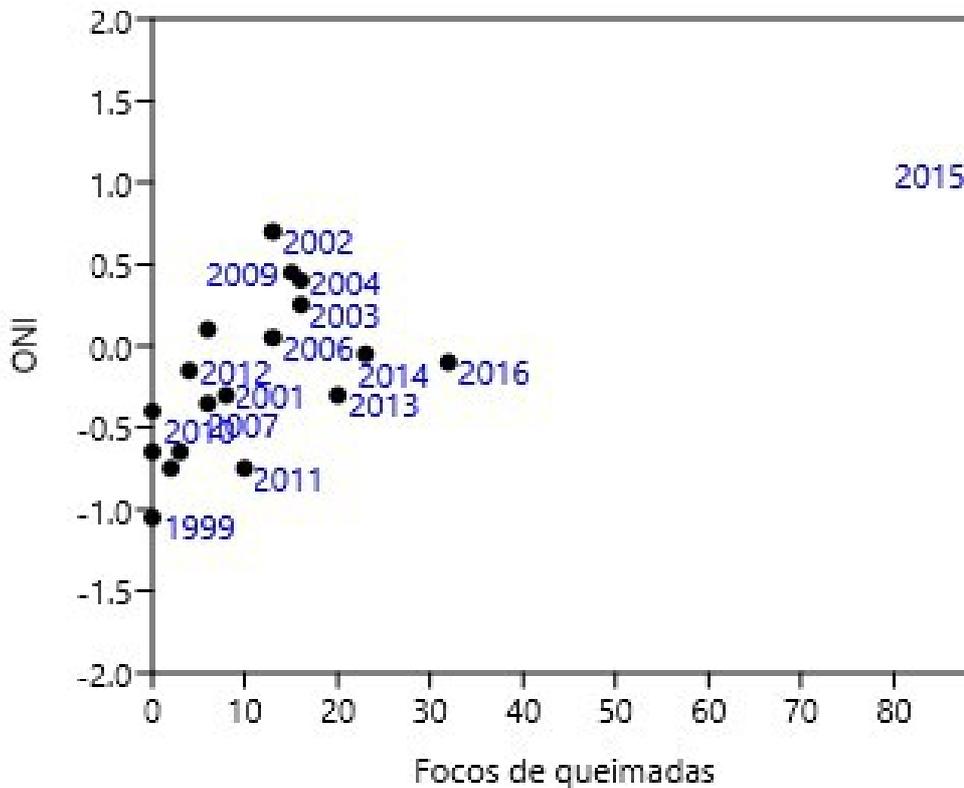


Figura 10 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função do ONI e dos focos de queimadas a partir de dados do NOAA e do INPE.

A forte correlação entre o El Niño e os focos de queimadas está de acordo com o indicativo de Alencar (2011) de uma correlação entre o histórico de queimadas na bacia amazônica oriental com os fortes anos de oscilação sul do El Niño e a seca extrema de 2005. Assim como o aumento da frequência de eventos El Niño que levaram a anos secos, que sujeita a Amazônia às queimadas catastróficas segundo Nepstad (1999) e que poderiam contribuir para futuros aumentos na frequência de queimadas segundo Barbosa (2005).

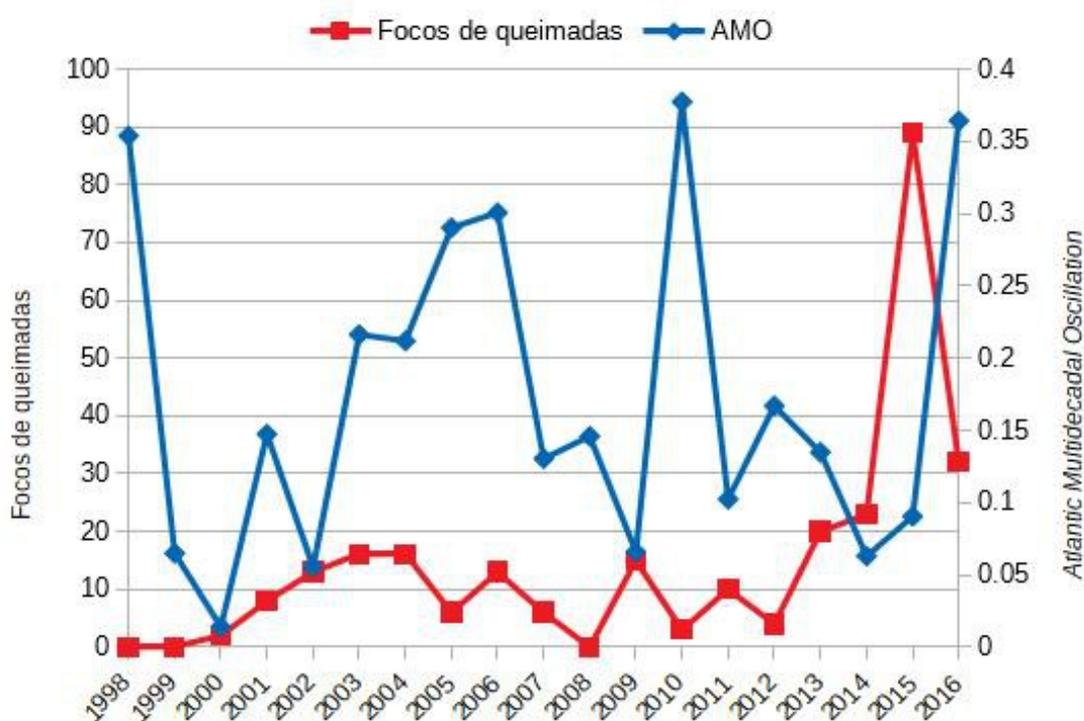


Figura 11 – *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) e focos de queimadas a partir de dados do NOAA e do INPE, respectivamente.

Os valores extremos do *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) indicados à Tabela 1 ocorreram nos anos de 2010 (0,3775 – máximo) e no ano de 2000 (0,014 – mínimo). Os focos de queimadas no ano de 2000 e 2010 registram o quarto e o quinto menor valor histórico, respectivamente.

À Figura 11 é demonstrada a variação anual dessincronizada entre o *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) e os focos de queimadas, evidenciada pelos resultados obtidos através da correlação de Spearman que foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a -0,0510; e o nível de significância (p) igual a 0,8356.

Estes resultados indicam um teste estatisticamente insignificante e que a correlação entre os focos de queimadas e o *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) é desprezível.

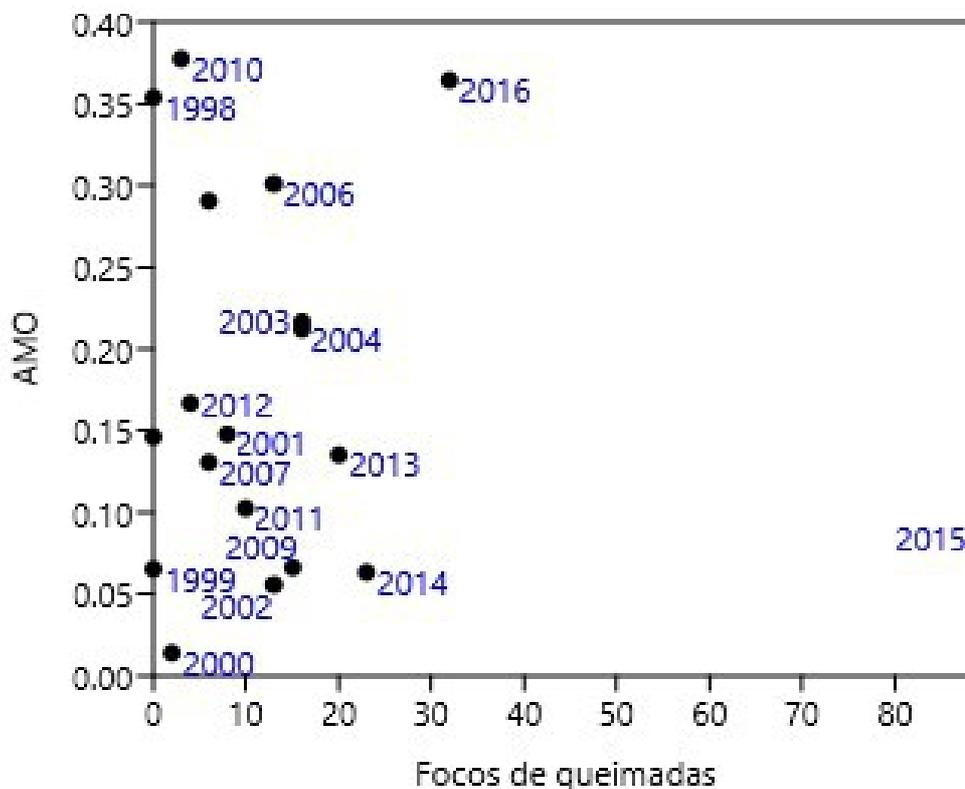


Figura 12 – Demonstrativo do excepcional ano de 2015 em função do AMO e dos focos de queimadas a partir de dados do NOAA e do INPE, respectivamente.

À Figura 12 é destacado o ano de 2015 aos demais anos da série histórica de 19 anos. A figura acima ilustra de maneira distinta à da figura 11 a correlação desprezível entre o *Atlantic Multidecadal Oscillation* da NOAA e os focos de queimadas do INPE.

Este resultado me leva a crer que a afirmação de (MARENGO et al., 2008) de que as secas da Amazônia são influenciadas pelo *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) não é válida para APA de Alter do Chão, e reforça a imprescindibilidade das fontes de ignição para ocorrência das queimadas. A afirmação de (CHEN et al., 2011) de que a Amazônia Oriental é mais vulnerável ao fogo durante o El Niño, enquanto que a porção sul e sudoeste é mais relacionada ao *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) é compatível com a forte correlação dos focos de queimadas na

APA de Alter do Chão com o El Niño.

3.2. Classificação da cobertura de solo

A classificação semiautomática das imagens *Landsat* geraram relatórios que apresentam o número de pixels, a área e o percentual pela cobertura do solo e suas respectivas interferências. Na Tabela 5, o relatório de classificação da imagem *Landsat 5* órbita/ponto 227/62 de 17 de outubro de 1986, e na Tabela 6, o relatório de classificação da imagem *Landsat 8* órbita/ponto 227/62 de 4 de novembro de 2016, as quais indicam, respectivamente, as coberturas inicial e final da APA de Alter do Chão. Não foram quantificados focos de queimadas sobre as classes de interferência nuvem e sombra, o que afastaram as chances de erros e misclasificações, entretanto há focos de queimadas localizados sobre a água que foram descartados das estatísticas para a correlação considerando a cobertura do solo, devido o ecossistema aquático não ser objeto deste estudo e possíveis erros de geolocalização.

Tabela 5 – Relatório de classificação da APA de Alter do Chão (imagem *Landsat 5* órbita/ponto 227/62 de 17 de outubro de 1986).

Classe	Pixels	Área (ha)	%
Floresta	122116	10990,4	66,57
Savana	44283	3985,5	24,14
Desmatamento	7605	684,5	4,15
Água	5035	453,2	2,74
Sombra	2905	261,5	1,58
Nuvem	1494	134,5	0,81

Tabela 6 – Relatório de classificação da APA de Alter do Chão (imagem *Landsat 8* órbita/ponto 227/62 de 4 de novembro de 2016).

Classe	Pixels	Área (ha)	%
Floresta	95813	8623,2	52,23
Desmatamento	43078	3877,0	23,48
Savana	28479	2563,1	15,53

Nuvem	7152	643,7	3,90
Sombra	4728	425,5	2,58
Água	4189	377,0	2,28

O demonstrativo da classificação supervisionada à Figura 13, indica que a cobertura do solo da APA de Alter do Chão antes de sua criação era aproximadamente formada por 66,6% de floresta, 24,1% de savana, 4,1% de áreas desmatadas e 2,7% de corpos d'água. E que atualmente como indicado à Figura 12, é aproximadamente constituída por 52,2 % de floresta, 23,5% de áreas deflorestadas, 15,5% de savana e 2,2% de superfície aquática.

As alterações quantitativas da cobertura do solo da área classificada num período de três décadas são reveladas à Tabela 7, onde 2.367,3 hectares (-14,3%) de floresta e 1.422,4 (-8,6%) hectares de savana foram destruídos. A área de flora destruída aumentou 3.192,6 hectares (+19,3%).

Tabela 7 – Indica as alterações da cobertura do solo e das interferências na APA de Alter do Chão num intervalo de trinta anos.

Classe	Pixels	Área (ha)	%
Floresta	-26303	-2367,3	-14,3
Desmatamento	35473	3192,6	19,3
Savana	-15804	-1422,4	-8,6
Nuvem	5658	509,2	3,1
Sombra	1823	164,1	1
Água	-846	-76,1	0,5

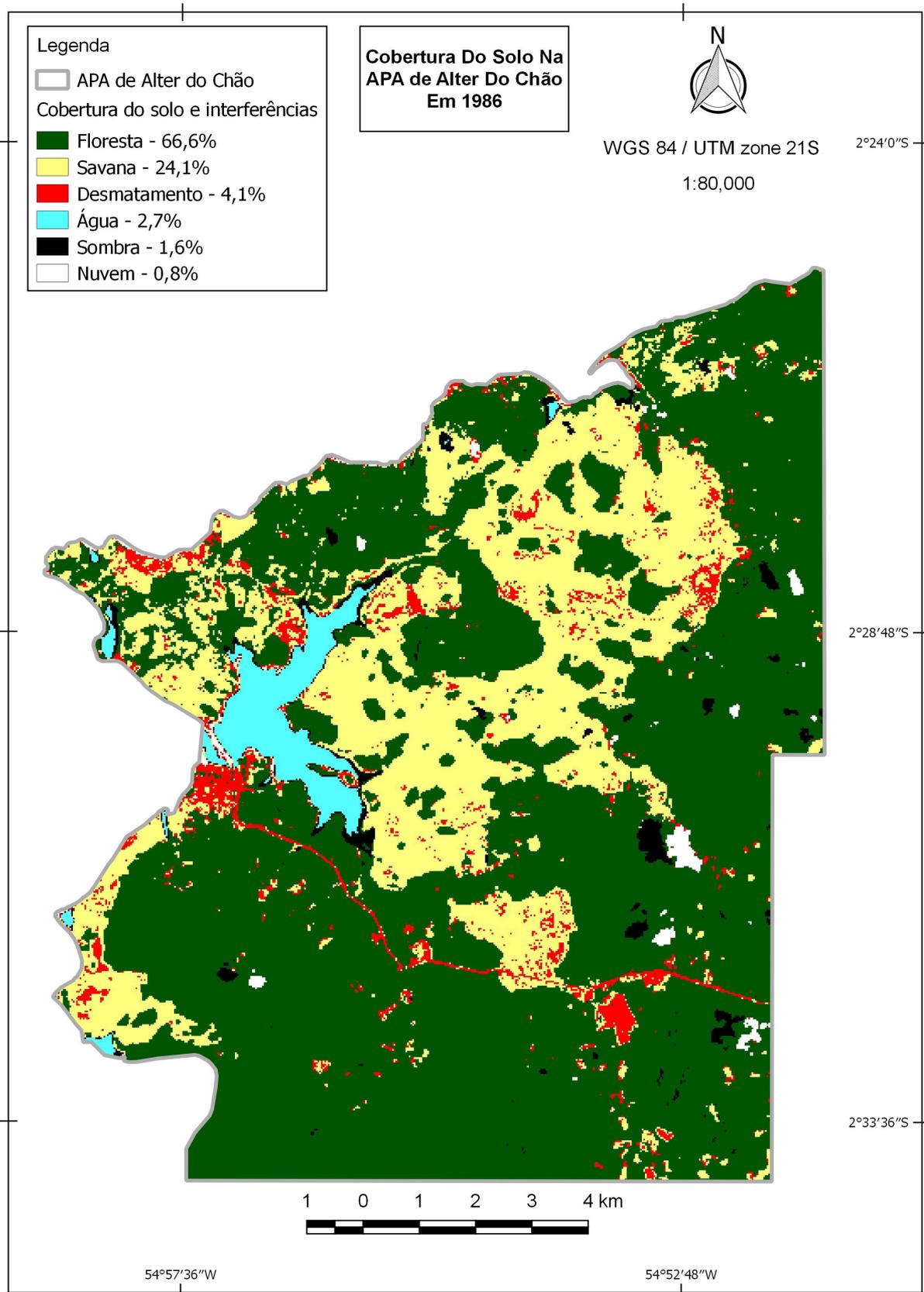


Figura 13 – Classificação da cobertura do solo na APA de Alter do Chão em 1986 a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA e do USGS.

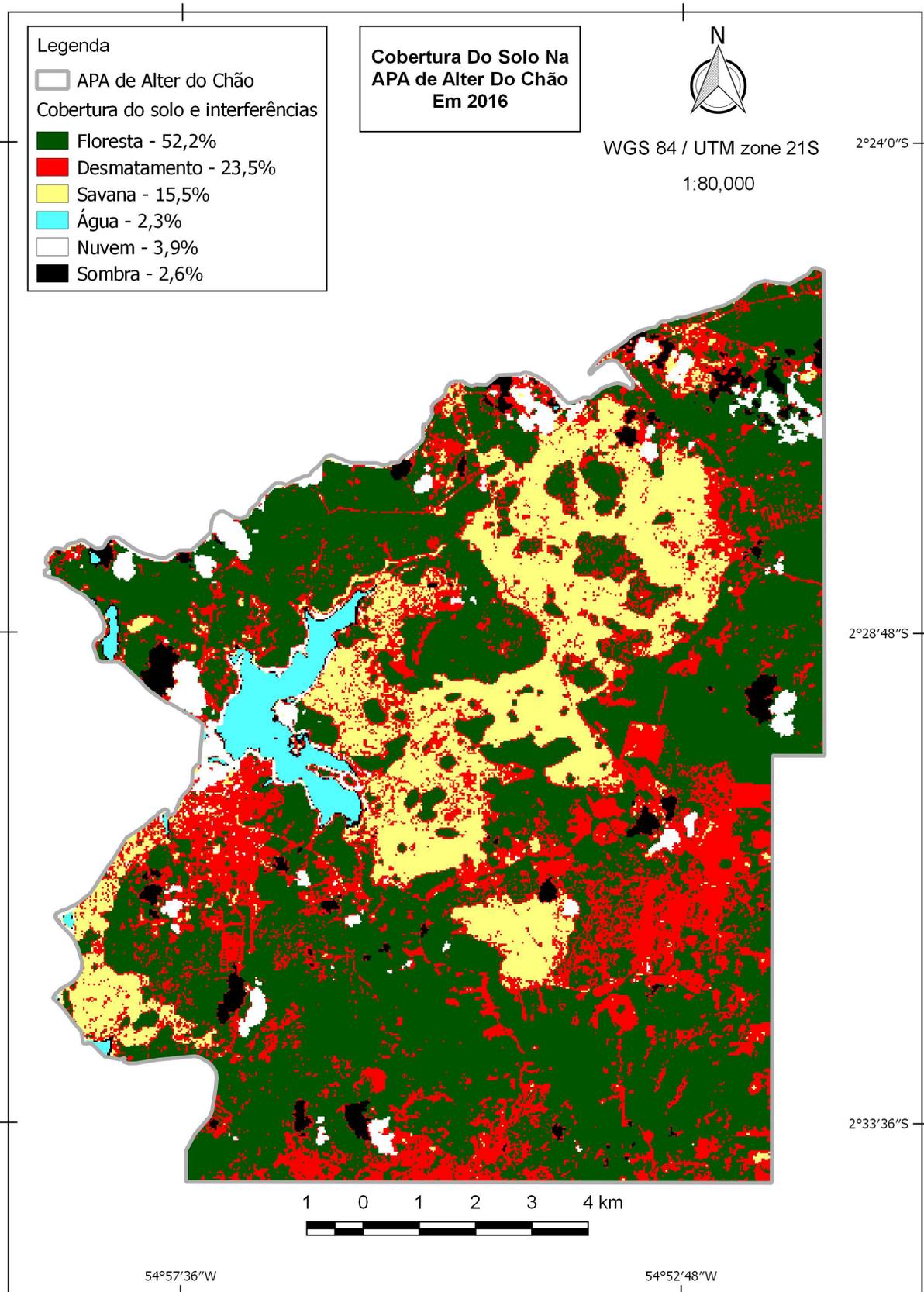


Figura 14 – Classificação da cobertura do solo na APA de Alter do Chão em 2016 a partir de dados do USGS.

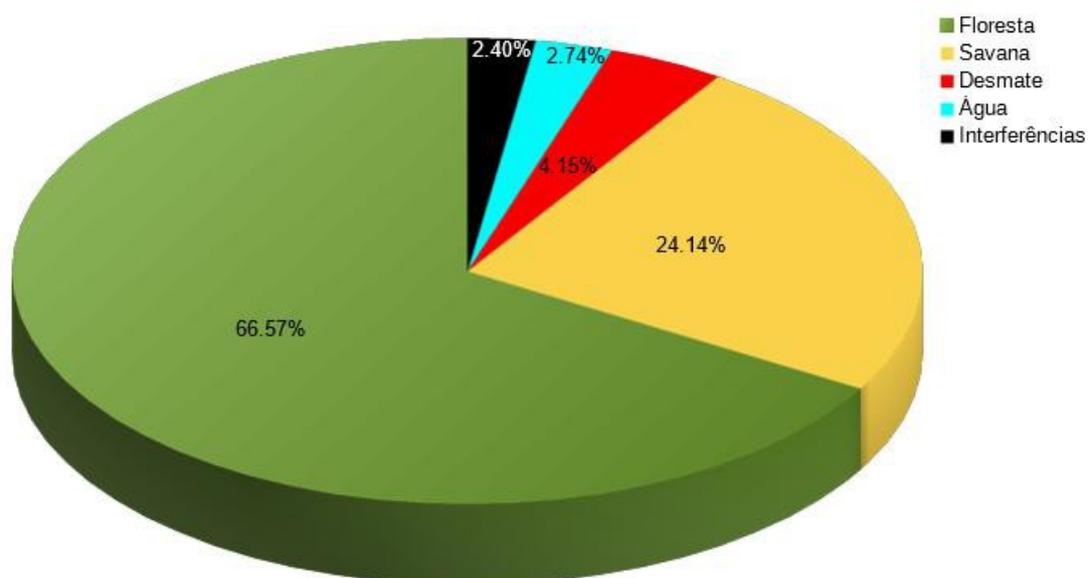


Figura 15 – Percentual da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 1986 a partir de dados do USGS.

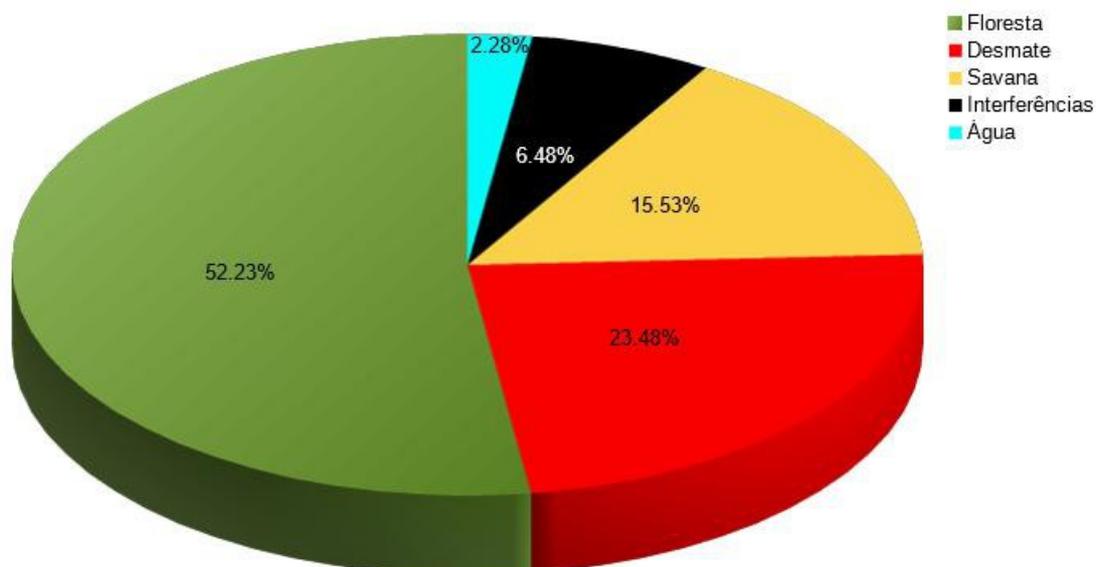


Figura 16 – Percentual da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 2016 a partir de dados do USGS.

A partir do indicativo da classificação da cobertura do solo na APA de Alter do Chão em 1986 (Figura 13) e do demonstrativo percentual da cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 1986 (Figura 15) foi possível visualizar a predominância (66,57%) da cobertura florestal na APA de Alter do Chão. A savana vem em seguida com 24,14% da cobertura e a área antrópica em terceiro com 4,15%. O corpo de água representa 2,74% da superfície da APA, que é um valor superior aos valores das interferências (2,40%) por nuvens e suas respectivas sombras.

A partir do indicativo de cobertura do solo da APA de Alter do Chão em 2016 (Figura 14) é possível visualizar a predominância (52,23%) da floresta da APA Alter do Chão. A área antrópica vem em seguida com 23,48% da cobertura e a savana em terceiro com 15,53%. As interferências (6,48%) por nuvens e suas respectivas nuvens apresentam valores superiores aos da superfície ocupada pelo corpo de água (2,28%) da APA.

O comparativo entre os indicativos de cobertura do solo da APA de Alter do Chão (Tabela 7) apresenta: uma redução de 14,34% da floresta, um aumento de 19,33% da área antrópica, e uma redução de 8,61% da savana. A superfície ocupada pelo corpo de água reduziu 0,46% e as interferências aumentaram 4,08%.

A redução da floresta era esperada, pois é indicado um aumento relevante dos focos de queimadas e a ocorrência de eventos El Niño nos últimos anos, os quais nessa conjuntura devido às mudanças climáticas, torna a floresta mais suscetível à destruição com o uso do fogo.

Era esperado que a savana apresentasse uma redução de sua cobertura com valor inferior ao da redução da floresta, pois segundo Hoffmann (2002) a savana demonstra uma reação veloz ao fogo (alta resiliência), e conforme Hoffmann (2003) o fogo é imprescindível na dinâmica das fronteiras entre a floresta e a savana e com frequência vem mantendo a estabilidade entre o avanço e o recuo da floresta.

3.3 Mapa de calor

O mapa de calor à Figura 17, indica a distribuição espacial e a frequência dos focos de queimadas sobre a cobertura do solo na APA de Alter do Chão, e que o regime de fogo é presente na maior parte da savana, o que não acontece nas áreas desmatadas.

Há uma diferença no regime do fogo entre as áreas urbanas e rurais das áreas desmatadas. A cobertura do solo desmatado localizada à sudoeste do Lago Verde de Alter do Chão (classe água, cor azul) indica a parte central da vila de Alter do Chão, onde há maior urbanização (vegetação ausente), e nunca foram registrados focos de queimadas entre os anos de 1998 e 2016, no entanto nas áreas desmatadas rurais é onde se concentra a maioria dos focos de queimadas.

Em trinta anos houve redução da cobertura do solo savana e aumentos da cobertura do solo desmatado e dos focos de queimadas. Há uma tendência de aumento dos focos de queimadas contemporâneo às transformações da cobertura do solo na APA de Alter do Chão, pois as áreas desmatadas rurais são mais suscetíveis às queimadas devido a maior potencial na presença de material seco.

Há registro de focos de queimadas de alta e baixa frequência na maior parte da savana da APA de Alter do Chão como indicado no mapa de calor à Figura 17, o que era esperado pois no clima tropical o regime do fogo é presente nas superfícies de savana.

Nas áreas desmatadas há também registro de focos de queimadas de alta e baixa frequência, entretanto diferentemente das áreas de savana, não há prevalência na sua totalidade, pois os focos de queimadas são historicamente ausentes na parte central da vila de Alter do Chão, a qual representa parte considerável da área desmatada.

Estas constatações sobre os focos de queimadas por cobertura do solo na APA de Alter do Chão estão em conformidade com o conceito da imprescindibilidade da interação das três circunstâncias (condições atmosféricas propícias, fonte de ignição e material seco suficiente) para a ocorrência de queimadas.

Na APA de Alter do Chão a distribuição espacial dos focos de queimadas são determinadas principalmente pelo material seco suficiente indicado pela série temporal de 19 anos, visto que uma APA prevê ocupação humana (fonte de ignição).

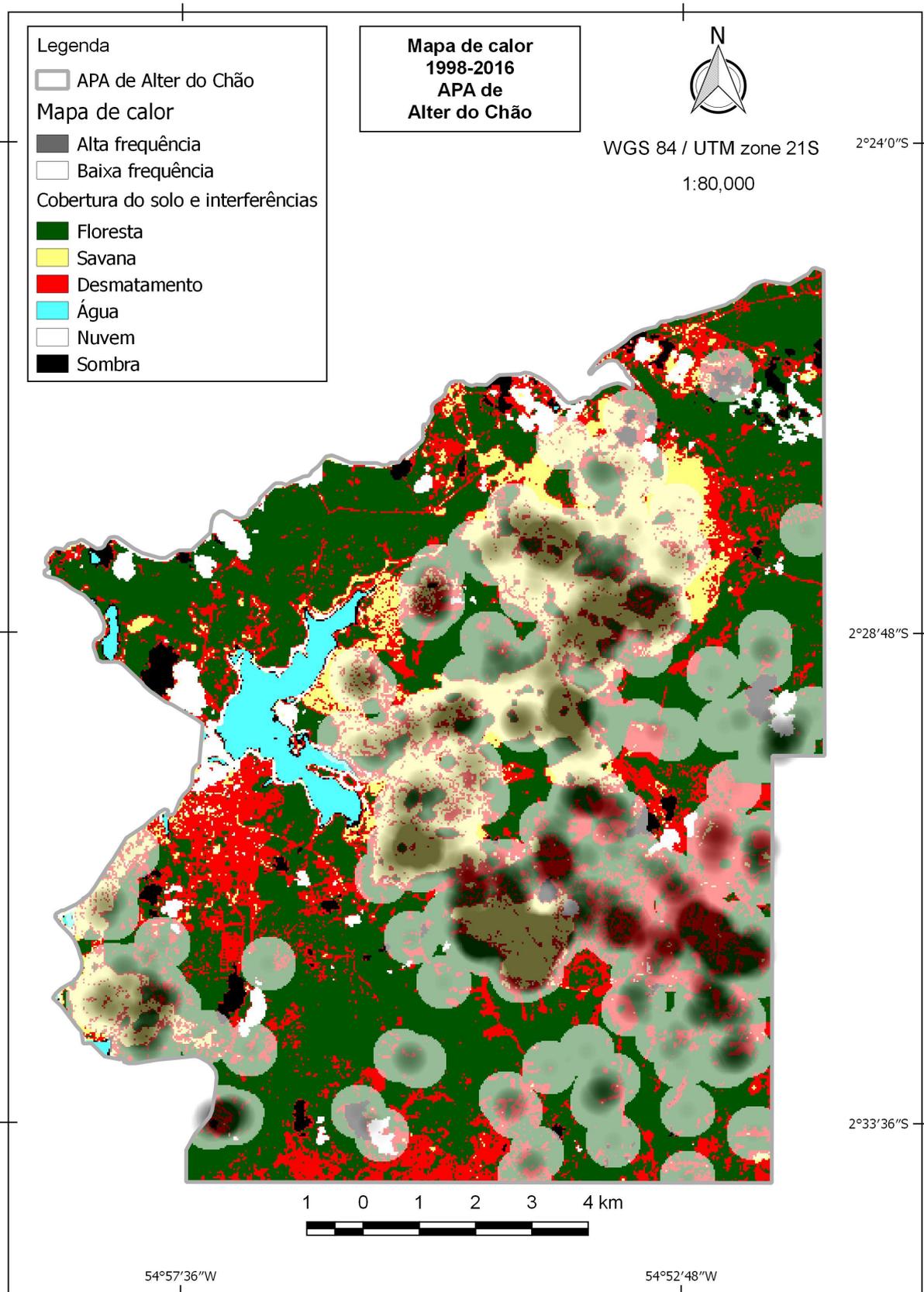


Figura 17 – Mapa de calor a partir de dados da Prefeitura de Santarém-PA, do INPE e do USGS.

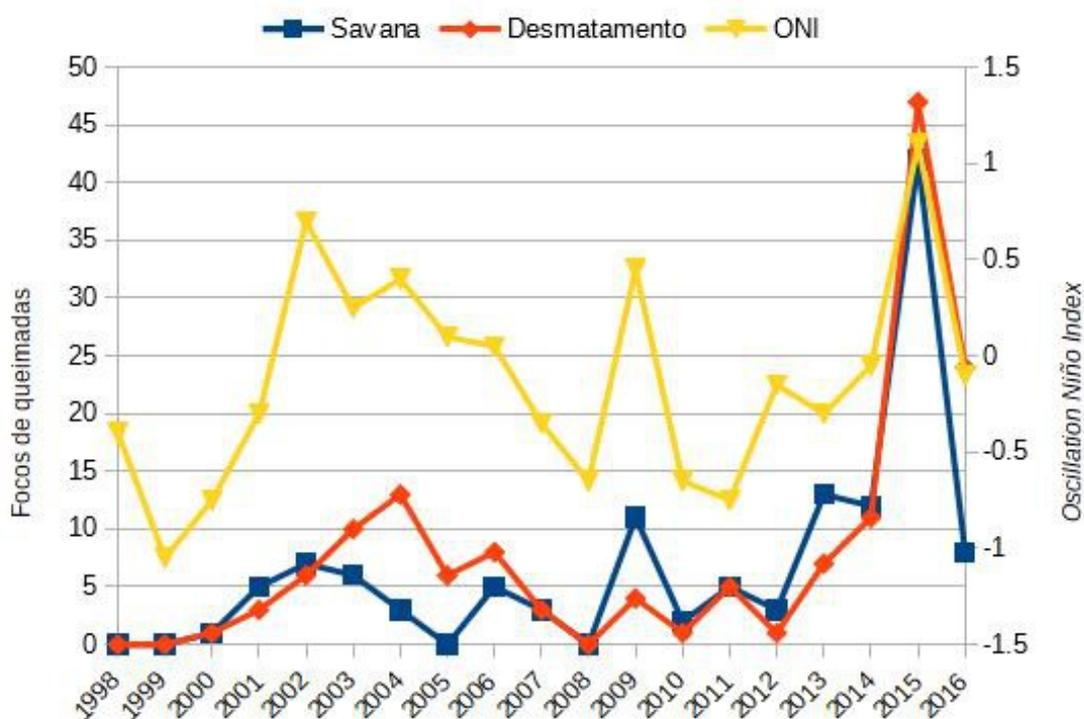


Figura 18 – Focos de queimadas por cobertura do solo e ONI a partir de dados do USGS e da NOAA.

Em 19 anos foram registrados 126 focos de queimadas na cobertura do solo savana e 150 na cobertura de solo antrópica. No ano de 2015 ocorreu o número máximo de focos de queimadas de que se tem registro, sendo 42 na savana e 47 na área antrópica.

Um terço de todos os focos de queimadas já registrados na savana ocorreram em 2015. E pouco menos de um terço dos focos de queimadas já registrados na cobertura área antrópica ocorreram em 2015. É notável que o ano de 2015 foi atípico e com valores extremos, pois é no ano de 2015 que as curvas de focos de queimadas sobre a savana e sobre a área antrópica apresentam mesmo comportamento de alta assim como a curva do ONI.

Os resultados obtidos através da correlação de Spearman foram: coeficiente de Spearman (r_s) igual a 0,7429; e o nível de significância (p) igual a 0,0003. Estes resultados indicam um teste estatisticamente significativo e que a correlação entre os focos de queimadas sobre a savana e sobre as áreas antrópicas é forte.

3.4 Sobreposição com o CAR

Na APA de Alter do Chão foram identificadas 47 propriedades declaradas, sendo apenas uma aprovada em 30 de outubro de 2014 pela Semas-PA. As demais declarações não possuem valor de titularidade, entretanto foram utilizadas como indicativos de posse e/ou propriedade. Em 2010 foram enviadas três declarações, em 2012 foram enviados cinco, no ano de 2013 foram enviados nove cadastros, em 2014 oito e em 2015 foram enviados vinte declarações à Semas, PA.

Dos 276 focos de queimadas localizados na APA de Alter do Chão, 70 estão localizados em propriedade privadas conforme o CAR, o que representa 25,4% dos focos de queimadas registrados na APA de Alter do Chão no período de 1998 a 2016.

Estes dados foram utilizados também como indicativos de conflito territorial, visto que há sobreposição de polígonos de propriedades e a terra tradicionalmente ocupada pelo povo Borari de Alter do Chão, que reivindicam o território junto à Funai (Fundação Nacional do Índio), conforme consta no sítio eletrônico <http://www.funai.gov.br/index.php/indios-no-brasil/terras-indigenas>

À Figura 19, é demonstrada a sobreposição de polígonos do CAR com os limites da APA de Alter do Chão onde são encontradas 47 propriedades rurais declaradas (sem valor de titularidade) à Semas-PA, sendo que apenas uma foi aprovada até o levantamento em 2015.

A aprovação de apenas uma declaração de propriedade do CAR pode indicar três fatores: a ausência de regularização na ocupação da APA de Alter do Chão; os conflitos por territórios entre comunidades tradicionais e especuladores de terras; e a morosidade do órgão gestor. A ausência de regularidade na ocupação da APA de Alter do Chão pode ser evidenciada pelo baixo número de aprovações dos cadastros, que dependem de documentação que comprovem a titularidade ou a posse da terra.

O conflito por territórios entre comunidades tradicionais e especuladores de terras é evidenciada pelo relatório circunstanciado de identificação e delimitação Terra Indígena Borari de Alter do Chão, o qual se encontra em fase de estudo pela Fundação Nacional do Índio. Talvez a influência de especuladores na política tenha sido o principal entrave para uma decisão, ou até mesmo o desalento dos

comunitários tradicionais em relação à diminuição de visitantes e turistas prevista pela delimitação da terra indígena e possível isolamento.

A morosidade do órgão é indicada pela política ambiental no Estado do Pará que prioriza ações em outras localidades como a capital Belém, que conta com melhor infraestrutura, maior número de servidores e poder de decisão. Além de ser dada prioridade na análise das propriedades com plano de manejo florestal por exemplo.

Esses argumentos sobre o CAR na APA de Alter do Chão foram utilizados como exemplo regional do status da regularização ambiental de propriedades no Pará. O CAR aprovado prevê a ratificação das atividades na área, recomposição da reserva legal destruída, entretanto não prevê a titularidade ou posse da área.

Creio que o CAR num estágio de pleno funcionamento, quando reunir os dados ambientais (sobre vegetação nativa, Áreas de Preservação Permanente, Áreas de Uso Restrito, Reserva Legal e áreas consolidadas), possa propiciar informações sobre as atividades antrópicas na APA. As quais aliadas aos dados de sensoriamento remoto poderão gerar estudos mais complexos, conforme Mataveli (2014). Os estudos mais complexos que são construídos com inúmeras partes que estão ligadas e interagindo entre si, formando um todo, podem desenvolver uma fonte de conhecimento para fiscalização, monitoramento, plano econômico-ambiental e combate ao desmatamento.

Devido ao fato de apenas um CAR apresentar status aprovado pela Semas-PA, até a finalização deste estudo, as sobreposições da APA de Alter do Chão com o CAR são praticamente apenas declarações ou intenções de regularização ambiental de propriedades ou posses, sem o crivo do órgão gestor.

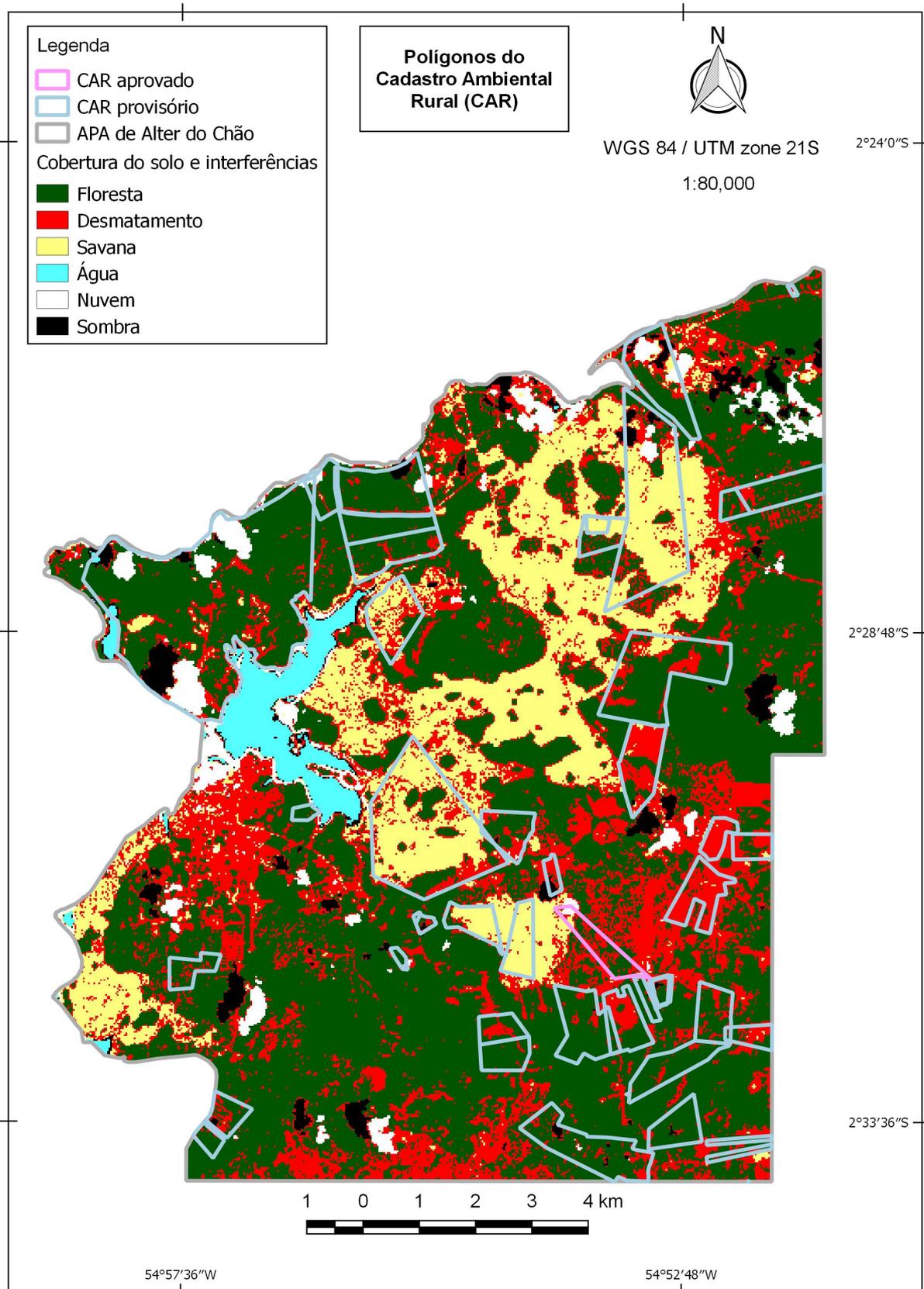


Figura 19 – Sobreposição dos polígonos CAR a partir de dados da Semas-PA, Prefeitura de Santarém-PA e do USGS.

4. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi descrever através de dados oficiais brasileiros e estadunidenses a distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas da APA de Alter do Chão no período de 1998 a 2016.

Demonstro que existe uma forte correlação dos focos de queimadas na APA Alter do Chão com o El Niño, assim como há indicativo de uma correlação entre o histórico de queimadas na bacia amazônica oriental com os fortes anos de ENSO e a seca extrema de 2005 (ALENCAR et al., 2011). E conforme Pausas (2014) as queimadas desempenharam um papel determinante na distribuição, composição e estrutura de muitos ecossistemas em todo o mundo e as mudanças climáticas são amplamente consideradas como um dos principais impulsionadores das futuras mudanças no regime do fogo.

Indico que há uma forte correlação entre os focos de queimadas na savana e os focos de queimadas nas áreas desmatadas. Houve aumento dos focos de queimadas contemporâneos à transformação da cobertura do solo, isto nos leva a crer que incidência do fogo agrícola descontrolado tem aumentado recentemente na Amazônia Oriental, impulsionada pela variabilidade climática, mudanças no uso da terra e mudanças nos padrões de residência e ocupação da terra (SCHWARTZ et al., 2015). Como as áreas desmatadas rurais, de recente ocupação cortadas por estradas e loteamentos, onde há absoluta prevalência dos focos de queimadas, diferentemente da vila de Alter do Chão onde em 19 anos não há registro de focos de queimadas, conforme demonstrado na análise do mapa de calor.

A distribuição espaço-temporal dos focos de queimadas da APA de Alter do Chão está em conformidade com o conceito de (SILVA; DE MORISSON, 2014) sobre ocorrência de queimadas que afirma ser necessário um processo de interação entre três circunstâncias: a presença de vegetação seca; uma fonte de inflamação; e condições da atmosfera favoráveis ao fogo, e com o que diz (DE RESENDE et al., 2014) que o fogo se tornará mais frequente e generalizado na Amazônia à medida que as fontes de inflamação se dispersam com o avanço da ocupação antrópica.

Isto indica que a provável resposta para um clima regional seco será uma iminente, gradual e transição heterogênea de florestas úmidas de alta biomassa

para florestas secas de transição e estados similares a savana lenhosa, em contraste com as previsões existentes de estabilidade ou perda catastrófica de biomassa (LEVINE et al., 2015). Um aumento catastrófico dos focos de queimadas foi indicado no ano de 2015 na APA de Alter do Chão, entretanto maiores estudos sobre transformação do mosaico de florestas e savanas são necessários para responder aos questionamentos da taxa de transformação da biomassa.

A mudança no uso da terra pode ser indicada através da emergência de declarantes de posse e/ou propriedade de áreas na APA de Alter do Chão, onde há sobreposição com territórios ancestrais reivindicados pela comunidade tradicional dos Borari de Alter do Chão, que ocupam e interagem imemorialmente com a paisagem, sendo a floresta fruto de sua tecnologia (TORRES, 2011).

O ordenamento da ocupação territorial tem caráter prioritário nas ações de proteção da biodiversidade. O território guarda em si elementos biofísicos (recursos hídricos, solo, clima, vegetação e fauna) que interagem com elementos sociais e econômicos em múltiplas escalas (local, nacional e global), os quais implicam em retroalimentações (positivas ou negativas) e dinamismo definidas pelos ocupantes. A manutenção da savana e da floresta da APA de Alter do Chão é dependente da interação antrópica local, onde múltiplos grupos de interesse buscam objetivos conflitantes nesta unidade de conservação.

A efetividade das ações de proteção da biodiversidade na APA de Alter do Chão dependerá de um análise crítica de dados técnicos e socioecológicos, que ressaltem a interação positiva dos usos do território em relação ao fomento da cobertura de savana e floresta. Ainda que estas interações positivas sejam oriundas de indivíduos (sejam tradicionais como os Borari de Alter do Chão ou pessoas interessadas na conservação do entorno), é a partir destas que uma norma emerge do sistema, a qual alcançaria os demais indivíduos (sociedade em geral), não só na aplicação de sanções, mas também nas conformidades com a norma.

O aumento da área desmatada indica que em conjunto com as mudanças climáticas, a cobertura do solo é mais propícia às queimadas do que a 30 anos atrás, conforme (CHEN et al., 2011). Há possibilidade de um aumento dos focos de queimadas no futuro, os quais quando aliados aos eventos El Niño podem apresentar proporções catastróficas como previsto por Levine (2015).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABADES, S. R.; GAXIOLA, A.; MARQUET, P. A. Fire, percolation thresholds and the savanna forest transition: A neutral model approach. **Journal of Ecology**, v. 102, n. 6, p. 1386–1393, 2014.

ACCATINO, F. et al. Trees, grass, and fire in humid savannas-The importance of life history traits and spatial processes. **Ecological Modelling**, v. 320, n. JANUARY, p. 135–144, 2016.

ACTION, P. **Estimação não paramétrica de densidades: método do núcleo**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-de-capacidade/431-estimacao-nao-parametrica-de-densidades-metodo-do-nucleo>>. Acesso em: 24 ago. 2017.

ALENCAR, A. et al. Temporal variability of forest fires in eastern Amazonia. **Ecological applications : a publication of the Ecological Society of America**, v. 21, n. 7, p. 2397–412, 2011.

BARBOSA, R. I.; FEARNSIDE, P. M. Fire frequency and area burned in the Roraima savannas of Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 204, n. 2–3, p. 371–384, 2005.

BRANDO, P. M. et al. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 17, p. 6347–52, 2014.

CARMENTA, R. et al. Does the Establishment of Sustainable Use Reserves Affect Fire Management in the Humid Tropics? **Plos One**, v. 11, n. 2, p. e0149292, 2016.

CARVALHO, W. D. DE; MUSTIN, K. The highly threatened and little known Amazonian savannahs. **Nature Publishing Group**, n. March, p. 1–3, 2017.

CHEN, Y. et al. Forecasting Fire Season Severity in South America Using Sea Surface Temperature Anomalies. **Science**, v. 334, n. 6057, p. 787–791, 2011.

CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. p. 106, 2015.

DA SILVA, F. D. F.; FELIPPE-BAUER, M. L.; OKADA, Y. *Culicoides* Latreille (Diptera: Ceratopogonidae) da vila de Alter do Chão, Santarém, Pará, Brasil. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 1, n. 3, p. 69–74, 2010.

DANTAS, V. DE L. et al. Disturbance maintains alternative biome states. **Ecology Letters**, v. 5, p. 12–19, 2016.

DE ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. G.; ARANTES, A. E. Distribution Patterns of

Burned Areas in the Brazilian Biomes: An Analysis Based on Satellite Data for the 2002-2010 Period. **Remote Sensing**, v. 4, n. 7, p. 1929–1946, 2012.

DE RESENDE, A. F. et al. Fire damage in seasonally flooded and upland forests of the Central Amazon. **Biotropica**, v. 46, n. 6, p. 643–646, 2014.

DUFFY, P. B. et al. Projections of future meteorological drought and wet periods in the Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 43, p. 13172–13177, 2015.

EOS, E. O. S. **Aqua Earth-Observing satellite mission**. Disponível em: <<https://aqua.nasa.gov/>>. Acesso em: 3 nov. 2017.

ESA. **METOP-B**. Disponível em: <http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/MetOp-B_launch_postponed>. Acesso em: 21 nov. 2017.

FONSECA, M. G. et al. **Avaliação preliminar da modelagem de queimadas na Amazônia brasileira utilizando o princípio da Máxima Entropia**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** João Pessoa - PB: 2015

GONTIJO, G. A. B. et al. **Detecção de quimadas e validação de focos de calor utilizando produtos de Sensoriamento Remoto**. (Inpe, Ed.) Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** Curitiba, PR: 2011

GUTIÉRREZ-VÉLEZ, V. H. et al. Land cover change interacts with drought severity to change fire regimes in Western Amazonia. **Ecological Applications**, v. 24, n. 6, p. 1323–1340, 2014.

HOFFMANN, W. A. Positive feedbacks of fire, climate, and vegetation and the conversion of tropical savanna. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 22, p. 5–8, 2002.

HOFFMANN, W. A. et al. Tree topkill, not mortality, governs the dynamics of savanna-forest boundaries under frequent fire in central Brazil. **Ecology**, v. 90, n. 5, p. 1326–1337, 2009.

HOFFMANN, W. A.; ORTHEN, B.; DO NASCIMENTO, P. K. V. Comparative fire ecology of tropical savanna and forest trees. **Functional Ecology**, v. 17, n. 6, p. 720–726, 2003.

INPE. **Mudança de satélite de referência**. Disponível em: <http://queimadas.cptec.inpe.br/~rqueimadas/documentos/20110824_Aviso_Ref_Mudou_Aqua.pdf>. Acesso em: 8 maio. 2017.

LEVINE, N. M. et al. Ecosystem heterogeneity determines the ecological resilience of

the Amazon to climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, n. February 2016, p. 1511344112-, 2015.

MAGNUSSON, W. E. et al. Composição florística e cobertura vegetal das savanas na região de Alter do Chão, Santarém - PA. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 31, n. 1, p. 165–177, 2008.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, 2008.

MATAVELI, G. A. V.; CHAVES, M. E. D. **Análise da distribuição espacial dos focos de queimada no estado de Minas Gerais entre 2009 e 2012**. I Simpósio Mineiro de Geografia. **Anais...**Alfenas-MG: 2014

METZGER, J. P. O Que É Ecologia De Paisagens ? **Biota Neotropica**, v. 1, n. 1 e 2, p. 1–9, 2001.

MORALES, J. M. et al. A stochastic fire spread model for north Patagonia based on fire occurrence maps. **Ecological Modelling**, v. 300, n. February, p. 73–80, 2015.

MORTON, D. C. et al. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 7, p. 1706–1720, 2011.

MORTON, D. C. et al. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120163, 2013.

NARCISO, M. G. **Utilização de sistema de informação de dados climáticos para cálculo de índices de risco de incêndio para a sub-região da Nhecolândia**. Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...**Corumbá, MS: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2009

NASA. **Terra Application Areas**. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/applications/index.html>. Acesso em: 2 out. 2017a.

NASA. **NOAA 15**. Disponível em: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1998-030A>>. Acesso em: 21 nov. 2017b.

NASA. **NOAA 18**. Disponível em: <<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2005-018A>>. Acesso em: 21 nov. 2017c.

NASA. **NPP VIRS**. Disponível em: <<https://viirsland.gsfc.nasa.gov/index.html>>.

Acesso em: 22 nov. 2017d.

NEPSTAD, D. C. et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v. 372, n. 6507, p. 666–669, 1994.

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

NOAA. **Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)**. Disponível em: <<http://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/index.html>>. Acesso em: 11 out. 2017.

NOAA. **VIIRS**. Disponível em: <<https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/>>. Acesso em: 22 nov. 2017.

PAUSAS, J. G. Alternative fire-driven vegetation states. **Journal of Vegetation Science**, v. 26, n. 1, p. 4–6, 2015a.

PAUSAS, J. G. Alternative fire-driven vegetation states - Supporting Information. **Journal of Vegetation Science**, v. 26, n. 1, p. 89–101, 2015b.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A Burning Story: The Role of Fire in the History of Life. **BioScience**, v. 59, n. 7, p. 593–601, 2009.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. Abrupt Climate-Independent Fire Regime Changes. **Ecosystems**, v. 17, n. 6, p. 1109–1120, 2014.

PIROVANI, D. B. et al. Análise espacial de fragmentos florestais na bacia do ...
ANÁLISE ESPACIAL DE FRAGMENTOS FLORESTAIS NA BACIA DO RIO
SPATIAL ANALYSIS OF FOREST FRAGMENTS IN THE ITAPEMIRIM RIVER.
Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 271–281, 2014.

PROJECT, M. E. **Meteosat Second Generation (MSG) provides images of the full Earth disc , and data for weather forecasts** . Disponível em: <<https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/CurrentSatellites/Meteosat/index.html>>. Acesso em: 21 nov. 2017.

QGIS. **Um Sistema de Informação Geográfica livre e aberto**, 2016.

REIS, S. M. et al. Post-fire dynamics of the woody vegetation of a savanna forest (Cerradão) in the Cerrado-Amazon transition zone. **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, n. 3, p. 408–416, 2015.

SANTARÉM, P. DE. **Área de Proteção Ambiental – APA Alter do Chão**. Disponível em: <http://www.santarem.pa.gov.br/conteudo/?item=89&fa=6&cd=20&cod_tema=3>. Acesso em: 13 mar. 2016.

SCHROEDER, W. et al. A Distribuição Espacial e Variabilidade Interanual do Fogo na Amazônia. **Amazonia and Global Change**, p. 43–60, 2009.

SCHWARTZ, N. B. et al. Climate, landowner residency, and land cover predict local scale fire activity in the Western Amazon. **Global Environmental Change**, v. 31, n. February, p. 144–153, 2015.

SILVA, A. C. D. C. et al. Aspectos de ecologia de paisagem e ameaças à biodiversidade em uma unidade de conservação na Caatinga, em Sergipe. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 479–490, 2013.

SILVA, D. E.; DE MORISSON, D. V. **Avaliação da discriminação de queimadas naturais e antrópicas a partir de dados de monitoramento de queimadas e incêndios em Minas Gerais, Brasil**. Anais do Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto - GEONORDESTE 2014 Aracaju, Brasil, 18-21 novembro 2014. **Anais...2014**

SILVEIRA, J. M. et al. A Multi-Taxa Assessment of Biodiversity Change After Single and Recurrent Wildfires in a Brazilian Amazon Forest. **Biotropica**, n. February 2016, 2015.

SPEARMAN, C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. **The American Journal of Psychology**, v. 15, n. 1, p. 72–101, 1904.

STOJANOVA, D. et al. **Estimating the risk of fire outbreaks in the natural environment**. [s.l: s.n.]. v. 24

TORRES, M. A despensa viva: um banco de germoplasma nos roçados da floresta. **Geografia em questão**, v. 4, n. 2, p. 113–138, 2011.

VEDOVATO, L. B. et al. **Detection of burned forests in Amazonia using the Normalized Burn Ratio (NBR) and Linear Spectral Mixture Model from Landsat 8 images**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. **Anais...João Pessoa - PB: 2015** Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/279189037>>