

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS SOBRE A
REGIÃO CENTRAL DA AMÉRICA DO SUL**

MARIA GRACIELA QUEVEDO CATAÑO

**Manaus-AM
Novembro, 2021**

MARIA GRACIELA QUEVEDO CATAÑO

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS SOBRE A
REGIÃO CENTRAL DA AMÉRICA DO SUL**

Orientadores:

Dr. Igor Oliveira Ribeiro

Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente – INPA/UEA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente na área de concentração Interação Biosfera Atmosfera.

**Manaus-AM
Novembro, 2021**



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA E UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS.

Aos 22 dias do mês de novembro do ano de 2021, às 13:30 horas, de síncrona e remota, reuniu-se a Comissão Julgadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Igor Oliveira Ribeiro (Presidente), a Profa. Dra. Jaidete Monteiro de Souza (UEA) e a Profa. Dra. Rita Valéria Andreoli de Souza (UEA), tendo como suplentes o Prof. Dr. Ricardo Henrique Moreton Godoi (UFPR) e a Profa. Dra. Cristine de Mello Dias Machado (UFAM), sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a avaliação pública do trabalho de Dissertação de Mestrado da Maria Graciela Quevedo Cataño intitulado: "Variabilidade Espaço-Temporal dos Focos de Queimadas sobre a Região Central da América do Sul", orientada pelo Prof. Dr. Igor Oliveira Ribeiro (UEA) e pelo Prof. Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza (UEA).

O Presidente da Comissão Julgadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. A aluna fez a exposição do seu trabalho que foi avaliado pelos membros da Comissão Julgadora de Defesa Pública. A Comissão Julgadora, então, se reuniu e os membros emitiram os seguintes pareceres:

Nome	Parecer	Assinatura
Igor Oliveira Ribeiro	(X) Aprovado () Reprovado	
Jaidete Monteiro de Souza	(X) Aprovado () Reprovado	
Rita Valéria Andreoli de Souza	(X) Aprovado () Reprovado	

Nada mais havendo a relatar, foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Julgadora.

C357v Cataño, Maria Graciela Quevedo
VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DOS FOCOS DE
QUEIMADAS SOBRE A REGIÃO CENTRAL DA AMÉRICA DO SUL /
Maria Graciela Quevedo Cataño; orientador Igor
Oliveira Ribeiro; coorientador Rodrigo Augusto
Ferreira de Souza. -- Manaus:[s.l], 2021.
112 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação
em Clima e Ambiente) -- Coordenação do Programa de
Pós-Graduação, INPA, 2021.

1. Queimadas. 2. Clima. 3. Uso do solo. I.
Ribeiro, Igor Oliveira , orient. II. Souza, Rodrigo
Augusto Ferreira de , coorient. III. Título.

CDD: 551.66813

Sinopse:

Estudou-se a variabilidade espaço-temporal dos focos de queimadas na região central da América do Sul e sua relação com a variabilidade climática e desmatamento para o período de 2003 a 2020, utilizando dados remotos a partir de sondagem do satélite AQUA.

Palavras-chave: secas, incêndios florestais, variabilidade climática, satélite AQUA.

*Dedico a minha família, em especial a minha
filha Paula Vitória Quevedo Arispe, minha
mãe Celia Cataño Callejas, e meu irmão
Eduard Mendez Cataño.*

AGRADECIMENTOS

Ao programa de bolsas Brasil PAEC OEA-GCUB, da Organização dos Estados Americanos e Grupo de Cooperação Internacional de Universidades Brasileiras, pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade do Estado do Amazonas e ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia pela oportunidade de ensino e aprendizado no programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente (CLIAMB).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através de bolsa de Mestrado.

Aos meus orientadores Dr. Igor Oliveira Ribeiro e Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza, pela orientação, pelas ideias, o apoio permanente, pela motivação, amizade e compreensão, tudo isso, me ajudou a desenvolver o trabalho de pesquisa e conseguir meu sonho que era sair do meu país para fazer um Mestrado no Brasil.

À professora Dra. Rita Valéria Andreoli de Souza, pelo apoio, motivação e pela valiosa contribuição ao meu trabalho de pesquisa e suas considerações como membro da banca da Dissertação.

À professora Dra. Mary Toshie Kayano, pela sua contribuição e sugestões no artigo científico.

À professora Dra. Renata Libonati dos Santos e Jaidete Monteiro de Souza pelas suas sugestões e seu tempo dedicado ao meu projeto de pesquisa como membro da banca julgadora.

Ao meu companheiro Adrian, pelas sugestões e motivação na postulação do Programa de Bolsas Brasil PAEC OEA-GCUB.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente pelos grandes ensinamentos nas disciplinas.

Aos meus colegas de turma: Willy, Keully, Anne, Maria, Aleyde, Sara e Tieago, por toda a ajuda e apoio durante este período tão importante da minha da formação acadêmica.

Aos meus amigos do CLIAMB, Gleice, Nayandra, Silvana, Yara, Marcelo, Carla e Regison pelo apoio nas disciplinas, pela convivência e amizade.

Por fim, agradeço a toda minha família pelo apoio e amor nos momentos mais necessários e importantes.

RESUMO

Na América do Sul, as queimadas são uns dos agentes de perturbação que afetam os ecossistemas florestais, à biodiversidade, contribuem com a emissão de gases de efeito estufa e alteram a qualidade do ar afetando à saúde da população. As ocorrências das queimadas estão associadas às atividades do uso da terra, desmatamento, condições climáticas de secas intensas, políticas públicas, entre outros fatores. Este trabalho analisou a variabilidade espaço-temporal dos focos de queimadas na região central da América do Sul, que envolve a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia. Além disso, estudou-se a influência da variabilidade da precipitação e do desmatamento na ocorrência dos focos de queimadas nos municípios brasileiros e nos departamentos da Bolívia. Foram utilizados os dados de focos de queimadas do satélite AQUA, para o período de 2003 a 2020, os dados de precipitação do TRMM e dados de desmatamento do PRODES e ABT. Os resultados mostraram que na área de estudo ocorreram 28% dos focos de queimadas na América do Sul durante o período estudado. As séries temporais dos focos de queimadas da Bolívia e dos Estados brasileiros mostram uma variabilidade interanual heterogênea, com coeficientes de variação acima de 60% nos Estados de Rondônia e Mato Grosso e entre 29% e 47% nos Estados do Amazonas, Acre e Bolívia. Observou-se um ciclo anual dos focos de queimadas bem definido, com uma época de ocorrência de queimadas concentrados entre os meses de julho e outubro. Ainda, notou-se uma tendência positiva nas séries temporais de ocorrência de queimadas significativa nos Estados do Amazonas e Acre. Em relação às anomalias interanuais dos focos de queimadas, observou-se anomalias positivas em todos os locais da área de estudo nos anos 2005, 2007, 2010, com algumas exceções nos anos 2004 (exceto no Amazonas), 2006 (exceto no Acre) e 2020 (exceto em Rondônia). No que atinge a distribuição espacial da ocorrência dos focos de queimadas, notou-se no Estado de Rondônia a maior densidade de focos de queimadas por área (km²), seguido dos Estados do Mato Grosso, Acre, da Bolívia e do Estado do Amazonas. As regiões que apresentaram as maiores ocorrências das queimadas foram a região leste da Bolívia e do Acre, norte do Estado de Rondônia, Sul do Amazonas e parte da região sudoeste, nordeste e centro-norte do Estado do Mato Grosso. Os Municípios de Humaitá, Novo Aripuanã e Tapauã no Estado do Amazonas, o Município do Manoel Urbano do Estado do Acre e os Departamentos do Anzaldo, Ravelo, Sica Sica, Tacopaya e Tapacarí na Bolívia, apresentaram tendências positivas significativas de ocorrência de queimadas. Também, os resultados mostram que a variabilidade da precipitação anual explica significativamente a ocorrência dos focos de queimadas no Estado do Acre e na

Bolívia, enquanto o desmatamento anual explica significativamente a ocorrência dos focos de queimadas nos Estados de Mato Grosso, Rondônia e Acre. Adicionalmente, analisou-se as anomalias espaciais dos focos de queimadas e precipitação anual durante os episódios de seca de 2005, 2007, 2010, 2015, 2019 e 2020. Em 2005, observaram-se relações negativas entre o aumento dos focos de queimadas ($+4\sigma$) e redução da precipitação anual (-900 mm) na região leste da Bolívia e Acre, Sul do Amazonas e noroeste do Mato Grosso. Em 2007, a maior correspondência espacial das anomalias positivas dos focos de queimadas ($+3,8\sigma$) com as anomalias negativas da precipitação (-600 mm) ocorreu no Estado do Mato Grosso. Em 2010, a maior relação das anomalias positivas de focos de queimadas ($+4\sigma$) e redução da precipitação (-300 mm e -600 mm), notou-se na região leste e nordeste da Bolívia, bem como no sul do Estado do Mato Grosso. Em 2015, observou-se menor anomalia positiva ($+3,5\sigma$) de focos de queimadas comparado aos outros anos, concentrada no Estado do Amazonas, região que apresentou anomalias de precipitação (-900 mm). Em 2019 e 2020, observaram-se anomalias positivas ($+4\sigma$) dos focos de queimadas em toda a área de estudo comparado a anos anteriores, em que se destaca a relação negativa das queimadas na região sudeste da Bolívia em 2019 com a redução da precipitação (-900 mm). Finalmente, analisou-se a variabilidade temporal e espacial dos focos de queimadas por Departamento da Bolívia e uma discussão das políticas públicas. Este estudo permitiu compreender a dinâmica das ocorrências dos focos de queimadas e sua relação com variabilidade da precipitação e desmatamento na Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia, permitindo visualizar as tendências e as afrontas para a redução das queimadas na região.

ABSTRACT

In South America, active fires are one of the agents of disturbance that affects forest ecosystems, biodiversity, contributes to the emission of greenhouse gases, changes the air quality, affecting the health of the population. The occurrences of active fires are associated with land use activities, deforestation, weather conditions of intense drought, public policies, among other factors. This work analyzes the spatiotemporal variability of active fires in the central region of South America, comprising the central region of the Amazon, which involves Bolivia and the Brazilian states of Acre, Amazonas, Mato Grosso and Rondônia. In addition, the temporal trend by Municipality of active fires was studied and the influence of rainfall variability and deforestation on the occurrence of active fires was analyzed. Active fires data were used from the AQUA satellite, for the period 2003 to 2020, rainfall data from TRMM and deforestation data from PRODES and ABT. The results show that the study area contributed with 28% of the active fires in South America during the period from 2003 to 2020. The time series of the active fires in Bolivia and the Brazilian States shows a heterogeneous interannual variability, with coefficients of variation above 60% in the States of Rondônia and Mato Grosso and between 29% and 47% in the States of Amazonas, Acre and Bolivia. Afterwards, the interannual anomalies of the active fires were evaluated, positive anomalies were observed in all places of the study area in the years 2005, 2007, 2010, with some exceptions in the years 2004 (except in Amazonas), 2006 (except in the Acre) and 2020 (except in Rondônia). In relation to active fires in the Brazilian states of the Legal Amazon, a significant positive trend was noted in the states of Amazonas and Acre. Afterwards, the annual cycle of active fires was analyzed, it was possible to observe a period of concentrated fires between the months of July and October. The study of the spatial distribution of occurrences of active fires, it was noted in the State of Rondônia the highest density of active fires per area in km², followed by the State of Mato Grosso, Acre, Bolivia, and Amazonas. In addition, the spatial distribution based on the Kernel density was analyzed, the largest occurrences were observed in the eastern region of Bolivia and Acre, northern Rondônia state, southern Amazonas and part of the southwest, northeast and central-north regions of State of Mato Grosso. Therefore, trends were analyzed by Municipalities, in general, significant positive trends were noted in the Municipalities of Humaitá, Novo Aripuanã and Tapauã in the State of Amazonas, in the Municipality of Manoel Urbano in the State of Acre, in the Municipalities of Anzaldo, Ravelo, Sica Sica, Tacopaya and Tapacarí in Bolivia, located in the western region of the country. Subsequently, the influence of precipitation and

deforestation on the occurrence of active fires was analyzed, it was observed that the variability of annual precipitation significantly explains the occurrence of active fires in the State of Acre and Bolivia and annual deforestation significantly explains the occurrence of active fires in the states of Mato Grosso, Rondônia and Acre. Additionally, we analyzed the spatial anomalies of active fires and annual precipitation during the drought episodes of 2005, 2007, 2010, 2015, 2019 and 2020. In 2005, negative relationships were observed between the increase in active fires ($+4\sigma$) and reduction of annual precipitation (-900 mm) in eastern Bolivia and Acre, southern Amazonas, and northwestern Mato Grosso. In 2007, the greatest spatial correspondence of positive anomalies of active fires ($+3.8\sigma$) occurred in the State of Mato Grosso with negative anomalies of precipitation (-600 mm), in 2010, the greatest negative relationship of positive anomalies of active fires ($+4\sigma$) and reduction of precipitation (-300 mm and -600 mm), was noted in eastern and northeastern Bolivia and southern Mato Grosso. In 2015, there was a lower positive anomaly ($+3.5\sigma$) of active fire compared to other years, concentrated in the State of Amazonas, a region that presented precipitation anomalies (-900 mm). In 2019 and 2020, positive anomalies ($+4\sigma$) of widespread fire outbreaks were observed across the study area compared to previous years, highlighting the negative relationship of fires in the southeastern region of Bolivia in 2019 with precipitation reductions (-900 mm). Finally, we analyzed the temporal and spatial variability of active fires by Department of Bolivia and a discussion of public policies. This study allowed us to understand the dynamics of occurrences of active fires and their relationship with rainfall variability and deforestation in Bolivia and the Brazilian states of Acre, Amazonas, Mato Grosso and Rondônia, allowing us to visualize trends and affronts to reduce fires in the region.

Sumário

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS.....	22
2.1. Objetivo Geral	22
2.2. Objetivos específicos.....	22
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4. DADOS E METODOLOGIA	34
4.1. Descrição da área de estudo.....	34
4.2. Dados	35
4.3. Análise dos dados	36
4.3.1. Análise temporal dos focos de queimadas	37
4.3.2. Análise da variabilidade espacial dos focos de queimadas.....	39
4.3.3. Análise da tendência dos focos de queimadas	40
4.3.4. Análise da correlação e regressão entre focos de queimadas e precipitação e desmatamento	42
4.3.5. Análise da anomalia espacial dos focos de queimadas e precipitação.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
CAPÍTULO 1	15
Quevedo. et al., 2022. A definir.	15
6.1. Análise da distribuição interanual dos focos de queimadas	45
6.2. Ciclo anual dos focos de queimadas.....	55
6.3. Análise da distribuição espacial da ocorrência dos focos de queimadas na região central da América do Sul	57
6.3.1. Frequência dos focos de queimadas.....	57
6.3.2. Densidade de Kernel dos focos de queimadas.....	59
6.4. Tendência por Municípios dos focos de queimadas na região central da América do Sul 60	
6.5. Análise da relação entre focos de queimadas com a precipitação e desmatamentos	62
6.6. Anomalias dos focos de queimadas durante anos com eventos de secas	70
7. Conclusões	76

CAPÍTULO 2	77
Quevedo. et al., 2021. Variação espaço-temporal dos focos de queimadas sobre a Bolívia a partir de observações remotas.....	77
Resumo	77
Keywords:.....	77
Introdução.....	77
Dados e Metodologia.....	79
Resultados e discussão	81
Conclusões.....	88
8. SÍNTESE.....	99
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	102

LISTA DE TABELAS

Tabela do Capítulo 1

Tabela 1. Frequência de ocorrência dos focos de queimadas.....40

Tabela 2. Lista dos Estados brasileiros e Bolívia, suas áreas; números de focos de queimadas detectados (F); média anual de F; área pela média anual de F (densidade de F); classificação da frequência de focos de queimadas. Os Estados estão em ordem decrescente em relação à densidade de F.58

Tabela do Capítulo 2

Tabela 1. Classificação da frequência de ocorrência dos focos de queimadas de acordo com White (2018)..... 90

Tabela 2. Lista dos Departamentos da Bolívia e suas áreas; números de focos de queimadas detectados (FQ); média anual de FQ; área pela média anual de FQ (densidade de FQ); classificação da frequência de focos de queimadas de acordo com White (2018). Os departamentos estão em ordem decrescente em relação à densidade FQ..... 90

Tabela 3. Reformas de políticas agrárias, florestais e de queimadas (2006–2020) na Bolívia. Adaptado de Redo et al. (2011); International Rights of Nature Tribunal (2020); Correo del Sur (2019)..... 90

LISTA DE FIGURAS

Figuras do capítulo 1

- Figura 1. Localização da região Central da América do Sul, envolvendo a Bolívia e os Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso..... 34
- Figura 2. Fluxograma das etapas da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho. 37
- Figura 3. Série temporal do total anual de focos de queimadas na Bolívia e Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso entre 2003 e 2020..... 46
- Figura 4. Focos de queimada no Estado do Amazonas: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003– 2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020. 48
- Figura 5. Focos de queimada no Estado de Rondônia: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003– 2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020. 50
- Figura 6. Focos de queimada no Estado do Acre: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003– 2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020. 51
- Figura 7. Focos de queimada no Estado de Mato Grosso: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020. 52
- Figura 8. Série temporal do acumulado anual da ocorrência de focos de queimadas nos Estados brasileiros: (A) Amazonas, (B) Rondônia, (C) Mato Grosso e (D) Acre em comparação com os demais Estados da Amazônia Legal, durante o período de 2003–2020. . 54
- Figura 9. Boxplot mensal do número de focos de queimadas: (A) Amazonas, (B) Rondônia, (C) Mato Grosso e (D) Acre, no período 2003–2020. As letras A, B, C e D sobre os box-plots indicam os grupos com diferenças significativas. Os meses não agrupados com a mesma letra são significativamente diferentes com base no teste de Tukey. 57
- Figura 10. Frequência dos focos de queimadas na região central da América do Sul, durante o período de 2003 a 2020. Os Estados brasileiros e Departamentos da Bolívia são representados por siglas: AM (Amazonas), AC (Acre), MT (Mato Grosso), RO (Rondônia), BN (Beni), SC

(Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).....	58
Figura 11. Densidade de kernel dos focos de queimadas de 2003 a 2020, na região central da América do Sul.	60
Figura 12. Tendência temporal de Mann-Kendall por Municípios do Estado do Amazonas, durante o período de 2003 a 2020. As Estados e Bolívia é mostrada em siglas: BO (Bolívia), AM (Amazonas), RO (Rondônia), MT (Mato Grosso) e AC (Acre). A significância da tendência do teste de Mann-Kendall é apresentada por cores e letras com sinal: s- (significativa negativa; cor verde), ns- (não significativa negativa; cor lima), nt (não tem tendência; cor amarela), ns+ (não significativa positiva; cor laranja) e s+ (significativa positiva; cor vermelha).	62
Figura 13. Regressão linear para o Estado do Amazonas: (A) focos de queimadas e precipitação durante o período de 2003 a 2019, (B) focos de queimadas e desmatamentos durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.....	64
Figura 14. Regressão linear no Estado de Rondônia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.....	65
Figura 15. Regressão linear no Estado do Mato Grosso: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.....	66

Figura 16. Regressão linear no Estado de Rondônia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.....67

Figura 17. Regressão linear na Bolívia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020.69

Figura 18. Anomalias de focos de queimadas durante os anos 2005, 2010, 2015 e 2020. As siglas indicam os nomes dos Estados brasileiros: AM (Amazonas), AC (Acre), MT (Mato Grosso). RO (Rondônia) e BO (Bolívia).74

Figura 19. Anomalias de precipitação anual do TRMM na Bolívia e nos Estados do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia. As anomalias de cada ano são em relação à média anual durante o período de 2003 a 2019.75

Figuras do capítulo 2

Figura 1. Localização da Bolívia na América do Sul, com seus nove Departamentos. Fonte da imagem satelital: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community (http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery)

Figura 2. Focos de queimada na Bolívia: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A vermelho(laranja) indica o valor médio do período de 2003– 2010 (2011– 2020), respectivamente. A linha preta pontilhada vertical em A indica o ponto de mudança da série temporal baseado no teste do Pettitt ao nível de 5% de confiança

Figura 3. Série temporal do total anual de focos de queimadas por Departamento da Bolívia entre 2003 e 2020. A linha horizontal em cada gráfico indica o valor médio.

Figura 4. Série temporal das anomalias anuais de focos de queimadas por Departamento da Bolívia entre 2003 e 2020

Figura 5. Boxplot mensal do número de focos de queimadas na Bolívia no período 2003–2020. As letras A, B, C e D indicam os grupos com diferenças significativas. Os meses não agrupados com a mesma letra são significativamente diferentes com base no teste de Tukey.

Figura 6. (A) Frequência (%) e (B) densidade de focos de queimadas por Departamento da Bolívia, para o período de 2003 a 2020. Os Departamentos são representados por siglas: BN (Beni), SC (Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).

Figura 7. Categorização dos Departamentos da Bolívia de acordo com a classificação proposta White (2018), baseada na média anual correspondente aos períodos: (A) 2003–2010 e (B) 2011–2020. Os Departamentos são representados por siglas: BN (Beni), SC (Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos 20 anos o número de focos de queimadas triplicou na América do Sul, saindo de 136.142 focos em 1998 para 458.948 focos em 2020 (INPE, 2020a). De acordo com Santos et al. (2014), entre os anos de 2000 e 2012, cerca de 16% das queimadas ocorridas no mundo foram na América do Sul, sendo a maior incidência na região central, que envolve a Bolívia e os estados brasileiros do Mato Grosso, Rondônia e Acre.

Chen et al. (2013) observaram que nos anos de 2005, 2007 e 2010 ocorreram os maiores números de queimadas na América do Sul, entre os anos 2001 e 2012, associado às atividades agropecuárias, desmatamentos e intensificado pelas fortes secas. Anderson et al. (2018) mostraram, a partir de uma classificação de intensidade de seca variando de moderada a extremamente seca, determinada através do índice de precipitação normalizada, que em 2015 e 2016, cerca de 46% da área da Amazônia Legal brasileira foi atingida pela seca intensa, comparado com 16% em 2009/2010 e 8% em 2004/2005, sendo a maior área afetada desde 1981, o que indica condições ambientais favoráveis para o aumento de queimadas nesses anos.

Estudo realizado por Caúla et al. (2015) evidenciaram que entre os anos 1998 e 2011, a região Centro Oeste do Brasil teve o maior número de queimadas com 37,1% do total ocorrido no país nesse período, em que os Estados de Mato Grosso e Rondônia fazem parte dessa região. Sai (2020) também mostrou que o Estado brasileiro com maior ocorrência de focos de queimadas foi Mato Grosso entre 1998 e 2017.

Em 2019 no Brasil, até o mês de agosto, foi registrado um aumento de três vezes o número de focos de queimadas em relação ao mesmo período de 2018, mesmo na ausência de evento de seca intensa, sendo que esse aumento esteve relacionado ao desmatamento ilegal e há uma lenta resposta do governo brasileiro ao combate ao desmatamento e queimadas (BRANDO et al., 2020a). Na Bolívia, em 2019, também foram observadas anomalias positivas de queimadas particularmente na região sudeste, nas florestas do Gran Chaco e Chiquitano de agosto a novembro (VOILAND, 2019).

Em 2020 as queimadas ocorreram novamente em toda a região da Amazônia, com cerca de 1,4 milhão de focos de queimadas detectados no sul da Amazônia, em comparação com 1,1 milhão em 2019, a atividade de desmatamento aumentou 23% de 2019 a 2020, e as detecções ativas de incêndios no sub-bosque foram 60% mais altas do que em 2019 (VOILAND, 2020).

O aumento das queimadas nos últimos 20 anos na América do Sul esteve associado à ação antrópica e aos eventos de secas intensas (CHEN et al., 2011; BILBAO et al., 2020). Entre as diversas causas antropogênicas que podem favorecer a ocorrência das queimadas, citam-se: manutenção de pastagens (controle de pragas, limpeza e renovação da pastagem); desmatamentos para converter florestas em áreas para produção agropecuária; manutenção da atividade agrícola; construção de rodovias e estradas; projetos de assentamentos e exploração madeireira, as quais podem variar entre diferentes regiões (REDO et al., 2011, RODRÍGUEZ, 2012; SILVA et al., 2018).

Nos últimos anos, o aumento da ocorrência das queimadas na Bolívia pode estar vinculado à migração de grande número de pequenos agricultores, principalmente, das comunidades de terras altas (Occidental) para as zonas florestais das terras baixas (Oriental) das planícies da Bolívia, associada às políticas públicas de incentivo à expansão da atividade agropecuária e a incapacidade do Estado no controle das queimadas, já que cerca de 95% das queimadas foram ilegais (BRADLEY e MILLINGTON, 2006; ABT, 2011; FAO, 2018; TIERRA, 2019).

Como observado por diferentes estudos, as queimadas têm ocasionado uma série de impactos ambientais negativos (BRANDO et al., 2014; SILVA et al., 2018), na saúde (ARBEX et al., 2004; ALVES et al., 2017) e econômicos (BROWN et al., 2006). Segundo Mielnicki et al. (2004) e Guimarães et al. (2014) as queimadas geram impactos em diferentes escalas: local, regional e global. Em escala local geram a degradação da floresta, mortalidade da fauna silvestre, redução da atividade dos microrganismos, redução da matéria orgânica, erosão do solo, redução de nutrientes do solo e alteração do microclima local, entre outros. Em escala regional afeta na qualidade do ar, qualidade da água, diminuição da radiação solar, entre outros. Em escala global, as emissões das queimadas contribuem para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera e entre outros efeitos.

Em 2019, foram estimadas uma quantidade superior a 5,9 milhões de mortes de mamíferos diretamente causadas pelos incêndios florestais na Chiquitania na Bolívia em uma área de 20.000 km² (Pacheco et al., 2021).

Ainda, os efeitos dos incêndios florestais associados aos eventos climáticos de secas intensas podem conduzir com mais intensidade a degradação da floresta. Em um experimento de incêndio florestal prescrito em parcelas de 50 hectares e em escala de longo prazo feito entre 2004 a 2009 no sudeste da Amazônia, tem sido observado o aumento abrupto da mortalidade das árvores entre 226% e 462% em comparação aos anos sem seca, favorecendo

a invasão por gramíneas, principalmente, nas áreas de borda das florestas (BRANDO et al., 2014). Ademais, a degradação ocasionada pelos incêndios florestais provoca a redução na densidade de árvores, redução da riqueza de espécies e redução de biomassa seca acima do solo (SILVA et al., 2018).

No contexto das mudanças climáticas, são esperados o aumento da frequência e intensidade dos eventos de secas e, conseqüentemente, das queimadas (JIA et al., 2019). Para a estação seca do ano 2020, observou-se um de alto risco de ocorrência de queimadas da vegetação na região central da América do Sul, especificamente para os Estados brasileiros do Acre, Mato Grosso e Rondônia e para os departamentos (divisão territorial) de Santa Cruz, El Beni e Pando na Bolívia, associado ao aquecimento da superfície do mar dos Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Norte (GFED, 2020).

Dado que as ocorrências das queimadas acontecem em escala continental, o sensoriamento remoto tem sido utilizado como uma ferramenta essencial para a detecção e monitoramento dos focos de queimadas, uma vez que permite obter informações de áreas extensas e remotas, facilitando as atividades de planejamento de prevenção, controle e mitigação dos danos das queimadas (BATISTA, 2004; PONVERT-DELISLES, 2009; GRANEMANN e CARNEIRO, 2009).

Diante do exposto, se faz necessário conhecer a variação espaço-temporal dos focos de queimadas na região central da América do Sul, envolvendo a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia; assim como o conhecimento sobre a tendência temporal e espacial das queimadas; a relação entre as queimadas com a precipitação e o desmatamento. Estas informações são essenciais para contribuir no conhecimento sobre a dinâmica das queimadas nos locais de estudo; para o monitoramento, adoção de políticas públicas em termos de prevenção, redução das emissões e diminuição das queimadas, a fim de garantir a qualidade de vida da população e do meio ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a variabilidade espaço-temporal dos focos de queimadas na região central da América do Sul e sua relação com a variabilidade da precipitação e do desmatamento, entre os anos de 2003 e 2020.

2.2. Objetivos específicos

1. Estudar a variabilidade temporal da ocorrência dos focos de queimadas nos departamentos da Bolívia e nos Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso;
2. Analisar a distribuição espacial dos focos de queimadas na área de estudo;
3. Analisar a tendência temporal e espacial de ocorrência dos focos de queimadas na área do estudo;
4. Avaliar a relação entre focos de queimadas com a precipitação e desmatamentos para a área do estudo;
5. Analisar as anomalias espaciais dos focos de queimadas e precipitação durante anos de secas intensas na área do estudo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os focos de queimadas se referem à detecção de fogo na vegetação, feito a partir de imagens digitais de sensores em satélites ambientais (ZAMORA, 2016; INPE, 2021a). Em satélites em órbita polar, o foco de queimada é detectado se a frente de fogo na superfície da terra tem cerca de trinta metros de comprimento e um metro de largura. Um foco indica a existência de fogo em um elemento de resolução espacial da imagem, o pixel. Neste pixel pode haver uma ou várias queimadas distintas, que a indicação será em um único foco, e se uma queimada for muito extensa, será detectada em mais de um pixel, ou seja, vários focos estarão associados a uma única queimada (INPE, 2020).

A detecção de queimadas é realizada usando um algoritmo que examina cada pixel, a informação utilizada no algoritmo é a radiação emitida pela superfície, que corresponde a faixa de energia infravermelha, entre 0,65 e 12 μm , em que a vegetação em chamas emite energia na faixa 3,7 a 4,1 μm do espectro eletromagnético e os outros comprimentos de onda são utilizados para descartar os falsos alarmes e mascaramento de nuvens (GARCIA; PIVETTA, 2019) (GIGLIO et al., 2003).

No Brasil, por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o sistema operacional de detecção das queimadas vem sendo aprimorado desde a década de 1980. Atualmente, o sistema é composto por dez satélites com sensores óticos, de órbita polar (AVHRR/3 dos NOAA-18, NOAA-19 e METOP-B e C, MODIS dos NASA TERRA e AQUA e as VIIRS do NPP-Suomi e NOAA-20) e satélites geoestacionários (GOES-16 e MSG-3), os quais disponibilizam dados para cada Estado do país, além dos demais países da América do Sul. Os dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites TERRA e AQUA, são utilizados como referência para a detecção e quantificação dos focos de queimadas desde 2002 (DE SOUZA et al., 2004; MORISETTE et al., 2005; INPE, 2020).

Os focos de queimadas detectados a partir do AQUA representam melhor o que ocorre na superfície, em comparação aos detectados pelo TERRA, pela diferença no horário das passagens destes satélites sobre a região tropical e subtropical (TERRA e AQUA com passagens às 10:30h (22:30h) e 13:30h (01:30h) hora local, respectivamente). Assim, observa-se um ciclo diurno diferenciado entre o meio da manhã e o início da tarde entre os dados destas duas plataformas, com o satélite AQUA detectando um maior número de focos de queimadas na floresta tropical durante o ciclo diurno (GIGLIO et al., 2006). O INPE tem usado seu próprio algoritmo de detecção de focos de queimadas para imagens MODIS (até a “Collection 5”) e, recentemente, adotou o mesmo algoritmo da NASA, lançando a nova versão da base de dados (“Collection 6”) em junho de 2018 (INPE, 2018).

Assim, o produto de focos de queimadas do sensor MODIS têm sido amplamente usado para ajudar a entender a distribuição espacial e temporal no sistema terrestre, estudos feitos em escala global (GIGLIO et al., 2006; PAGE et al., 2008; OOM e PEREIRA, 2012) e sobre a América do Sul (CHEN et al., 2011; PORTILLO et al., 2013; SANTOS et al., 2014; WHITE, 2017; HEYER et al., 2018).

Em qualquer latitude e em qualquer ecossistema, para que ocorra o incêndio na vegetação, três condições simultâneas são necessárias: condições climáticas de seca, disponibilidade de combustível vegetal e a existência de fontes de ignição (NEPSTAD et al., 1999). As queimadas podem ser classificadas em: queimadas por desmatamento (intencionais), queimadas por manutenção (intencionais), queimadas acidentais e naturais. As queimadas por desmatamento são associadas ao corte e queima de florestas para a formação de pastagens, sistemas agrícolas ou plantações. Queimadas para manutenção são utilizadas no manejo e limpeza de pastagens, para o controle de ervas daninhas e limpeza de resíduos de

colheita do campo agrícola. As cinzas da queima de biomassa favorecem a fertilização do solo, no entanto, em longo prazo, a queima pode reduzir acentuadamente a produtividade das pastagens e cultivos agrícolas. Queimadas acidentais são as que escapam ao controle de queima intencional e podem afetar grandes regiões, principalmente durante secas intensas. Queima natural da vegetação são aquelas causadas, principalmente, pelos raios e a frequência de ocorrência é menor em comparação as queimadas antropogênicas (NEPSTAD et al., 1999; SCHROEDER et al., 2009).

As savanas e pastagens são ecossistemas mais inflamáveis do que as florestas, dado que possuem um abundante material vegetal fino próximo ao solo. A seca sazonal e a radiação solar direta permitem que essa camada de vegetação seque, de modo que sejam facilmente queimados com a existência de fontes de ignição. Os ecossistemas florestais, mesmo que contenham mais material vegetal são mais difíceis de queimar, a vegetação fica mais elevada do que as savanas e pastagens e grande parte desse material vegetal está em caules lenhosos que exigem maiores tempos de contato com o fogo para queimar do que folhas secas. Além da existência de um microclima úmido, a queimada neles pode acontecer no chão da floresta (folhas e galhos secos) e na coroa das árvores (NEPSTAD et al., 1999).

De acordo com a ABT (*Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra*), entre os anos 2000 e 2010 na Bolívia, mais de 95% das queimadas foram ilegais e de acordo com o tipo de uso do solo, 57% das queimadas ocorreram em áreas de pecuária, 31% em terras de produção florestal permanente, 8% em áreas de uso agrícola e 4% em outros tipos de uso do solo (ABT, 2011). No Brasil, cerca de 1,65 milhão de focos de queimadas foram registrados nos anos 2000 a 2009, sendo o Estado do Mato Grosso com maior número de ocorrência de queimadas, representando 27,7% do total ocorrido no país e com média anual de 39.267 focos de queimadas; o Estado de Rondônia esteve em sétimo lugar com média anual de 8.495 focos de queimadas; o Estado do Amazonas em décimo terceiro lugar com média anual de 2.053 focos de queimadas e Acre em décimo oitavo com média anual de 1.122 focos de queimadas (KAZMIERCZAK, 2011). De acordo com Ramos et al. (2011), para o período de 2005 a 2010, há uma correlação entre as ocorrências de focos de queimadas e desmatamentos ocorridos na Amazônia Legal, entre os Estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Mato Grosso, em termos de distribuição espacial.

No Estado do Mato Grosso, Venturieri et al. (2013) analisaram as classes do uso do solo de 2008 que foram queimadas em 2010 e, também, a conversão do uso do solo nas áreas queimadas de 2008 no ano de 2010. No primeiro caso, foi observado que cerca de 65%

(1.192,2 km²), 9,1% (166,1 km²) e 3,6% (66,9 km²) das áreas queimadas em 2010, eram áreas de pastagens, vegetação secundária e agrícola em 2008, respectivamente. No segundo caso, 40,6% (395,3 km²) e 30% (292,1 km²) da área queimada em 2008, foram destinados para pasto limpo e agricultura em 2010, respectivamente. Desse modo, as queimadas estiveram associadas sobretudo à expansão e manutenção de pastagens, onde a atividade pecuária se constitui como a principal causa das queimadas no Estado, seguida pela abertura de novas frentes para a agricultura, associadas ao desmatamento.

Registros de queimadas no Estado do Acre, entre os anos 2010 e 2011, onde as maiores ocorrências estiveram concentradas na região leste do Estado, coincidiram com as áreas de maior desmatamento e fragmentação florestal, sendo a atividade agropecuária e assentamentos os maiores responsáveis pelo aumento da ocorrência das queimadas. Em 2010 foi o ano com maior área queimada (2.000 km²) associada a eventos de secas intensas e, já em 2011, houve uma redução das queimadas devido ao aumento da precipitação e políticas públicas que fomentaram as práticas de proteção ambiental (ANDRADE et al., 2013).

No Estado do Amazonas, entre os anos de 2003 e 2012, 60% dos focos de queimadas foi registrado na maior parte da porção sul, compreendendo apenas sete dos 62 municípios: Lábrea (15%), Apuí (11%), Manicoré (9%), Boca do Acre (9%), Canutama (6%), Novo Aripuanã (5%) e Humaitá (4%). O ano com maior número de ocorrência de focos de queimadas foram em 2010 (8.826), seguido por 2009 (7.915) e 2012 (7.745). Quanto à época de queimadas, foram observados maiores ocorrências em agosto, setembro e outubro (VASCONCELOS et al., 2013).

Um estudo sobre a correlação entre focos de queimadas, desmatamento e alteração da cobertura da terra na floresta tropical seca da Bolívia, durante os anos de 2001 e 2005, evidenciou uma significativa relação entre os focos de queimadas e desmatamento em blocos amostrais onde a cobertura florestal ocupava entre 65% a 70% da área (PORTILLO et al., 2013).

Entre os anos 2000 e 2013 na Bolívia, 32.000 km² foram queimados, sendo 70%, predominantemente, áreas de pastagens, savanas e áreas antrópicas e 30% foram em florestas, sendo que nos anos 2004 (69.844 km²), 2005 (62.015 km²) e 2010 (100.460 km²) foram registradas as maiores áreas queimadas. As queimadas estiveram concentradas espacialmente na região leste do país, entre os departamentos de Santa Cruz e Beni, na divisa com o Brasil. Estes dois departamentos concentraram 95% das queimadas do país. Além disso, 66% das ocorrências das queimadas estiveram concentradas em uma proximidade de não mais de um

quilômetro das áreas desmatadas, o que sugere a ligação entre desmatamentos e queimadas. Quanto à variabilidade mensal, os meses com maior área queimada foram os meses de agosto e setembro (RODRIGUEZ-MONTELLANO A.M., 2014).

Segundo Blacutt et al. (2015), durante o período 1990 a 2009, houve precipitação diária abaixo de 1 milímetro (mm) entre os meses de junho a setembro na Bolívia, o que pode ter favorecido a ocorrência de queimadas observadas por Rodriguez-Montellano A.M. (2014). Além disso, na estação seca inicia a limpeza das áreas agrícolas e pastagens, que tem como principal ferramenta o uso do fogo, o que causa o maior número de queimadas na região (TIERRA, 2019).

No Estado de Rondônia, um estudo sobre áreas afetadas por queimadas, entre os anos 2000 e 2010, apresentaram variabilidade anual, com maiores áreas afetada nos anos 2005 (18.468 km²) e 2010 (14.572 km²), relacionados com eventos de secas intensas. As áreas queimadas estiveram espacialmente na porção central norte, no meio leste e no sul do Estado. Com relação à área queimada e o uso do solo, observou-se que as maiores áreas queimadas foram as de áreas de extrativismo vegetal (14.994 km²), com destaque para a exploração da seringueira, castanha-do-pará e óleo de copaíba, seguida por áreas de pecuária de animais de grande porte e cultivos permanentes diversificados (14.525 km²) e por áreas exclusivas de pecuária de animais de grande porte (12.409 km²) (CARDOZO et al., 2014).

Estudo realizado por Caúla et al. (2015) evidenciaram que durante os anos 1998 a 2011, a região Centro Oeste do Brasil teve o maior número de queimadas com 37,1 % do total de focos ocorridos do país nesse período, em que os Estados de Mato Grosso e Rondônia foram segundo e terceiro, respectivamente, na posição dos Estados com maior densidade de focos de queimadas por unidade de área. Dentre os principais fatores que contribuíram para o aumento de queimadas nestes Estados e incluindo o Acre e Amazonas, citam-se: ampliação da economia com base na atividade extensiva de criação de bovinos, agricultura extensiva para alimentos básicos (por exemplo, milho e soja) e comércio de madeira. Quanto à variabilidade sazonal dos focos de queimadas no Brasil, 62,2% ocorreram na estação de primavera (setembro, outubro e novembro) e 28,7% no inverno (junho, julho e agosto), sendo os meses de agosto, setembro e outubro com maior frequência de ocorrência de queimadas, com pico positivo em setembro, associadas à estação seca, especialmente no final do inverno e início da primavera (região centro oeste), e à temporada do uso de fogo pelas atividades de agricultura e pecuária.

Em 2015 no Mato Grosso, de acordo com o relatório da Secretaria do Estado do Meio Ambiente do Mato Grosso (SEMA), as propriedades rurais cadastradas no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural foram responsáveis por 49% dos focos de queimadas, 21% em áreas não cadastradas, 14% em terras indígenas, 13% em assentamento e 3% em unidades de conservação. Já com base na quantificação dos focos de queimada por bioma, a Amazônia (64%) foi o bioma mais atingido pelas queimadas, seguido pelo bioma Cerrado (31%) e bioma Pantanal (5%) (SEMA, 2015).

Segundo Cano-Crespo et al. (2015), nos Estados do Mato Grosso e Rondônia, entre os anos 2001 e 2010, as queimadas ocorreram em maior parte sobre pastagens, representando cerca de 30% do total das áreas queimadas para ambos Estados. Em menor proporção, no entanto representativas, no Estado do Mato Grosso, 27,5% ocorreram em áreas agrícolas e 16,3% em florestas; para o Estado de Rondônia, 25,5% ocorreram em floresta, seguida pelas áreas em regeneração com 13,4%. Além disso, foi evidenciada uma forte influência de escape das queimadas provenientes de manejo de pastagem e agricultura para as florestas. Em geral, mostrou uma significativa variabilidade interanual da área queimada e uma tendência crescente no final do período de estudo.

Enquanto isso, simulações de ocorrência de incêndios florestais para o ano 2025 foram realizadas para a Bolívia, considerando as condições climáticas de secas intensas e as políticas econômicas que levam à expansão da fronteira agrícola, ampliação da rede de estradas pavimentadas de acordo com as projeções nacionais e desmatamentos. Somente as condições secas intensas aumentaram a área de alto risco de incêndio em 69%, as interações entre condições de secas intensas e expansão rápida da fronteira agrícola, aumentaram em até 1,8 vezes em comparação as áreas queimadas em 2010 (ano com maior área queimada queimadas até agora) (DEVISSCHER et al., 2016a; *Rapid growth Scenario*).

Ainda, simulações de desmatamentos para a região das planícies da Bolívia foram feitas de acordo com as políticas públicas que incentivam a expansão agrícola, pecuária, ampliação de redes de estradas e exploração de petróleo em unidades de conservação. O desmatamento se expande para quase todas as planícies bolivianas, atingindo 379.444,3 km², o que equivale a cerca de 34,5% da superfície do país e deixa pequenos fragmentos florestais em algumas áreas protegidas. Desse modo, é demonstrado como as decisões atuais e futuras realizadas pelos governos, podem afetar as tendências futuras de desmatamento no país (TEJADA et al., 2016; *Fragmentation scenario*) e, conseqüentemente, pode levar a redução

da precipitação da estação seca, contribuindo ainda mais para a intensidade e frequência das queimadas na região (ARAUJO e PONTE, 2011).

Estudo de Van Marle et al. (2017), constatou que a variabilidade interanual das queimadas na Bolívia e na região do arco do desmatamento do Brasil, até 1987 apresentou baixa ocorrência de queimadas nos primeiros anos do estudo. Nos anos 90, a ocorrência de queimadas começou a aumentar, tendo um pico de maior ocorrência em 1995 em relação ao período estudado (1973 a 2014). Durante os anos 2000, os autores verificaram uma tendência decrescente, embora 2010 tenha sido o segundo ano com maiores ocorrências de queimadas. Ainda, observaram a ligação entre queimadas e desmatamentos, em que 33% da variabilidade das queimadas foi explicada pela perda de floresta, o que sugere que o desmatamento impulsiona as queimadas.

De acordo com Silva et al. (2018), no período de 1984 a 2016, a área de floresta afetada pelo fogo foi de 5.251,5 km² no Acre. Além disso, nos últimos 16 anos do período estudado, a área de florestas queimadas foi 36 vezes maior do que a área queimada nos primeiros 16 anos da série temporal. Houve uma maior frequência na ocorrência de incêndios florestais nos anos 1987, 1998, 2005, 2010 e 2016, em média a cada sete anos associados aos eventos de secas intensas, onde os anos de 2005 (3.508,8 km²) e 2010 (1.200,9 km²) foram os anos com maior área de floresta queimada, representando 90% dos incêndios florestais. Em geral, os incêndios florestais estiveram concentrados na região leste do Estado, que é a região com maior intensidade de uso do solo e são áreas de maior pressão de desmatamento devido, principalmente, à atividade pecuária, respondendo por 88% (3.820,28 ha) de toda a floresta afetada pelo fogo. Em função da estrutura fundiária do Estado, 46% da área queimada ocorreram em projetos de assentamentos, seguidos pela propriedade privada, com 28% e 16% em Unidades de Conservação. Já as Terras Indígenas são as menos susceptíveis a ter suas florestas degradadas por uso de fogo, desmatamento ou exploração madeireira.

Estudo de Heyer et al. (2018), relataram para o período de 2001 a 2015, uma média de 10.574 focos de queimadas por ano na Bolívia com dados do MODIS, dos quais 85% foram detectados entre agosto a outubro. Os anos de 2004, 2005, 2007, 2008, 2010 e 2011 apresentaram ocorrência de queimadas acima da média para o mesmo período.

Na Bolívia, o ano de 2019 foi um dos anos com maior ocorrência de queimadas o que levou a uma grande repercussão internacional (GFW, 2020). Até o mês de setembro de 2019, 29% do total da área queimada corresponderam às áreas que foram queimadas pela primeira vez, em relação aos períodos entre 2001 e 2018, o que significa uma forte pressão no uso de

terra de novas áreas (FAN, 2019a). Em outro relatório de FAN (2019a), até novembro de 2019, 69% da área queimada foram áreas de vegetação arbustiva e pastagens e 31% em florestas, do total da área queimada no país, o departamento de Santa Cruz foi responsável por 65% (41.000 km²) da superfície afetada por queimadas, superando o recorde histórico do 2010 (38.000 km²) ocorrido neste departamento. Quanto às áreas protegidas nacionais, cerca de 12.000 km² foram queimados em 2019, representando 19% do total da área afetada no país. Isso mostra a forte pressão antropogênica sobre as áreas protegidas e a insuficiente fiscalização.

No departamento de Santa Cruz da Bolívia, até setembro de 2019, de acordo o tipo de propriedade, a maior parte da superfície queimada foram terras fiscais (propriedade do Estado), representou o 46,7% (16.845,82 km²) do total da área queimada, seguido pela propriedade empresarial com 20,0% (7.208,99 km²), as TCO (*Tierras Comunitárias de Origen*) e TIOC (*Territorios Indígena Originario Campesinos*) com 10,7% (3.874,28 km²) e as medianas propriedades com 6,3% (2.278,82 km²). Sendo os municípios da região leste de Santa Cruz de San Matías (8.478,34 km²) e San Ignacio de Velasco (6.782,17 km²) com as maiores quantidades de área queimada do departamento (FUNDACIÓN TIERRA, 2019). Em 2020, na Bolívia, as áreas queimadas de acordo com o tipo de vegetação representaram: 72% em áreas não florestais (savanas, cerrado e arbustivos), 23% em florestas e 5% em áreas agropecuárias. Por outro lado, do total das áreas queimadas no país, 39% ocorreram em áreas protegidas (FAN & WCS, 2021). Isso mostra uma forte pressão da ação humana para uso de novas áreas e uso ilegal das queimadas.

O MapBiomias (2021b) também apresentou recentemente o mapeamento de queimadas (coleção 1) com relação as classes de cobertura e uso da terra no Brasil entre 1985 e 2020. No Estado do Amazonas detectou maior área queimada no tipo de cobertura natural (57%), comparado ao uso antrópico por áreas de pastagem (43%). Similar situação detectaram no Estado do Mato Grosso, em que 58% da área queimada ocorreram em áreas de cobertura natural e nas áreas antrópicas principalmente em pastagem (35%) e soja (3%). Tanto no Estado do Amazonas quanto no Mato Grosso, as áreas naturais representam a maior porcentagem de áreas queimadas, o que pode estar vinculado ao escape principalmente decorrentes das queimadas das áreas desmatadas e pastagens. Nos Estados do Acre e Rondônia as áreas de pastagens foram o tipo de uso antrópico dominante das áreas queimadas. No Acre, 83% da área afetada pelo fogo ocorreram em pastagens e 16% em cobertura de

formação florestal e no Estado de Rondônia, 72% em áreas de tipo de uso de pastagens e 2% soja e lavouras temporárias, 26% em cobertura natural (MAPBIOMAS, 2021).

Na região do arco do desmatamento do Brasil, incluindo a Bolívia, as queimadas estão associadas ao desmatamento e existe maior pressão da conversão florestal em regiões onde a estação seca é mais longa (LE PAGE et al., 2010). Mas, também, o desmatamento reduz a precipitação regional, produzindo um feedback positivo entre desmatamento e secas, à medida que aumenta o desmatamento, gera redução da evapotranspiração, redução da precipitação e aumento de secas. Na região da Bacia Amazônica, os efeitos do desmatamento de 2003 a 2014 na precipitação de 2014, ocorreram principalmente na região sudoeste da Amazônia com uma redução de quatro milímetros do máximo déficit hídrico acumulado. Além disso, as estimativas mostram que, em média, a conversão de uma hectare de floresta para terra cultivada durante a estações secas, causaria uma redução de quinhentos mil litros de precipitação reciclada por ano (STAAL et al., 2020).

A precipitação na América do Sul também está associada as oscilações da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Pacífico e do Atlântico. Os eventos de secas de 2005, 2010 e 2015 estiveram relacionadas aos aquecimentos anômalos da TSM do Pacífico, causando uma redução da precipitação na região nordeste da Amazônia e o aquecimento anômalo da TSM no Atlântico, que gera condições de secas no sul e oeste da Amazônia (JIMENEZ et al., 2018). Segundo Chen et al. (2011), a variabilidade interanual e sazonal das ocorrências dos focos de queimadas têm sido definidos pelos eventos climáticos de secas intensas no Brasil e na Bolívia. Entre os anos 2001 e 2009, evidenciaram uma correlação positiva significativa entre as ocorrências das queimadas com as anomalias positivas de *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO) para os Estados brasileiros de Rondônia, Pará, Amazonas, Acre e o departamento do Beni na Bolívia, enquanto as anomalias positivas de *Oceanic Niño Index* (ONI) afetaram o Estado do Mato Grosso. Notavelmente, os anos de maiores quantidades de queimadas em 2004, 2005 e 2007 apresentaram os maiores valores positivos de AMO e valores positivos de ONI, enquanto no ano 2009 de menor quantidade de queimadas, a AMO e o ONI foram negativos.

Ramos et al. (2011) avaliaram a influência da precipitação na quantidade de queimadas no Brasil, entre os anos 2005 e 2010. Os autores mostraram uma correlação inversamente proporcional, quanto menor a quantidade de chuva, maior o número de focos de queimadas, sendo os anos 2005, 2007 e 2010 com maiores ocorrências de queimadas e com menores quantidades de precipitação. Estudo mais recente sobre a variabilidade interanual da

ocorrência de queimadas na América do Sul, associada aos eventos de secas severas pelos eventos El Niño e aquecimento anômalo do Oceano Atlântico Tropical Norte (ATN), ocorridas em 2005, 2010 e 2015, evidenciaram um aumento das ocorrências de queimadas no Brasil. Nos anos 2005 e 2010 as ocorrências das queimadas foram distribuídas, predominantemente ao longo das porções oeste e sul da bacia amazônica e, em 2015, em toda a região, principalmente, durante o período de transição da estação seca para a chuvosa (RIBEIRO et al., 2018a).

Em relação às políticas públicas atuais na Bolívia, o governo realizou várias mudanças nos últimos anos que afetam as florestas e em geral ao meio ambiente, promovendo a migração, por meio de projetos de assentamentos e a expansão da fronteira agrícola e pecuária. Entre elas, a Lei nº 337, aprovada em 2013 e que posteriormente foi alterada pelas Lei nº 502 em 2014, a Lei nº 739 em 2015 e a Lei nº 952 em 2017. Esta Lei apoia a produção de alimentos e restituição de florestas, no entanto, houve uma anistia para os desmatamentos que ocorreram sem autorização do órgão fiscalizador competente entre julho de 1996 e dezembro de 2011, com a condição de que os beneficiários restituíssem somente 10% da cobertura afetada (BOLÍVIA, 2013), sem uma diferenciação das áreas de serviços ecológicos que deveriam ser restituídas 100% dada a sensibilidade dos habitats que se devem proteger, tais como as áreas úmidas, pântanos, áreas de afloramento natural de água e recarga, córregos, entre outros (LARREA et al., 2014).

A Lei nº 741 de 2015 da Bolívia, incentiva a expansão da pecuária, com a autorização para desmatamentos de até 20 hectares, que anteriormente eram 5 hectares. O Decreto supremo nº 2.452, de 2015, autoriza a produção de transgênicos. A Lei nº 1.098 de 2018, permite a produção de biocombustíveis. O Decreto supremo nº 3.973 de 2019, autoriza o desmatamento e queimadas controladas para atividades agropecuárias em terras privadas e comunitárias em florestas nos departamentos de Beni e Santa Cruz. Assim, estas são políticas nacionais da Bolívia que estão diretamente ligadas aos desmatamentos e queimadas, visando cenários futuros de expansão agropecuária (ROMERO et al., 2019; FUNDACIÓN SOLÓN, 2020).

Quanto às políticas restritivas temporárias de queimadas, em 2011 teve uma restrição em áreas desmatadas, pastagens e áreas de cultivos por parte da autoridade nacional (RODRÍGUEZ, 2012). Em 2019, devido à frequência elevada das queimadas registradas, a autoridade nacional suspendeu temporariamente as autorizações de queima emitida mediante

a resolução ABT n° 231/2019. No entanto, as queimadas se propagaram, os efeitos foram devastadores no ecossistema e na população local (ABT, 2019a).

Sobre a legislação no Brasil sobre uso do fogo, em 1989 foi criado o Centro Nacional de Prevenção, Controle e Combate aos Incêndios Florestais - PREVFOGO, pelo Governo Federal através do Decreto n° 97635/89, em 1998 mediante o Decreto n° 2.661/1998, que regulamentou o uso do fogo na agricultura e práticas florestais. Em 2012 o Código Florestal através da Lei Federal n° 12.651, que estabeleceu a proibição do uso de fogo na vegetação, exceto em locais ou regiões cujas peculiaridades justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais, mediante prévia aprovação dos órgãos estaduais (Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental - SEDAM, 2021).

No Estado de Rondônia, a Portaria n°229 de 2017 estabeleceu que o uso de fogo na vegetação é concedido para pequenas propriedades, com a finalidade de limpeza para agricultura familiar, com área não superior a dois hectares (SEDAM, 2021). Por outro lado, também foram implementadas políticas públicas para reduzir a pressão sobre florestas nativas. Em 2011 o governo do Estado criou o Decreto n° 15933 e Instrução Normativa n°01 da SEDAM de Rondônia, que normatizou a atividade de silvicultura econômica com espécies nativas ou exóticas (EMBRAPA, 2012). Em 2016, o Projeto Florestas Plantadas virou Lei Complementar (n°873), para o fortalecimento entre os processos produtivos via Integração Lavoura, Pecuária e Florestas ou Sistemas Agroflorestais (ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO; LEGISLATIVO, 2016).

Além disso, implementou-se o projeto “Plantar Rondônia” em 2018, pioneiro no Brasil, com a finalidade de apoiar o público da agricultura familiar da Amazônia no processo de regularização ambiental das propriedades rurais. O projeto é realizado pelo Centro de Estudos da Cultura e do Meio Ambiente da Amazônia – Rioterra, em cooperação com a Ação Ecológica Guaporé - Ecoporé e Federação dos Trabalhadores na Agricultura de Rondônia – FETAGRO, com a parceria da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental – SEDAM e com apoio financeiro Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, através do Fundo Amazônia (RIOTERRA, 2018).

Em 2018 foi proposto a Projeto de Lei n° 11.276, que estabelece uma política nacional de manejo integrado do fogo, que tem por objetivo a regularização do fogo no âmbito público e privado, promover as parcerias interinstitucionais, prevenção do fogo, combate, incentivo ao manejo integral do fogo, que deverá ser implementado pelas autoridades federais, estaduais, municipais e entidades privadas (PIVELLO et al., 2021).

Em 2019 e 2020 fez-se a proibição temporal de queimadas durante 60 e 120 dias, respectivamente pelo Governo nacional do Brasil, com exceção pelo uso para o combate e uso pelas comunidades e indígenas. No entanto, as queimadas continuaram aumentando, causadas pelas atividades humanas ilegais de desmatamento, em parte intensificadas pelas condições secas na região do Pantanal, mas também foi influenciada pelo discurso anti-ambientalista do Governo que tem estimulado às queimadas ilegais na Amazônia (PIVELLO et al., 2021).

A alteração futura da floresta Amazônica, dependerá do comportamento das queimadas que são em parte associadas às condições climáticas, mas também dependerão das políticas de conservação, dinâmica da expansão agropecuária e desenvolvimento de novas infraestruturas de transporte. A previsão é que o desmatamento e as queimadas dominem a conversão da floresta Amazônica em relação ao impacto direto do clima (LE PAGE et al., 2010).

Dentro desse contexto e do importante momento de pressão por mudanças no uso do solo nos entes federativos da região central da América do Sul, levando em consideração os efeitos das queimadas, este estudo pretende investigar a variabilidade espacial e temporal dos focos de queimadas na região, assim como realizar a análise da influência da precipitação e desmatamento na intensificação da ocorrência de queimadas e a tendência espaço-temporal das queimadas, tendo como finalidade contribuir para o melhor entendimento da dinâmica das queimadas, além de fornecer informações que viabilizem a adoção de ações e políticas públicas de mitigação das queimadas.

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Descrição da área de estudo

Este trabalho tem como área de estudo a região central da América do Sul, envolvendo as seguintes áreas: 1. a Bolívia, localizada entre as latitudes 9°38' S e 22°53' S e longitudes 57°26' W e 69°38' W, que se subdivide territorialmente em nove departamentos (INE, 2020); 2. os Estados do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso, no território brasileiro, localizados entre as latitudes 5°00' N e 20°00' S e longitudes 50°00' W e 75°00' W como ilustrado na Figura 1.

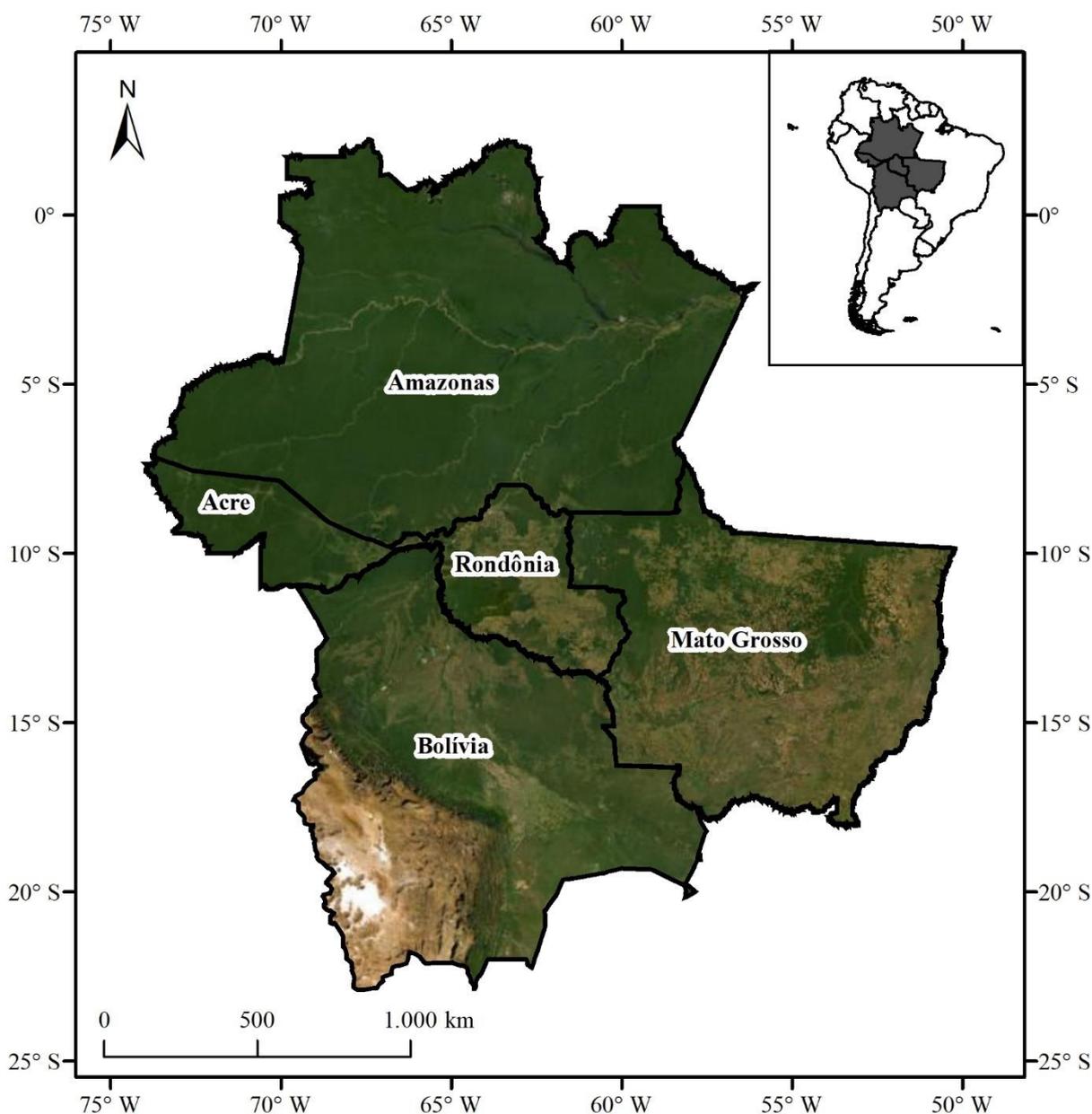


Figura 1. Localização da região Central da América do Sul, envolvendo a Bolívia e os Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso.

A área de estudo é dominada pelo clima Tropical, com exceção da região ocidental da Bolívia que possui o clima Temperado e Árido. Na Bolívia, predomina o clima Tropical na região leste, enquanto que na região oeste predomina o clima Temperado e Árido (FINLAYSON; MCMAHON, 2007).

Na Bolívia, a precipitação média mensal varia entre 100 milímetros (mm) e 220 mm na estação chuvosa (dezembro e fevereiro), a temperatura média anual varia entre 11°C e 26°C. A estação seca ocorre entre junho e agosto, com precipitação média mensal inferior a 50 mm em todas as regiões e temperatura média anual de 3°C e 22°C (Seiler, 2009 e Tierra, 2019).

No Estado do Acre, a precipitação anual varia entre 2.200 mm e 2.800 mm; no Estado do Amazonas entre 1900 mm e 3100 mm, no Estado do Mato Grosso, entre 1.300 mm e 3.100 mm e no Estado de Rondônia, de 1.900 mm a 2.800 mm. A temperatura média anual varia entre 22°C a 24°C no Estado do Acre e entre 22°C a 26°C nos Estados do Amazonas, Mato Grosso e Rondônia (FINLAYSON; MCMAHON, 2007; ALVARES et al., 2013).

A cobertura florestal está mudando rapidamente nas últimas décadas, em grande parte associada ao desmatamento pelo sistema de produtivo agropecuário, que está em constante crescimento, principalmente a pecuária, sendo uma atividade antrópica ligada ao uso do fogo (ABT, 2011; GFMC, 2013; VAN MARLE et al., 2017; SILVA et al., 2018; MAPBIOMAS, 2021a).

Assim, a seleção da área de estudo leva em consideração que, de forma geral, a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Mato Grosso, Amazonas e Rondônia, compartilham padrões e características de pressão antropogênica, do uso do solo e queimadas (RAMOS et al., 2011; GFMC, 2013). Além disso, estudos recentes mostraram o aumento das ocorrências dos focos de queimadas nessa região desde os anos 2000 (CAÚLA et al., 2015; SILVA et al., 2018; FAN, 2019).

4.2. Dados

Os dados de focos de queimadas utilizados neste trabalho foram obtidos do sensor MODIS, que opera a bordo do satélite AQUA, com resolução espacial de 1 km x 1 km e resolução temporal diária, para o período de 2003 a 2020. Os dados correspondem à versão com o uso do algoritmo da “Collection 6” e estão disponíveis na plataforma on-line do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

(<http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>), que disponibiliza os dados de focos de queimadas continuamente sobre a América do Sul (INPE, 2020a).

Os dados de precipitação utilizados para analisar a relação com os focos de queimadas são dados estimados por sensoriamento remoto, devido às limitações espaciais e temporais das estações meteorológicas automáticas e convencionais. Os dados mensais de precipitação do satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), produto 3B43 V7, com resolução espacial de 0,25 x 0,25 graus, são disponibilizados on-line pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), através da plataforma Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>).

Os dados de desmatamento para os Estados brasileiros são utilizados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite – PRODES do INPE, que quantifica as áreas desmatadas maiores que 0,0625 km², disponíveis na plataforma TerraBrasilis (ASSIS et al., 2019). No caso da Bolívia, os dados de desmatamento são provenientes da *Atoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierras – ABT* (<http://www.abt.gob.bo/>).

4.3. Análise dos dados

A análise dos dados se dividiu em cinco etapas. A Figura 2 mostra o fluxograma da das diferentes etapas da metodologia utilizada para desenvolvimento do trabalho. Inicialmente fez-se uma análise exploratória dos dados mediante estatística descritiva, diagramas de caixa (box-plot) e cálculo da frequência das queimadas em relação à média (Etapa 1). Em seguida, foi realizada a análise da variabilidade de espacial dos focos de queimada de acordo com a metodologia proposta por (WHITE, 2018) e a densidade de Kernel (Etapa 2). A tendência temporal e espacial dos focos de queimadas foi analisada pelo método de teste de Mann-Kendall (Etapa 3). Foram obtidas as relações entre a precipitação, desmatamentos e focos de queimadas (Etapa 4) e finalmente foi feito uma análise da anomalia espacial dos focos de queimadas e precipitação durante anos com secas intensas (Etapa 5).

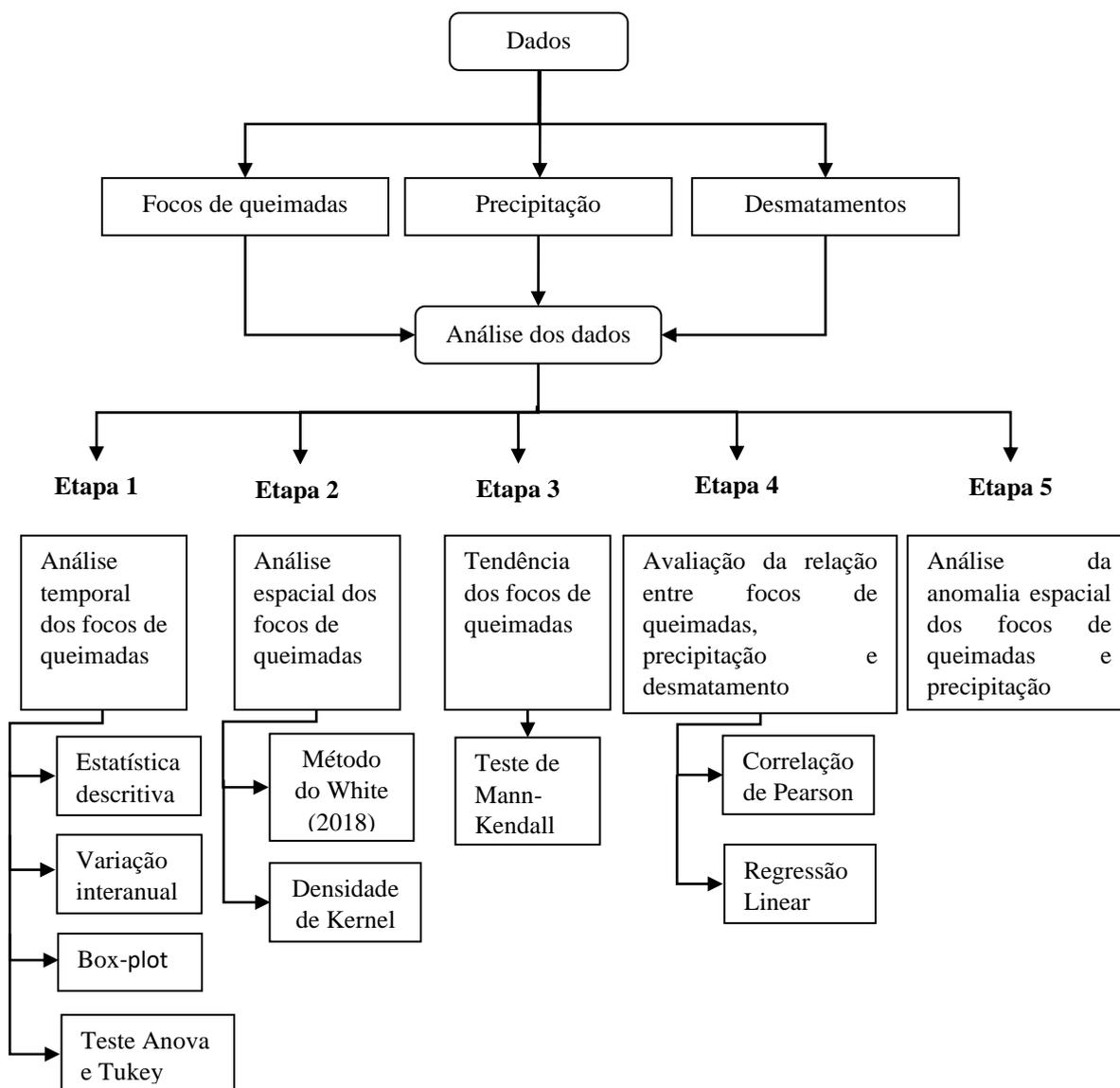


Figura 2. Fluxograma das etapas da metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

4.3.1. Análise temporal dos focos de queimadas

A avaliação da variabilidade temporal dos focos de queimadas para o período de 2003 a 2020 foi feita a partir do cálculo das médias, coeficiente de variação, diagramas de caixa e análises de frequência para as análises exploratórias dos dados. Também, avaliou-se a anomalia interanual dos focos de queimadas, obtida considerando às variações percentuais anuais do número de focos de queimadas em cada ano em relação à média do período de 2003 a 2020.

O acumulado anual de ocorrência dos focos de queimadas (Eq. 1) foi calculado por:

$$\sum_{i=1}^{12} x_i \quad (1)$$

Em que,

x_i é o total dos focos de queimadas por mês.

A análise da variabilidade anual dos focos de queimadas na área de estudo foi realizada a partir de análises estatísticas descritivas de média (Eq. 2), máximos e mínimos (Eq. 3), coeficiente de variação (Eq. 4) e gráficos em Diagrama de Caixa (*boxplot*) para avaliar a distribuição e variabilidade dos dados em escala de tempo mensal, permitindo descrever e compreender a tendência central, a dispersão e distribuição dos dados (WILKS, 2006).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\text{Máximos} = \bar{x} + 2\sigma \text{ e Mínimos} = \bar{x} - 2\sigma \quad (3)$$

$$\text{Coeficiente de variação} = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \quad (4)$$

Para testar a existência de diferenças significativas dos números dos focos de queimadas registrados entre os meses do ano, utilizou-se a análise de variância (ANOVA) (Eq. 5, 6, 7 e 8).

O processo de teste de ANOVA dado por Wilks (2013) será o seguinte:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad (5)$$

Onde,

F é a estatística F (*Fisher-Snedecor*);

MSR é a média dos quadrados da regressão;

MSE é a média dos erros ao quadrado;

Em que,

$$MSR = \frac{SSR}{1} \text{ para graus de liberdade}(gl) \text{ da regressão} = 1$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n [\hat{y}(x_i) - \bar{y}]^2 \quad (6)$$

$$MSE = s_e^2 = \frac{1}{n-2} \{SST - SSR\} \quad (7)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}]^2 \quad (8)$$

Na qual,

SSR é a soma dos quadrados da regressão;

\hat{y} é o valor previsto de y;

s_e^2 é o quadrado do desvio padrão ou variância do erro.

SST é a soma dos quadrados totais

\bar{y} é a média de y

A estatística F testa a hipótese nula (H_0), de que a média dos focos queimadas é igual entre os meses do ano e a hipótese alternativa (H_1), de que a média dos focos de queimadas é diferente entre os meses do ano. Segundo Gomes et al.(2015), para rejeitar H_0 , a estatística de F calculado será maior que o valor do F tabelado ($F_{cal} > F_{crit}$) ou a decisão pode ser tomada observando-se o valor-p, caso o valor-p seja menor que o nível de significância ($p < \alpha$), existe uma diferença significativa.

Ressalta-se que a ANOVA não informa exatamente em quais dados dos meses ocorrem às diferenças significativas. Desta forma, utilizou-se o teste de Tukey, para analisar em quais meses as diferenças das ocorrências das queimadas são significativas.

4.3.2. Análise da variabilidade espacial dos focos de queimadas

A análise da variabilidade espacial da ocorrência das queimadas foi feita considerando a frequência, densidade de Kernel dos focos de queimadas para a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia.

Para classificar o nível de frequência de ocorrência de queimadas na área de estudo, foi utilizada a classificação proposta por White (2018) com o propósito de agrupar as áreas com maior e menor incidência de focos de queimadas, tornando assim uma comparação proporcional e um sistema de classificação padronizado. O método classifica em cinco classes

de frequência de ocorrência de queimadas, as quais são determinadas a partir do número dos focos de queimadas por área (em km²) detectada, ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1. Frequência de ocorrência dos focos de queimadas

Ocorrência	Número dos Focos de queimadas por Ano
Muito Baixa	Nenhum ou um foco de queimada para uma área de 601 km ² ou mais
Baixa	Um foco de queimada para uma área entre 301-600 km ²
Média	Um foco de queimada para uma área entre 151-300 km ²
Alta	Um foco de queimada para uma área entre 76-150 km ²
Muito Alta	Um foco de queimada para uma área de 75 km ² ou menos

Foram estimadas a densidade de focos de queimadas dentro da área de estudo aplicando o estimador de densidade de Kernel (Eq. 9 e 10). O estimador de densidade kernel desenha uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de influência, os resultados gerados pela densidade do kernel variam de um, na posição do ponto, e diminui a com o aumento da distância do ponto a zero, na fronteira da vizinhança (SILVERMAN, 1986). O Estimador de densidade de Kernel é definido como:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left\{\frac{x - X_i}{h}\right\} \quad (9)$$

$$K_x = \begin{cases} 3\pi^{-1}(1 - x^T x)^2 & \text{se } x^T x < 1 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

Onde,

n é o número de pontos observados;

h é a largura de banda ou raio de pesquisa;

K é a função Kernel;

x é o vetor de coordenada que representa a localização do ponto estimado; e

X_i é o vetor da i-ésima coordenada que representa cada ponto observado em relação ao estimado.

4.3.3. Análise da tendência dos focos de queimadas

A tendência temporal e espacial de crescimento ou decréscimo dos focos de queimadas para Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia, foi analisada aplicando-se o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall

(Eq. 11, 12, 13 e 14), que tem a vantagem de não ser afetado por alguns valores discrepantes (YING et al., 2019). Seguindo Gü Çlü (2018) as diferenças entre cada valor sequencial é calculado de modo a representar sinais crescentes (+1), decrescentes (-1) e neutros (0), para um conjunto ordenado de n observações $X = x_1, x_2, x_n$, ou seja:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{ sinal}(x_j - x_k) \quad (11)$$

Onde,

S é a soma estatística de Kendall;

x_j e x_k são valores da série em instantes de tempo J e K em n observações;

n é o comprimento do conjunto de dados de séries de tempo

Em que:

$$\text{ sinal}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

A estatística Z de Mann-Kendall é dada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{V[S]}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{V[S]}} & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Em que:

$$V[S] = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} = \sigma^2 \quad (14)$$

Onde,

$V[S]$ é variância de S.

Com base na análise da estatística Z, a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência significativa, pode ser aceita ou rejeitada. Segundo Meena (2020), a H_0 é rejeitada para valor de significância (α) de 5% se o valor absoluto de Z (Eq. 9) for maior que 1,96 (valor determinado a partir da tabela da distribuição normal reduzida). O sinal da estatística Z indica se a tendência é crescente ($Z > 0$) ou decrescente ($Z < 0$) e onde não há tendências, o valor de Z é próximo de zero.

4.3.4. Análise da correlação e regressão entre focos de queimadas e precipitação e desmatamento

O coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq. 15) foi calculado para verificar a existência de uma correspondência entre a variabilidade precipitação, desmatamento e dos focos de queimadas, com intuito de avaliar a influência deste elemento climático e desmatamento na variabilidade interanual da ocorrência das queimadas no período de 2003 a 2020, na Bolívia e nos Estados brasileiros do Acre, Mato Grosso, Amazonas e Rondônia. O grau de significância adotado nessas análises foi de 5% de probabilidade.

O coeficiente de correlação de Pearson pode variar de $-1 \leq r_{xy} \leq +1$, o sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Para Evans (1996), valores de 0,0 a 0,19 caracterizam uma correlação muito fraca; valores de 0,2 a 0,39, correlação fraca, entre 0,4 a 0,59, correlação moderada, valores entre 0,6 a 0,79, correlação forte e valores entre 0,8 a 1,0 correlação muito forte.

De acordo Wilks (2013) o coeficiente de correlação de Pearson (r) é obtido da seguinte maneira:

$$r_{xy} = \frac{\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1}}{\sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \times \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}}} \quad (15)$$

Na qual,

\bar{x} e \bar{y} são médias dos conjuntos de dados.

O nível de significância (p-valor) da correlação foi calculado com base na distribuição do teste t de Student bi-caudal (Eq. 16).

$$t = \frac{r\sqrt{n - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (16)$$

Em que:

n é número de pares de dados

r é a correlação de Pearson

A regressão linear de mínimos quadrados (Eq. 17) fez-se para descrever e quantificar a relação linear entre duas variáveis, calculou-se o coeficiente de determinação para observar a proporção da variação da variável dependente (focos de queimadas) que é explicada pela variável independente (precipitação ou desmatamento). Para a regressão linear simples o coeficiente de determinação é exatamente o valor da correlação de

Pearson ao quadrado. O nível de significância (p-valor) da regressão linear foi calculado com base no teste F (Eq. 5) (WILKS, 2006).

$$y_i = a + bx_i + e_i \quad (17)$$

Na qual,

y_i é a variável resposta ou dependente

x_i é a variável preditora ou independente

a é o intercepto

b é a inclinação da reta

e_i erro o residual

4.3.5. Análise da anomalia espacial dos focos de queimadas e precipitação

As anomalias espaciais dos focos de queimadas e precipitação foram avaliadas durante anos de secas intensas, calculou-se a anomalia padronizada (Eq. 18) dos focos de queimadas e a anomalia da precipitação (Eq. 19), baseado na média anual e desvio padrão de 2003 a 2020. O objetivo foi de relacionar a distribuição espacial das anomalias dos focos de queimadas e precipitação na área de estudo.

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (18)$$

$$\text{Anomalia} = x - \bar{x} \quad (19)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados e as discussões em forma de 2 capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a análise da variabilidade espaço-temporal dos focos de queimadas e as correlações com as variáveis da precipitação e desmatamento na região central da América do Sul, incluindo a Bolívia e nos Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso. No capítulo 2, escrito em formato de artigo científico, é apresentada uma análise específica dos focos de queimadas para os Departamentos da Bolívia abrangendo as discussões de políticas públicas com base em estudos científicos que observaram a dinâmica dos focos de queimadas no país.

CAPÍTULO 1

Cataño. et al., 2022. A definir.

A ser submetido em *Revista a ser definida*.

6.1. Análise da distribuição interanual dos focos de queimadas

A região Central da América do Sul, abrangendo a Bolívia e os Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso, concentrou 28% dos focos de queimadas na América do Sul durante o período de 2003 a 2020. Na Figura 3, apresenta-se o total anual dos focos de queimadas da Bolívia e dos Estados do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso para o período de estudo. A análise temporal dos totais anuais mostra uma variabilidade heterogênea da ocorrência dos focos de queimadas de cada local da área de estudo, com um coeficiente de variação (CV) de 72% no Estado de Rondônia, 60% no Mato Grosso, 47% na Bolívia, 43% no Acre e 29% no Amazonas.

De forma geral, é possível notar um comportamento similar na distribuição dos focos de queimadas entre as regiões, com uma relação significativa observada entre Bolívia e os Estados do Acre, Rondônia e Mato Grosso ($r > 0,5$; $p < 0,05$) e outra relação significativa entre Acre e Amazonas ($r = 0,7$; $p < 0,05$). Em contraste, é observada uma relação não significativa entre a distribuição temporal de focos de queimadas no Amazonas e os Estados do Mato Grosso, Rondônia e Bolívia ($r < 0,3$; $p > 0,05$).

A relação significativa das ocorrências anuais dos focos de queimadas entre Bolívia, Acre, Rondônia e Mato Grosso, é função da mudança da cobertura e uso do solo, como também das características climáticas semelhantes que apresenta a região sudoeste da Amazônia. No contexto de variabilidade climática, Chen et al. (2011), argumenta que o aumento das queimadas na região sul e sudoeste da Amazônia em 2005 e 2007, foram relacionadas às anomalias positivas da temperatura da superfície do mar do Atlântico Tropical Norte. Por outro lado, seus resultados apontam que as anomalias positivas da superfície do mar do Pacífico Tropical estavam relacionadas ao aumento das queimadas na região oriental da Amazônia.

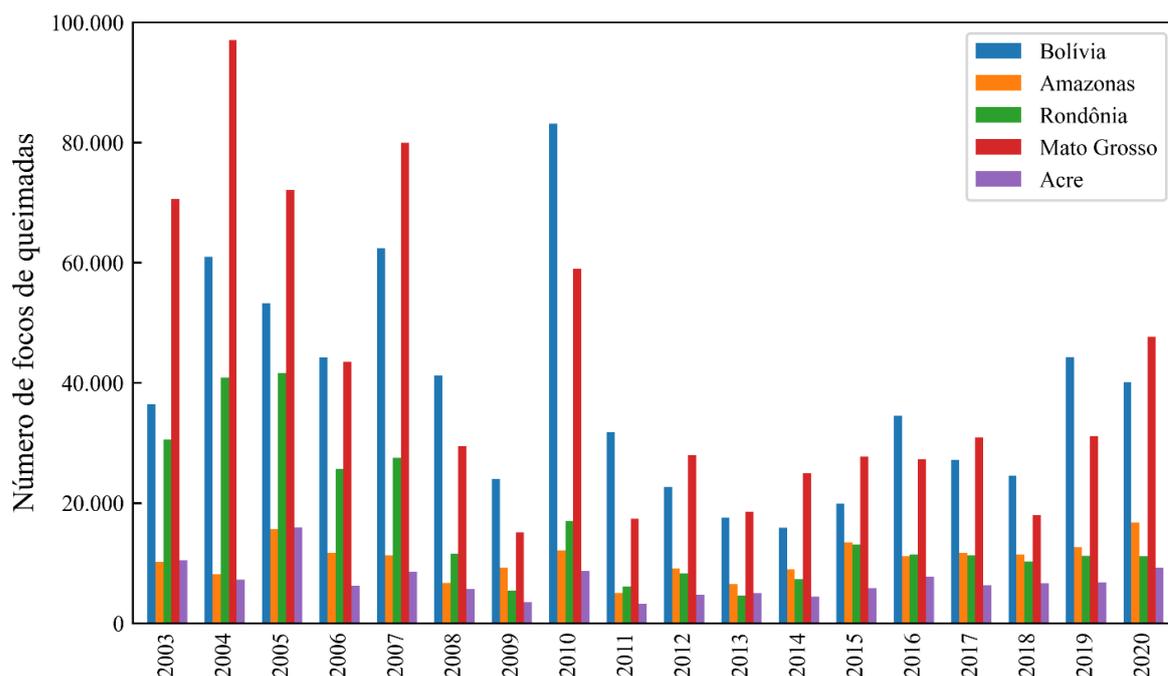


Figura 3. Série temporal do total anual de focos de queimadas na Bolívia e Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Acre e Mato Grosso entre 2003 e 2020.

Os totais anuais da ocorrência dos focos de queimadas do Estado do Amazonas apresentados na Figura 4A, para o período de 2003 a 2020, apontam para um total de 191.818 no período e uma média anual de 10.657 focos de queimadas. O valor mínimo de 5.028 focos de queimada foi observado em 2011, enquanto o valor máximo de 16.729 foi observado em 2020. A partir de 2015 nota-se uma tendência crescente do número total de focos de queimadas na região até 2020. Também é possível observar ao longo da série temporal, uma pronunciada variabilidade interanual, com aumento acima de ~15% no número de focos de queimadas nos anos de 2005, 2010, 2015, 2019 e 2020 e diminuição na mesma ordem em 2004, 2008, 2009, 2011, 2013 e 2014. Essas variações são destacadas na Figura 4B, que apresenta as anomalias (em porcentagem), anomalias positivas acima de 20% nota-se nos anos de 2020 (+57%), 2005 (+47%), 2015 (+26%) e anomalias negativas inferior a 20% no anos de 2011 (-53%), 2013 (-39%), 2008 (-37%), 2004 (-24%).

No Estado do Amazonas observamos 90% e 44% a mais da média anual dos focos de queimadas comparado aos trabalhos do Vasconcelos et al. (2013) e White (2018), que mostraram uma média anual de 5.229 (2003–2012) e 6.920 (2003–2016), respectivamente. Ainda, observou-se 38%, 17% e 18% a mais nos 2010, 2009 e 2012 comparado aos resultados do Vasconcelos et al. (2013) e menos 12% em 2015 comparado ao do White (2018). Esse contraste, é devido à atualização da base de dados dos focos de queimadas do INPE em 2018

utilizando o algoritmo *Collection 6*, estudos anteriores, as detecções dos focos de queimadas estavam baseadas no algoritmo *Collection 5*.

Em relação ao ano 2020, notou-se um aumento de 32% dos focos queimadas comparado ao 2019. Por outro lado, em relação à área queimada no Estado do Amazonas, em 2019, foi detectado 8.054 km² de área queimada, que representa a maior área queimada durante 1985 a 2020, sendo 2020, o segundo ano com maior área queimada com 6.669 km², de acordo com MapBiomias (2021). Em relação ao período total do estudo, uma análise comparativa entre as anomalias de focos de queimadas e as anomalias das áreas queimadas detectadas por MapBiomias (2021) indica padrões consistentes, exceto em 2004, quando não observaram anomalias positivas de área queimada no Estado do Amazonas.

O aumento da ocorrência de queimadas no Estado do Amazonas em 2020 pode ter sido favorecido por anomalias climáticas. Segundo o Centro de Previsão de tempo de Estudos Climáticos (CPTEC, 2020), durante o mês de agosto em 2020, registrou precipitações abaixo de 50 mm da média climatológica, abrangendo em toda a região do Estado, além disso, na região sul do Estado durante os meses de setembro e julho foram registradas precipitações abaixo de 25 mm e outubro abaixo de 99 mm em relação à média climatológica. Além disso, o desmatamento mantém uma estreita relação com a ocorrência das queimadas (RAMOS et al., 2011). MapBiomias (2021) relatou que 66% das áreas queimadas ocorreram em áreas Antrópicas e 34% em áreas de cobertura Natural em 2020. Nesse contexto, no Subitem 6.5, será abordado de forma quantitativa as relações das queimadas com precipitações do TRMM e desmatamentos.

O segundo ano com maior anomalia positiva de focos de queimadas encontrado nesse estudo foi o de 2005. Nesse ano ocorreu a seca histórica na região que contribuiu para aumento de focos de queimadas (MARENGO et al., 2008). De acordo com Barbosa et al. (2019) anomalias negativas da precipitação foram registradas em vários meses durante o ano, abaixo de 20 mm da média climatológica em abril e outubro e 60 mm de maio a setembro, essas condições de secas favoreceram no aumento das queimadas.

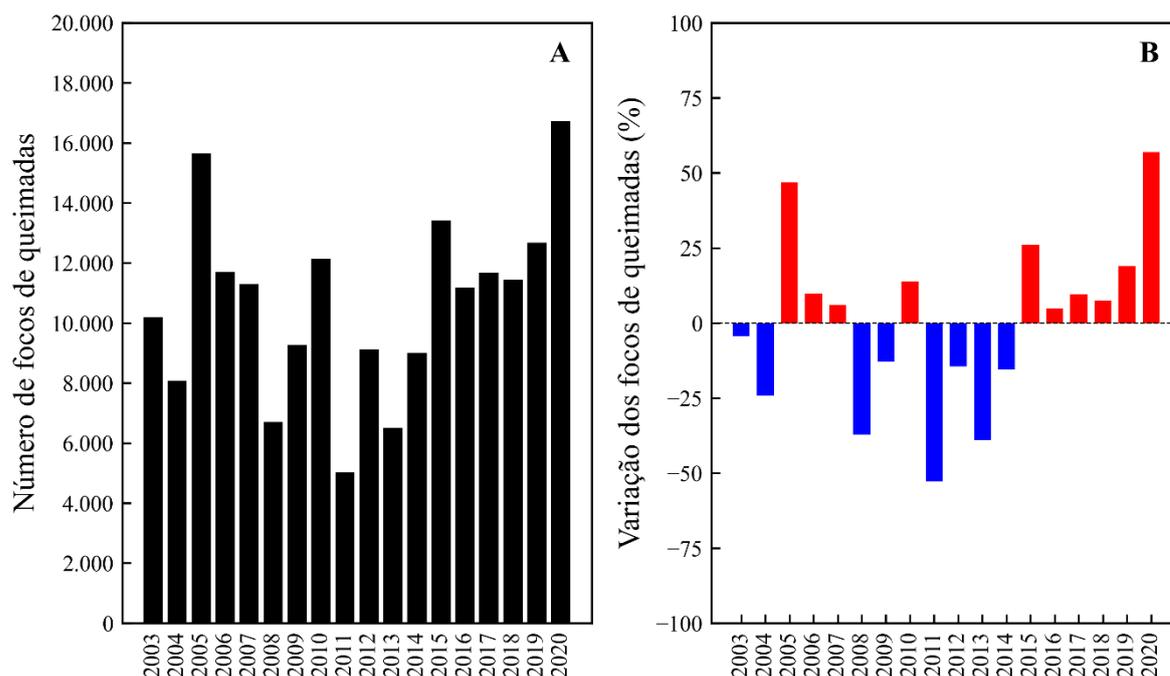


Figura 4. Focos de queimada no Estado do Amazonas: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020.

Na Figura 5A, é apresentado o total anual da ocorrência dos focos de queimadas no Estado de Rondônia, durante o período de 2003 a 2020. Para esse estado, detectou-se um total 295.089 durante o período de estudo e uma média anual de 16.394 focos de queimadas. No ano de 2013 (2005) observou-se o menor (maior) valor de focos de queimadas com 4.613 (41.649). Além disso, o comportamento interanual da ocorrência de queimadas mostra uma maior ocorrência de queimadas concentradas desde o início da série temporal até 2007, seguido de uma significativa redução das queimadas nos anos seguintes, como visto na Figura 5B. Nesta figura, de forma geral, as anomalias positivas ocorreram desde o início da série temporal até 2007, seguido de anomalias negativas até 2020 (com exceção de 2010). Anomalias positivas com porcentagem acima de 50% são observadas em 2005 (+154%), 2004 (+149%), 2003 (+86%), 2007 (+68%), 2006 (+57%) e as anomalias negativas inferiores a 50% em 2013 (-72%), 2009 (-67%), 2011 (-63%), 2014 (-55%).

Para o Estado de Rondônia, o 2005, foi identificado como o ano com maior anomalia positiva da ocorrência de focos de queimadas ao longo da série estudada. Esse resultado é consistente com os resultados de Andrade Filho et al. (2015), que detectaram maiores ocorrências de focos de queimadas no ano de 2005 em relação ao período de 2001 a 2012 e de

Cardozo et al. (2014) que identificaram em 2005 uma maior área queimada (18.468 km²) em relação ao de 2000 a 2012.

Dados mais recentes da área queimada do Brasil, lançadas pelo Projeto MapBiomas, mostraram no Estado de Rondônia que 2005 (16.791 km²) foi o ano com maior área queimada desde 1985 a 2020. De acordo com o tipo de cobertura e uso do solo, 77% da área queimada em 2005, ocorreram em áreas de uso Antrópico e 23% da área queimada correspondeu à cobertura Natural (MAPBIOMAS, 2021a). Isso mostra uma ligação significativa das queimadas no Estado com as atividades humanas, principalmente a agropecuária, o que explica a máxima anomalia positiva de ocorrência de queimadas no Estado de Rondônia. Associado às atividades humanas, 2005 foi caracterizado por evento de seca intensa, principalmente na região sul e oeste da Bacia Amazônica durante a estação seca de junho a setembro. Essas condições de secas contribuíram para o aumento das queimadas na região (MARENGO et al., 2008; PANISSET et al., 2017).

Anomalias positivas (neutras) de focos de queimadas concentradas em 2003 a 2007 (2010), são consistentes com as anomalias positivas de área queimada detectadas por MapBiomas (2021). Esse comportamento não mostra uma relação direta com a variabilidade interanual de precipitações e anos de secas intensas, como por exemplo a seca de 2010. Em 2010, ocorreu a seca extensa e intensa, que afetou 80% da área da Bacia Amazônica, concentradas principalmente nas regiões oeste, sudoeste e sudeste, onde se observaram um maior déficit de precipitação (+2,1 σ), comparado a 2005 (+1,8 σ) (PANISSET et al., 2017). No entanto, em 2010 nota-se menor anomalia positiva de queimadas comparada ao 2005 no Estado de Rondônia.

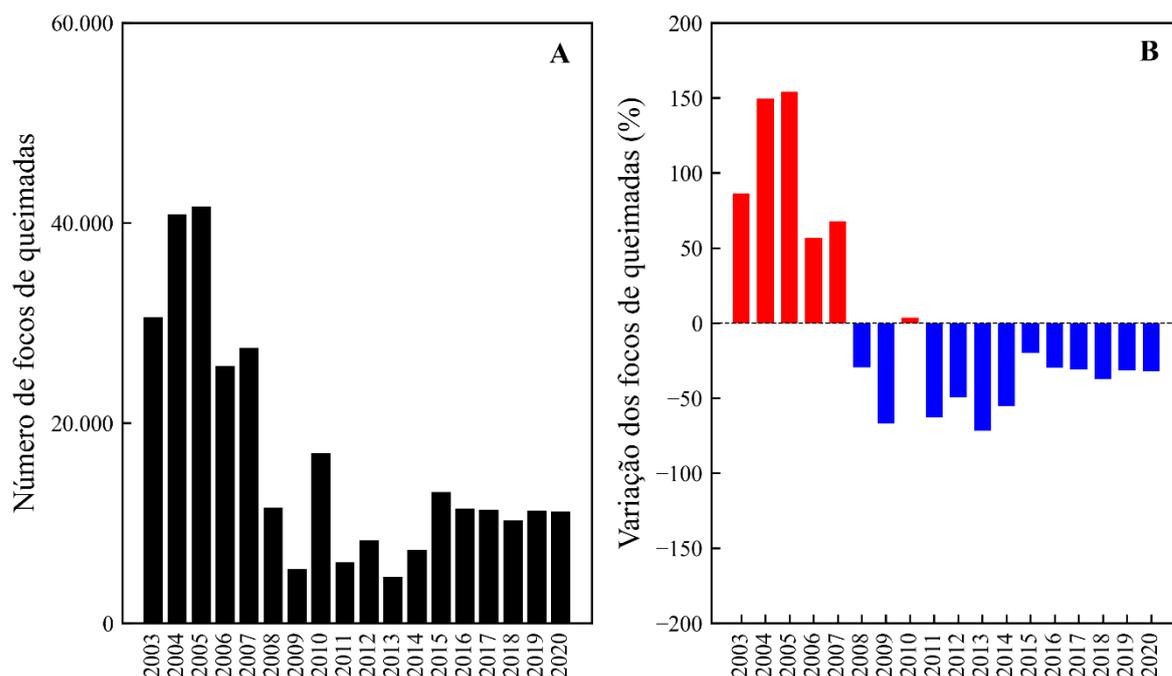


Figura 5. Focos de queimada no Estado de Rondônia: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020.

Os totais anuais de ocorrências dos focos de queimadas do Estado do Acre são apresentadas na Figura 6A. Ao longo do período de 2003 a 2020, detectou-se um total 126.073 focos de queimadas, com uma média anual de 7.004. Também é possível observar uma variabilidade interanual dos focos de queimadas no Estado do Acre, sendo detectado o menor valor em 2011 (3.191) e o maior valor em 2005 (15.993). Na Figura 6B é mostrada em maior detalhe a variabilidade interanual das queimadas. Anomalias positivas acima de 50% do valor médio anual foram observadas nos anos de 2005 (+128%) e 2003 (+50) enquanto anomalias negativas inferiores a 50% desse valor em 2011 (-54%) e 2009 (-50%).

Em 2005, ano com maior ocorrências de focos de queimadas no Acre, também foi o ano com maior área queimada (SILVA et al., 2018; MAPBIOMAS 2021). Silva et al. (2018), relataram uma área florestal queimada de 3.509 km² em 2005, que representa a maior área afetada pelo fogo durante o período de 1984 a 2016 e MapBiomass (2021), detectou 8.518 km² sendo uma maior área queimada desde o período de 1985 a 2020, das quais, 68% ocorreram no tipo de cobertura e uso do solo Antrópicas e 32% em áreas de cobertura Natural.

O aumento das queimadas no Estado do Acre durante 2005, em parte esteve associado às condições climáticas de secas intensas. Silva et al. (2018) evidenciaram um recorde de 70 dias sem chuva, 15 dias acima da média durante o período de 1984 a 2016.

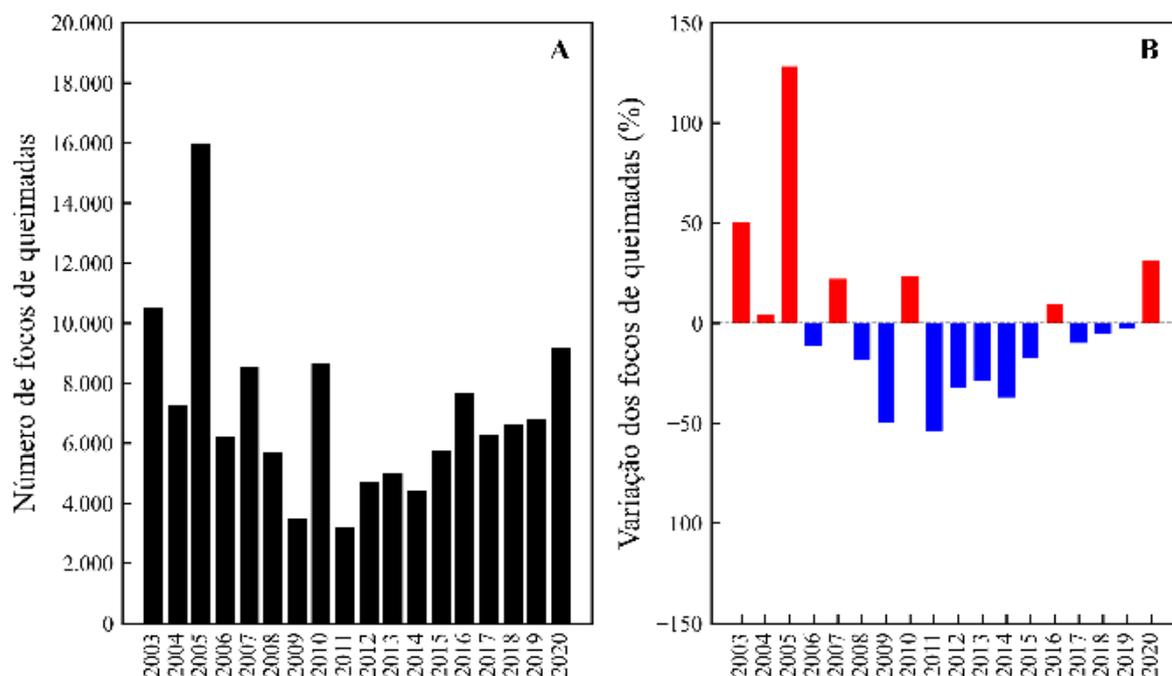


Figura 6. Focos de queimada no Estado do Acre: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020.

Na Figura 7A, apresenta-se o total anual da ocorrência de focos de queimadas do Estado de Mato Grosso. Ao longo do período de estudo detectou-se um total 738.342 focos de queimadas, com uma média anual de 41.019. Em 2009 (15.059) foi detectado o menor valor de focos de queimadas e em 2004 o maior valor (97.012). Nos primeiros cinco anos da série temporal, de 2003 até 2007, observa-se valores maiores de focos de queimadas, seguido uma diminuição em 2008 e 2009, um aumento em 2010, uma outra diminuição dos focos de queimadas entre 2011 a 2019, finalmente em 2020, um aumento. Essas variações interanuais são apresentadas na Figura 7B, que apresenta as anomalias positivas de focos de queimada acima de 50% em 2004 (+137%), 2007 (+95%), 2005 (+76%), 2003 (+72%) e anomalias negativas inferiores a 50% em 2009 (-63%), 2011 (-58%), 2018 (-56%), 2013 (-55%).

Chen et al. (2011), também relatou maiores ocorrências de queimadas em Mato Grosso nos anos 2004, 2005 e 2007, comparados aos períodos de 2001 a 2009 e reduções nos anos 2008 e 2009. No entanto, considerando a área queimada, MapBiomas (2021), detectou maiores áreas queimadas em 2007 (58.771 km²), seguido de 2010 (53.620 km²) e 2004 (51.831 km²).

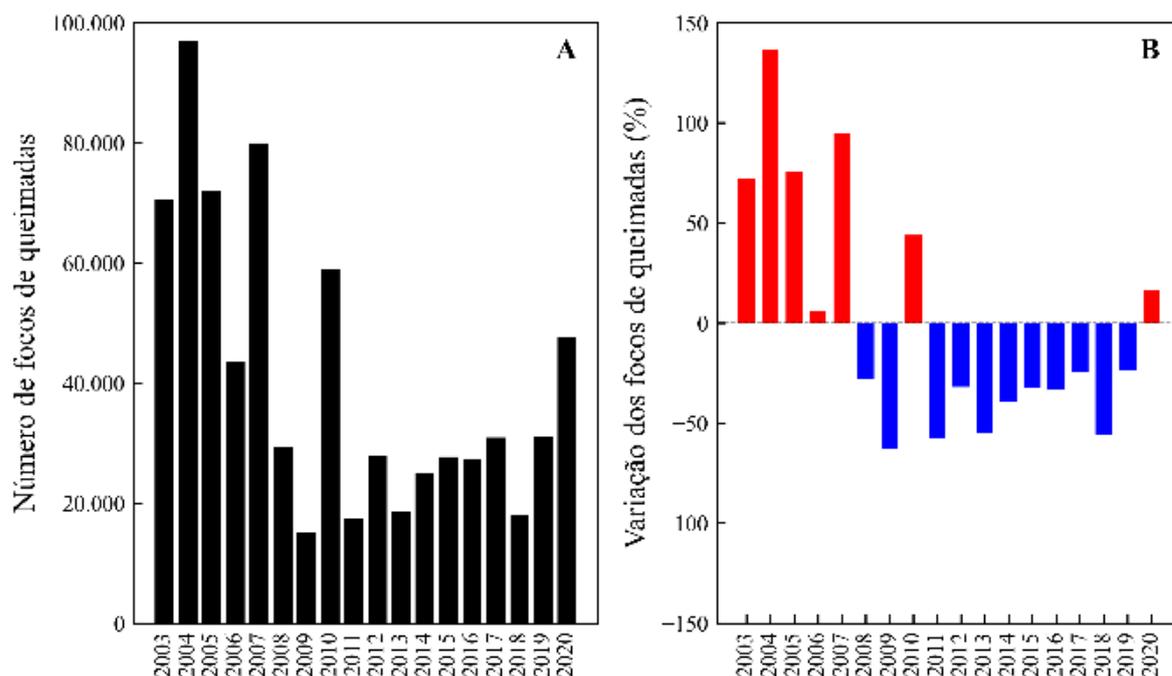


Figura 7. Focos de queimada no Estado de Mato Grosso: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A indica o valor médio do período de 2003–2020.

Comparando as anomalias de focos de queimadas entre os locais do Estado, observou-se que todas apresentaram anomalias positivas em 2005, 2007 e 2010, 2004 (exceto no Amazonas), 2006 (exceto no Acre) e 2020 (exceto em Rondônia). As anomalias negativas coincidiram em 2009 e de 2011 a 2014. Notou-se também as máximas anomalias positivas acima de 100% ocorreram no Estado de Rondônia em 2004 e 2005, no Mato Grosso em 2004 e no Acre em 2005, por outro lado, o Estado do Amazonas apresentou maior quantidade de anos com anomalias positivas, 10 anos dos 18 anos da série temporal analisada e concentradas principalmente nos últimos seis anos.

Dos anos com anomalias positivas de focos de queimadas ao longo do período de estudo nos Estados do Amazonas, Acre, Mato Grosso e Rondônia, apenas 2007 não estiveram sob a ação de um El Niño, consistente com o estudo de Chen et al. (2011). Além disso, observa-se aumentos das ocorrências de queimadas durante anos de El Niño e anomalias positivas da TSM do Atlântico Tropical Norte (ATN) (2004, 2005, 2007, 2010, 2015, 2019 e 2020) (BISSOLLI et al., 2020; BILBAO et al., 2020; GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2020; GFED, 2020). Por outro lado, as diminuições dos focos de queimadas ocorreram em anos de atuação do evento de La Nina ou anos neutros, com exceção de 2015 e 2016 que tiveram eventos de El Niño muito forte, não mostraram aumento de queimadas nos

Estados de Rondônia e Mato Grosso (ESPINOZA et al., 2018; Golden Gate Weather Services, 2020).

Em adição, fez-se a avaliação da variabilidade interanual dos focos de queimadas dos Estado do Amazonas, Rondônia, Mato Grosso e Acre em comparação aos demais Estados da Amazônia Legal, durante o período de 2003 a 2020 (Figura 8). Ressalta-se que os quatro Estados concentraram 47% do total dos focos de queimadas da Amazônia Legal, em que 26% corresponde ao Estado do Mato Grosso, seguido de Rondônia (10%), Amazonas (7%) e Acre (4 %). Nas Figuras 8A e 8D é possível observar um aumento da ocorrência dos focos de queimadas nos Estados do Amazonas e Acre, respectivamente, comparado aos demais Estados da Amazônia Legal. Esse aumento é melhor quantificado utilizando o teste Mann-Kendall. Para o Estado do Amazonas e Acre, os resultados deste teste indicam uma tendência positiva significativa de focos de queimadas ($Z=4,015$; $p<0,05$ e $Z=2,121$; $p<0,05$, respectivamente para o Amazonas e Acre), indicando que estes dois Estados mostram similaridade no comportamento da tendência temporal positiva. Por outro lado, as Figura 8B e Figura 8C, mostram uma tendência negativa não significativa dos focos de queimadas nos Estados de Rondônia ($Z=-1,591$; $p>0,05$) e Mato Grosso ($Z=-1,439$; $p>0,05$), respectivamente.

As tendências positivas dos focos de queimadas nos Estados do Amazonas e Acre, seguem o padrão de aumento do desmatamentos dos Estados nos ultmos anos detectados pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES). Por outro lado, os Estados de Mato Grosso e Rondônia apresentaram reduções de desmatamento nos últimos anos. Segundo dados do PRODES, em 2004 foram desmatadas 11.814 km² e 3.858 km² nos Estados de Mato Grosso e Rondônia enquanto em 2020, 1.779 km² e 1.273 km², respectivamente (INPE, 2021b).

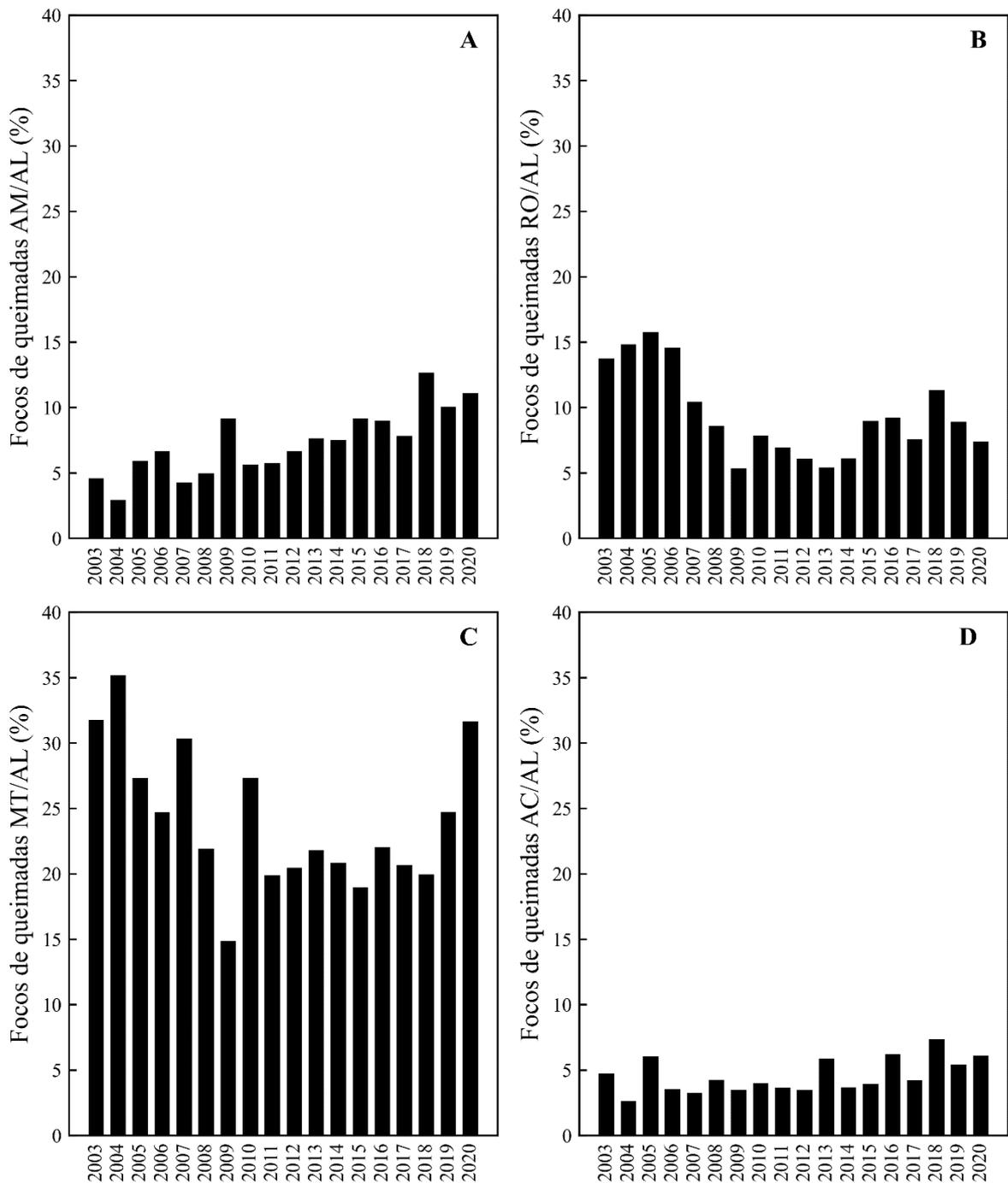


Figura 8. Série temporal do acumulado anual da ocorrência de focos de queimadas nos Estados brasileiros: (A) Amazonas, (B) Rondônia, (C) Mato Grosso e (D) Acre em comparação com os demais Estados da Amazônia Legal, durante o período de 2003–2020.

6.2. Ciclo anual dos focos de queimadas

Nas Figura 9 (A, B, C e D) são mostrados os diagramas de caixa mensais dos focos de queimadas, entre 2003 e 2020, para os Estados do Amazonas, Rondônia, Mato Grosso e Acre, respectivamente. De acordo com o teste ANOVA, a ocorrência dos focos de queimadas, para cada local, foi diferente entre os meses do ano ($p < 0,05$). Baseando-se no teste de Tukey, os meses foram classificados em quatro grupos, indicados pelas letras A, B, C e D. Os meses não indicados com a mesma letra são significativamente diferentes entre as médias mensais dos focos de queimadas.

No geral na área de estudo é possível observar, entre agosto e outubro, maiores ocorrências dos focos de queimadas. Os Estados de Rondônia, Mato Grosso e Acre, mostram comportamentos similares em relação aos meses de maiores ocorrências de queimadas, sendo setembro o mês com maiores números de focos de queimadas, seguido por agosto e outubro. Em relação ao Estado do Amazonas, o maior número de queimadas foi detectado em agosto seguido de setembro e outubro. Os resultados são consistentes com os de Giglio et al. (2006) e Chen et al. (2011), que encontraram o pico de queimadas em setembro na região central da América do sul.

No Estado do Amazonas, os meses de agosto e setembro concentraram 67% dos focos de queimadas, com média de 3.808 e 3.326, respectivamente, ambos meses identificados com a letra A, o que indica que são significativamente similares entre si e diferentes dos outros meses (Figura 9A). Já no Estado de Rondônia, as maiores ocorrências de focos de queimadas estão concentradas em setembro, identificados com a letra A, com uma média 7.648 (47%) focos de queimadas, significativamente diferente dos outros meses. Agosto e outubro, identificados com as letras B e BC, são significativamente similares, com média de 4.584 e 2.536, respectivamente. Ambos representam 43% dos focos de queimadas (Figura 9B).

No Estado do Mato Grosso, setembro (identificado com a letra A) é significativamente diferente dos outros meses, com uma média de 15.182 (37%) focos de queimadas. Agosto e outubro, são significativamente similares, identificados com as letras, B e BC, com uma média 8.665 e 5.102, respectivamente, e concentram juntos 34% dos focos de queimadas. No Estado do Acre, detectou-se maior focos de queimadas em setembro, identificado com a letra A, sendo significativamente diferente aos outros meses, com uma média de 3.765, o que representa 54% dos focos de queimadas, agosto e outubro, são significativamente similares, identificados com as letras B e BC, respectivamente, ambos, concentram 40% dos focos de queimadas.

Esses resultados são consistentes com estudos anteriores. Vasconcelos et al. (2013) e White (2018) relataram maiores ocorrências de focos de queimadas entre os meses de agosto e outubro no Estado do Amazonas, com pico em agosto. Por outro lado, de acordo com MamBiomias (2021) e considerando ciclo anual de área queimada durante 1985 e 2020, uma maior média mensal de áreas queimadas é encontrada em setembro (1.182 km²), seguido de agosto (762 km²) e outubro (687 km²). No Estado do Acre consistentes com Da Silva et al. (2018), os meses de setembro e outubro apresentam maiores ocorrências de focos de queimadas.

A época de queimadas coincide com o final da estação seca (JJA) e começo da estação de transição (SON) de seca para a estação chuvosa seguinte (DJF) na área de estudo. No Estado do Amazonas, entre junho e setembro, os registros de precipitação média mensal são inferior a 100 mm (CHEN et al., 2011), principalmente na região sul do Estado, onde cerca de 80% das ocorrências de focos de queimadas ocorrem com precipitações mensais abaixo de 100 mm durante julho a outubro (VASCONCELOS et al., 2013). No Estado do Acre, a época seca persiste por quatro meses, de junho a setembro, com precipitações mensais inferiores a 100 mm, sendo que, para os meses junho, julho e agosto, a precipitação mensal é inferior a 50 mm, o que torna a vegetação mais vulnerável para ser queimada (DA SILVA et al., 2018). Os Estados do Mato Grosso e Rondônia, mostram uma época seca de junho a setembro, com registros de precipitação média mensal inferior a 40 mm (CHEN et al., 2011).

O fato do pico da queimada não ter uma relação direta com o mês mais seco está associada com as atividades humanas, de modo que durante a estação seca começa a limpeza de áreas agrícolas e pastagens com o uso do fogo, o que contribui para o aumento do número de queimadas nessa época do ano (TIERRA, 2019; SILVA et al., 2018).

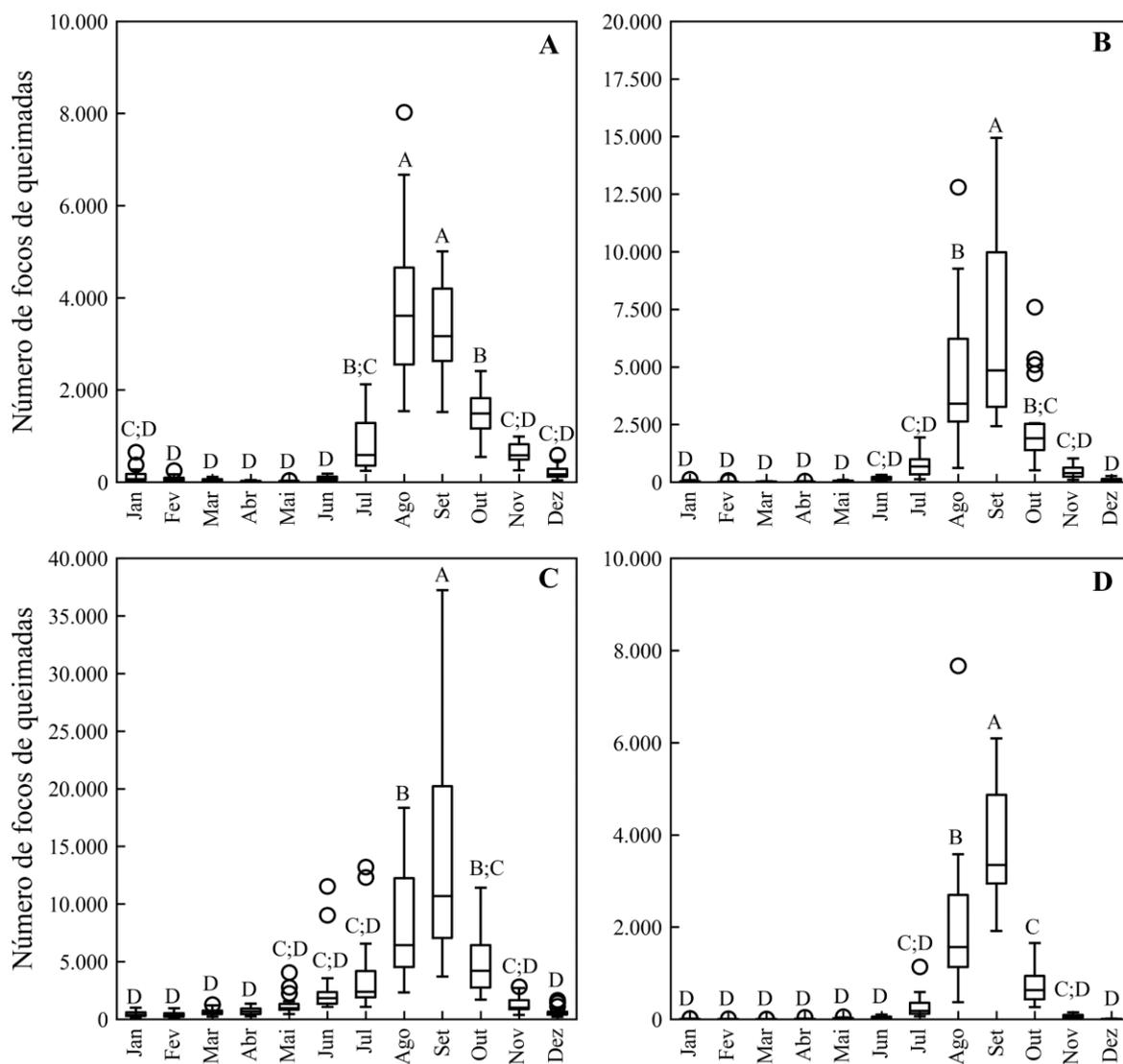


Figura 9. Boxplot mensal do número de focos de queimadas: (A) Amazonas, (B) Rondônia, (C) Mato Grosso e (D) Acre, no período 2003–2020. As letras A, B, C e D sobre os box-plots indicam os grupos com diferenças significativas. Os meses não agrupados com a mesma letra são significativamente diferentes com base no teste de Tukey.

6.3. Análise da distribuição espacial da ocorrência dos focos de queimadas na região central da América do Sul

6.3.1. Frequência dos focos de queimadas

Na Figura 10, apresenta-se a frequência dos focos de queimadas baseado na metodologia do White (2018), para a Bolívia e os Estados brasileiros do Amazonas, Rondônia, Mato Grosso e Acre, durante o período de 2003 a 2020. A Bolívia e os Estado do Mato Grosso, Rondônia, Acre, foram classificados com uma frequência “Muito alta” e Amazonas com uma frequência “Alta”.

Na Tabela 2, são mostrados a densidade dos focos de queimadas de acordo com a metodologia do (White (2018), ou seja, a razão da área em quilômetro quadrado (km²) e a média anual dos focos de queimadas de cada Estado. Rondônia ocupa a primeira posição, seguido de Mato Grosso, Acre, Bolívia e na última posição o Estado do Amazonas.

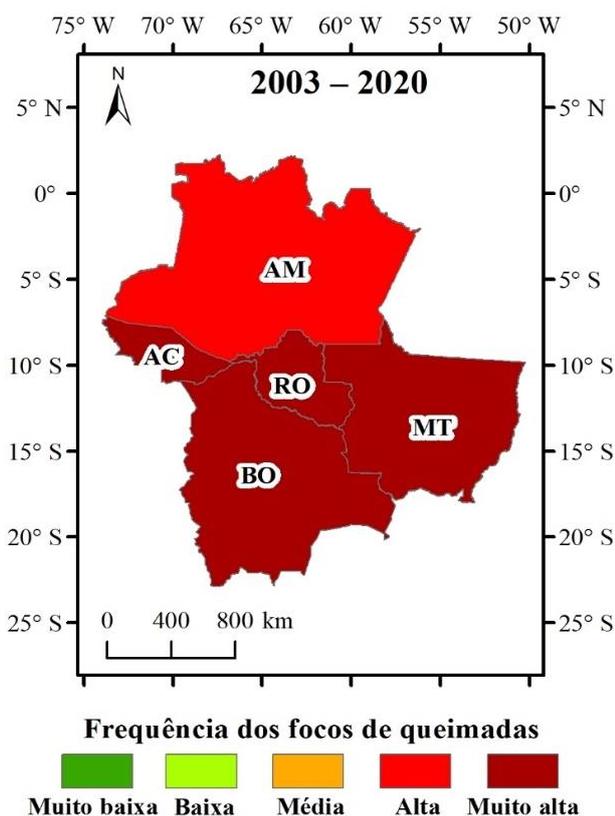


Figura 10. Frequência dos focos de queimadas na região central da América do Sul, durante o período de 2003 a 2020. Os Estados brasileiros e Departamentos da Bolívia são representados por siglas: AM (Amazonas), AC (Acre), MT (Mato Grosso), RO (Rondônia), BN (Beni), SC (Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).

Tabela 2. Lista dos Estados brasileiros e Bolívia, suas áreas; números de focos de queimadas detectados (F); média anual de F; área pela média anual de F (densidade de F); classificação da frequência de focos de queimadas. Os Estados estão em ordem decrescente em relação à densidade de F.

Código	Nome	Área (km ²)	Total de Focos de queimadas (F)*	Média anual de F*	Densidade (km ² /média de F)**	Frequência**
RO	Rondônia	237.765,35	295.089	16.394	14,50	Muito alta
MT	Mato grosso	903.206,05	738.342	41.019	22,02	Muito alta
AC	Acre	164.173,43	126.073	7.004	23,44	Muito alta

BO	Bolívia	1.098.581,00	683.934	37.996	28,91	Muito alta
AM	Amazonas	1.559.167,88	191.818	10.657	146,31	Alta

* Total e Média anual entre 2003–2020 (Fonte: INPE, 2020).

** De acordo a classificação do White (2018).

6.3.2. Densidade de Kernel dos focos de queimadas

O mapa de densidade de Kernel de focos de queimadas mostrado na Figura 11, engloba a área de estudo e foi calculado para o período de 2003 a 2020. De forma geral, as maiores aglomerações da densidade de queimadas estão concentradas na Bolívia, Rondônia e Mato Grosso. Na Bolívia é possível observar as maiores densidades de queimadas na região leste, no Estado Rondônia na região norte, no Estado do Mato Grosso na região norte, centro e sudoeste, já no Estado do Amazonas na região sul e no Estado do Acre na região leste. Essa distribuição espacial na região central da América do Sul, confirma os resultados do Chen et al. (2011), exceto na região do Departamento de Santa Cruz na Bolívia onde se observa maior concentração espacial dos focos de queimadas.

A distribuição espacial dos focos de queimadas nos Estados brasileiros, é consistente com as áreas de cobertura e uso da terra de pastagem, que se concentram no leste do Estado do Acre, sul do Amazonas, distribuído em toda a região de Rondônia, exceto o noroeste e no Estado do Mato Grosso onde as áreas de pastagem estão distribuídos na região oeste, norte e leste, como também, o tipo de uso da terra pela agricultura na região central (MAPBIOMAS, 2021b).

Na Bolívia, as queimadas na região nordeste, principalmente no Departamento do Beni, coincide com o tipo de vegetação não florestal (savanas e arbustivas), e na região sudeste, no Departamento do Santa Cruz, com áreas agropecuárias e de formação florestal (MAPBIOMAS, 2020).

Para o Estado do Amazonas, Vasconcelos et al. (2013), observaram que 60% dos focos de queimadas ocorreram no período de 2003 a 2012 na região sul do Estado do Amazonas foram associadas a mudanças do uso do solo, enquanto que no Estado do Acre, DA SILVA et al. (2018), avaliando as ocorrências de queimadas para o período de 2008 a 2017, mostraram que os padrões de ocorrências de queimadas predominaram próximas às principais vias de acesso, tanto terrestres quanto fluviais e em áreas de atividades agropecuárias.

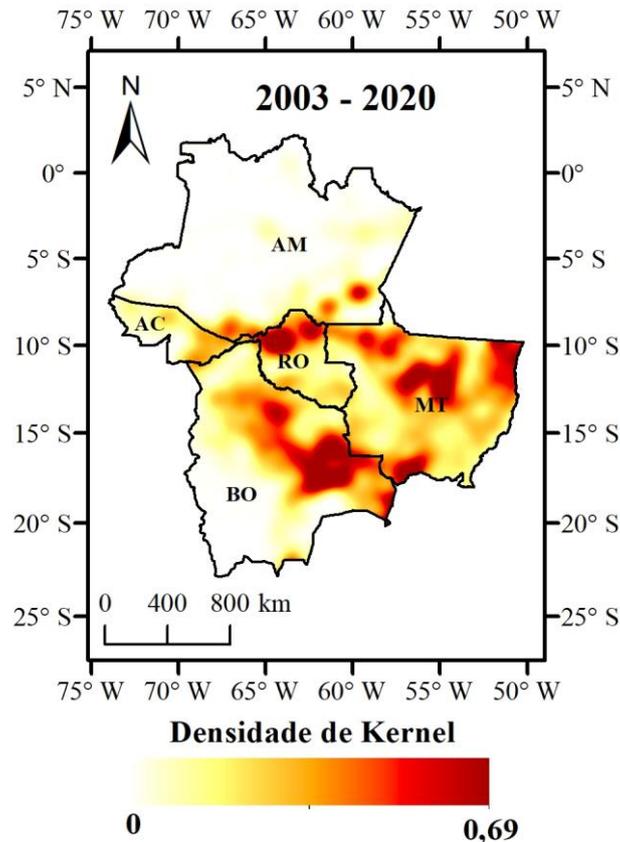


Figura 11. Densidade de kernel dos focos de queimadas de 2003 a 2020, na região central da América do Sul.

6.4. Tendência por Municípios dos focos de queimadas na região central da América do Sul

A distribuição espacial da análise de tendência temporal baseado no teste de Mann-Kendall para cada Município dos Estados do Amazonas, Rondônia, Mato Grosso, Acre e Bolívia é apresentada na Figura 12. No Amazonas, os Municípios do Humaitá ($Z=2,69$), Novo Aripuanã ($Z=2,58$) e Tapauã ($Z=2,73$), apresentaram uma tendência positiva significativa ($p<0,05$) dos focos de queimadas, localizados na região centro sul do Estado (cores vermelhas), enquanto os Municípios do Anori ($Z=-2,01$), Careiro ($Z=-2,06$) e Itapiranga ($Z=-2,54$), apresentam uma tendência negativa significativa (cores verdes), localizados na região leste do Estado. Por outro lado, a grande maioria dos Municípios (32 dos 62 municípios) localizados especialmente na região centro, oeste e sul do Estado do Amazonas (cores laranjas) apresentaram uma tendência positivas não significativa enquanto 23 dos Municípios localizados na região nordeste (cor lima)

apresentaram tendências negativas não significativas. Somente os Municípios do Guajará e Manacapuru, não mostraram tendências (cores amarelas).

No Estado de Rondônia, na maioria dos Municípios (36 dos 52 Municípios do Estado) localizados na região central e sul do Estado (cores verdes) observou-se uma tendência negativa significativa e em 16 Municípios tendências negativas não significativas, localizados maioritariamente na região noroeste do Estado (cor lima).

Já no Estado do Mato Grosso, observou-se tendências positivas não significativas em 11 Municípios, distribuído na região leste e sul (cor laranja), entre eles, Luciara com maior valor de tendência positiva ($Z=1,28$; $p>0,05$), enquanto 76 Municípios apresentaram tendências negativas não significativas, distribuídos na região noroeste, sul e leste do Estado (cor lima), e 53 Municípios localizados principalmente na região central do Estado (cor verde) apresentaram tendências negativas significativas. Somente o Município da Nossa Senhora do Livramento, não apresentou tendências.

No Estado do Acre, somente o Município Manoel Urbano, localizado na região central do Estado (cor vermelho), mostrou uma tendência positiva significativa ($Z=1,97$; $p<0,05$). Nove Municípios apresentaram tendências positivas não significativas, distribuídos ao longo da região norte-sul (cor laranja), em sete Municípios, localizados predominantemente na região noroeste e sudeste do Estado (cor lima), foram observadas tendências negativas não significativas, e quatro Municípios, localizados na região sudeste (cor verde), apresentaram tendências negativas significativas, e por fim o Município Marechal Thaumaturgo não apresentou tendência.

Na Bolívia, os Municípios que apresentaram tendências positivas significativas foram: Anzaldo ($Z=2,52$), Ravelo ($Z=2,86$), Sica Sica ($Z=2,03$), Tacopaya ($Z=2,04$) e Tapacarí ($Z=2,04$), localizados na região oeste (cor vermelho). 107 Municípios apresentaram tendências positivas não significativas, localizados maiormente na região oeste e parte deles na região sudeste da Bolívia (cor laranja). Por outro lado, em 111 Municípios observaram-se tendências negativas não significativas, distribuídos na região leste e sul do País (cor lima), 46 Municípios apresentaram tendências negativas significativas, os quais estão localizados na região norte, nordeste e parte de região centro-sul e por último (cor verde), em 39 Municípios espalhados maiormente na região oeste e sudoeste do País (cor amarelo) não foram observadas tendências.

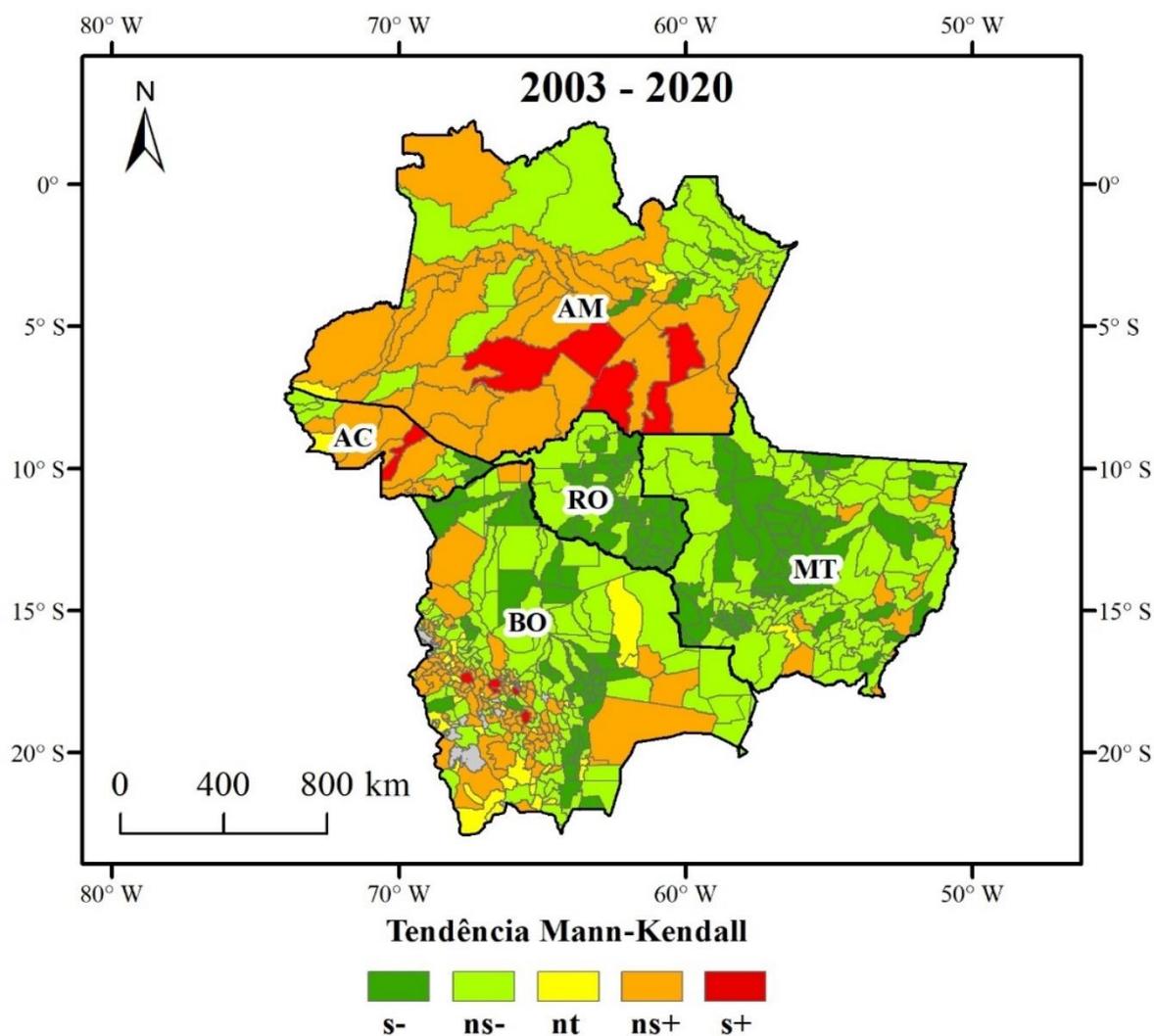


Figura 12. Tendência temporal de Mann-Kendall por Municípios do Estado do Amazonas, durante o período de 2003 a 2020. Os Estados e Bolívia é mostrada em siglas: BO (Bolívia), AM (Amazonas), RO (Rondônia), MT (Mato Grosso) e AC (Acre). A significância da tendência do teste de Mann-Kendall é apresentada por cores e letras com sinal: s- (significativa negativa; cor verde), ns- (não significativa negativa; cor lima), nt (não tem tendência; cor amarela), ns+ (não significativa positiva; cor laranja) e s+ (significativa positiva; cor vermelha).

6.5. Análise da relação entre focos de queimadas com a precipitação e desmatamentos

A relação entre focos de queimadas e precipitação no Estado do Amazonas é apresentada na Figura 13A. Pode-se observar que, 20% da variabilidade anual dos focos de queimadas é explicada pela variabilidade da precipitação anual durante o período de 2003 a 2019, de modo que o aumento (diminuição) dos focos de queimada está associado à diminuição (aumento) da precipitação, conforme mostrado pela correlação

negativa moderada ($r=-0,45$). Essa relação inversamente proporcional ocorreu nos anos com anomalias positivas de queimadas 2005, 2007, 2010, 2015, 2016, quando a precipitação anual esteve abaixo da média anual (2626 mm) e nos anos com anomalias negativas de focos de queimadas em 2008, 2009, 2011, 2012, 2013 e 2014, quando as precipitações anuais atingiram valores acima da média anual. No entanto, esse comportamento foi diferente nos anos 2006, 2017, 2018 e 2019 (2003 e 2004), em que ocorreram anomalias positivas (negativas) de queimadas e foram anos com precipitações acima da média (abaixo da média) de 2003 a 2019.

Além da relação com a precipitação, a Figura 13B, mostra a regressão linear entre focos de queimadas e desmatamentos. Os resultados desta análise indicam que, em torno de 20% da variabilidade interanual dos focos de queimadas, durante o período de 2003 a 2020, é explicada pelo desmatamento, o que corresponde ao coeficiente de correlação positivo moderado ($r=0,45$). Assim, pode dizer que anomalias positivas de queimadas podem ser explicadas em decorrência de desmatamentos, principalmente a partir de 2016 até 2020, que mostra uma relação proporcional. Por tanto, o desmatamento explicaria o aumento das queimadas especialmente desde 2017, mesmo, registrando-se precipitações acima da média.

Esses resultados confirmam a relação inversa entre focos de queimadas e precipitação no Estado do Amazonas encontrada com trabalhos anteriores. Vasconcelos et al., (2013), relatou uma forte relação inversa das queimadas com a precipitação mensal durante o período de 2003 a 2012. Seus resultados mostram que os focos de queimadas tendem a diminuir com o aumento da precipitação em uma escala de tempo mensal e anual no estado do Amazonas. No entanto, os autores não observaram uma relação mensal e anual entre os focos de queimadas e desmatamentos. Essa discrepância, é possível em decorrência do período analisado. A relação entre focos e de queimada e desmatamento encontrada neste estudo restringe-se aos anos após 2016, período este não analisado por Vasconcelos et al., (2013).

Nesse mesmo contexto, White (2018) também relatou uma relação negativa significativa entre focos de queimadas e precipitação de cada município do Estado do Amazonas e uma significativa relação positiva dos focos de queimadas e desmatamento, além da relação, com áreas de pastagens e área agrícola por município.

Amazonas

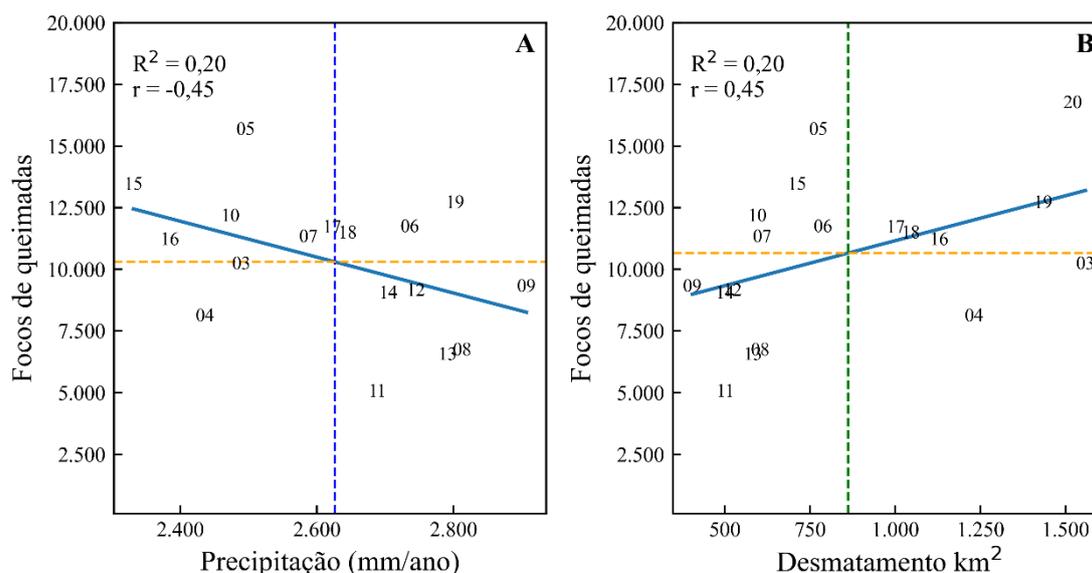


Figura 13. Regressão linear para o Estado do Amazonas: (A) focos de queimadas e precipitação durante o período de 2003 a 2019, (B) focos de queimadas e desmatamentos durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.

No Estado de Rondônia, apenas 8% da variabilidade anual das queimadas foi explicada pela variabilidade de precipitação definindo assim uma correlação positiva fraca ($r=0,28$) durante o período de 2003 a 2019 (Figura 14A). Anos com anomalias positivas de queimadas em 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, foram caracterizados por precipitações acima da média anual (1806 mm). Somente o ano de 2010, apresentou uma relação inversamente proporcional. Portanto, a precipitação anual não foi relevante para explicar a variação da ocorrência dos focos de queimadas no Estado de Rondônia.

Por outro lado, na Figura 14B, se mostra a relação das queimadas e desmatamento do Estado de Rondônia. Nesta figura podemos observar que 80% da variabilidade anual das queimadas é explicada pelo desmatamento, uma relação positiva muito forte ($r=0,89$). Além disso, observa-se que entre o período de 2003 a 2007, anos com anomalias positivas de queimadas, ocorreram os maiores valores de desmatamento acima do valor médio durante o período de 2003 a 2020 (1508 km^2). Por outro lado, durante os anos com queimadas abaixo da média durante 2008 a 2020 (exceto 2010), os desmatamentos estiveram abaixo da média. Então, o desmatamento é uma variável que

contribui significativamente no aumento das queimadas no Estado de Rondônia. Assim, pode-se dizer que ao longo da série estudada é evidente que a variabilidade interanual dos focos de queimadas segue o padrão do desmatamento.

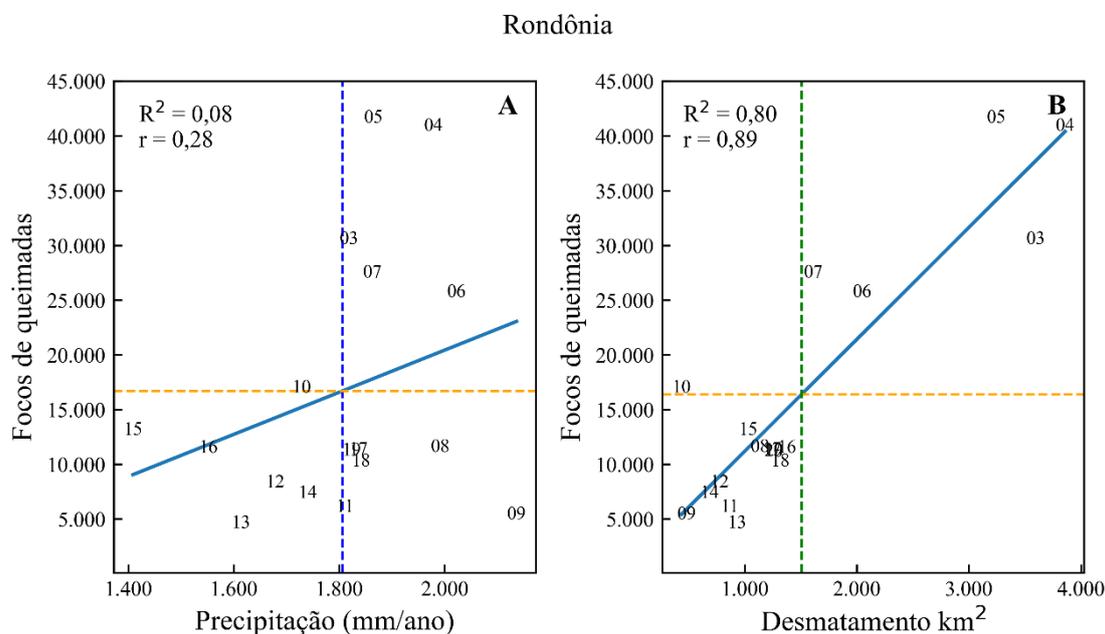


Figura 14. Regressão linear no Estado de Rondônia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.

Na Figura 15A é apresentada a relação dos focos de queimadas e precipitação para o Estado do Mato Grosso. Similar ao que ocorre no Estado de Rondônia, e possível observar que somente 7% da variabilidade anual dos focos de queimadas é explicada pela precipitação durante o período de 2003 a 2019, o que corresponde à um coeficiente de correlação negativa fraca ($r = -0,26$). Uma relação inversamente proporcional foi observada nos anos 2007 e 2010, anos com queimadas acima da média anual e precipitações abaixo da média anual (1817 mm) e durante os anos 2008, 2009, 2011, 2013, 2014, 2017, 2018 e 2019, anos com queimadas abaixo da média anual, foram registradas precipitações acima da média anual. Esse comportamento não foi observado em 2004 e 2016, anos com queimadas acima da média anual, observou-se precipitações

acima da média anual e durante os anos 2012, 2015 e 2016, anos com queimadas (precipitação) abaixo da média anual.

Em relação ao desmatamento, observou-se uma forte relação com as queimadas do Estado do Mato Grosso (Figura 15B). A variância explicada pela regressão linear mostra que 61% da variabilidade das queimadas é explicada pelo desmatamento o que equivale uma relação positiva ($r=0,77$). Neste caso, anos em que os focos de queimadas ocorreram acima da média, especificamente durante 2003 a 2006, apresentaram desmatamentos acima da média (3069 km²) e nos anos com queimadas abaixo da média, de 2008 a 2019 (exceto 2010), observou-se desmatamentos abaixo da média. De modo que o aumento do desmatamento é uma variável que contribui de forma significativa no aumento das queimadas no Estado do Mato Grosso.

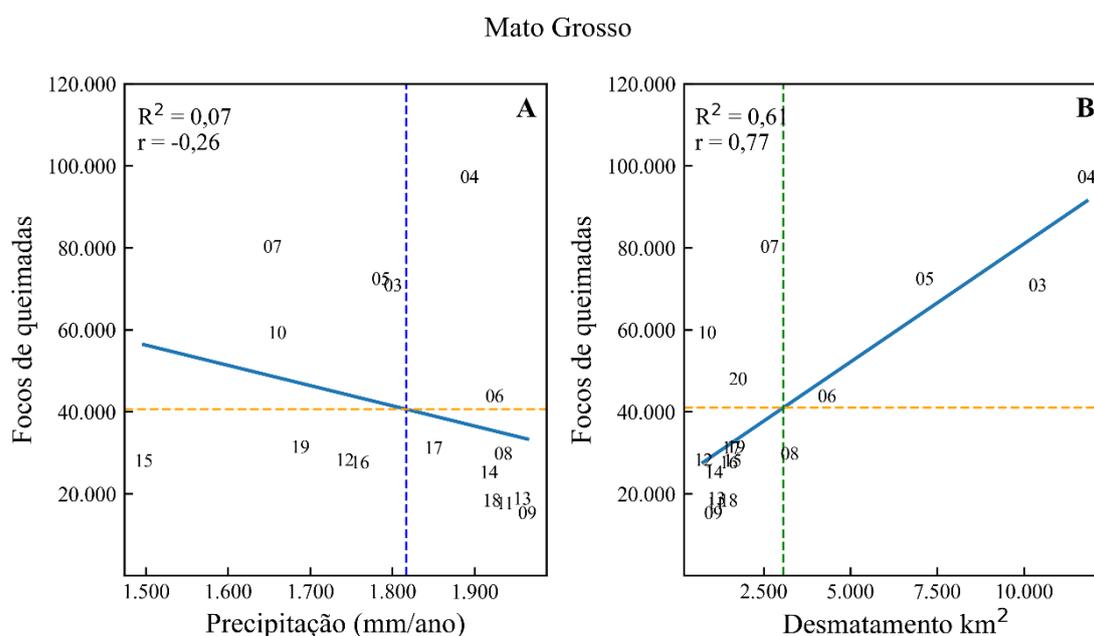


Figura 15. Regressão linear no Estado do Mato Grosso: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a 2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.

A relação entre queimadas e precipitação do Estado do Acre é apresentado na Figura 16A. É possível observar que 41% da variabilidade anual dos focos queimadas é explicada pela variabilidade de precipitação durante o período de 2003 a 2019, o que

representa uma forte relação negativa ($r=-0,64$). Essa relação negativa é observada especificamente nos anos 2003, 2004 a 2016, que foram anos com focos de queimadas acima da média e apresentaram precipitações abaixo da média anual entre 2003 e 2019 (2038 mm) e nos anos de 2009 a 2019, anos com queimadas e precipitações abaixo da média. Portanto, a precipitação é uma variável que contribuiu significativamente para explicar o comportamento da ocorrência dos focos de queimadas no Estado do Acre.

Por outro lado, também foi possível observar que 29% da variabilidade dos focos de queimadas é explicada pelo desmatamento durante o período de 2003 a 2020, o que significou uma relação positiva moderada ($r=0,54$). Durante os anos de 2003, 2004, 2005, 2016, 2020, anos com focos de queimadas acima da média, foram anos que apresentaram desmatamentos acima da média anual durante o período de 2003 a 2020 (413,67 km²). Nos anos entre 2006 e 2019, quando foi observado queimadas abaixo da média, observou-se desmatamentos abaixo da média anual. O que significa que o desmatamento é uma variável que contribui significativamente no aumento das queimadas no Estado do Acre.

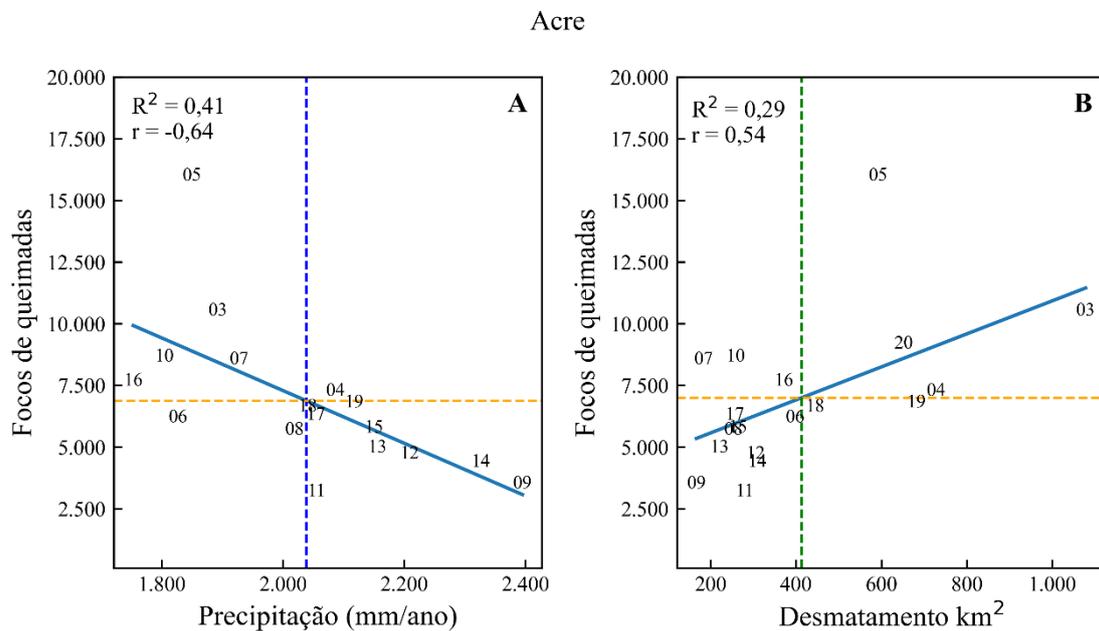


Figura 16. Regressão linear no Estado de Rondônia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020. As etiquetas representam os dois últimos dígitos de cada ano. A linha azul vertical em A indica a média anual da precipitação durante o período de 2003 a 2019, a linha laranja horizontal em A e B indica a média anual dos focos de queimadas durante o período de 2003 a 2019 e 2003 a

2020, respectivamente, e a linha verde vertical em B indica a média anual dos desmatamentos durante o período de 2003 a 2020.

Sobre a Bolívia, (Figura 17A), a regressão linear entre focos de queimadas e precipitação na Bolívia indica que 44% da variabilidade anual dos focos de queimadas é explicada pela precipitação durante o período de 2003 a 2020, com uma forte relação negativa ($r = -0,66$). A variável precipitação contribui significativamente na variabilidade da ocorrência dos focos de queimadas na Bolívia. Em 2010 (2014), ano com maior (menor) queimada acima (abaixo) da média anual, observou-se o menor (maior) valor da precipitação anual 1.472 mm (1.069 mm). Além disso, as relações inversas foram observadas nos anos 2004, 2005 e 2019 com focos de queimadas acima da média anual e precipitações abaixo da média anual (1262 mm). Também, em anos com valores abaixo da média anual dos focos de queimadas, 2009, 2012, 2013, 2015, 2017 e 2018, observou-se precipitações anuais acima da média anual. No entanto, nos outros anos, o comportamento da relação é diferente, nos anos 2006, 2007 e 2008 (2003, 2011 e 2016) com valores acima (abaixo) da média anual de focos de queimadas e precipitação, ou seja, para esses anos, a precipitação não explica o aumento ou redução dos focos de queimadas nesses anos.

A relação significativa negativa entre precipitação e focos de queimadas sobre a Bolívia também foi demonstrado por Heyer et al. (2018) para o período de 2001 a 2015. Além disso, estes autores mostraram uma significativa relação positiva entre focos de queimadas e o índice de seca (*Drought Code*), que indica o teor médio de umidade de camadas da camada superficial orgânica e uma relação negativa com valores mensais de umidade relativa.

A relação dos focos de queimadas e desmatamentos sobre a região da Bolívia é apresentada na Figura 17B. O desmatamento anual explica somente 9% da variabilidade dos focos de queimadas, o que representa uma fraca relação positiva ($r = 0,31$). Uma relação proporcional observou-se em 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 (2011, 2012, 2013, 2014 e 2015) em que se observaram focos de queimada e desmatamento acima (abaixo) da média anual.

Bolívia

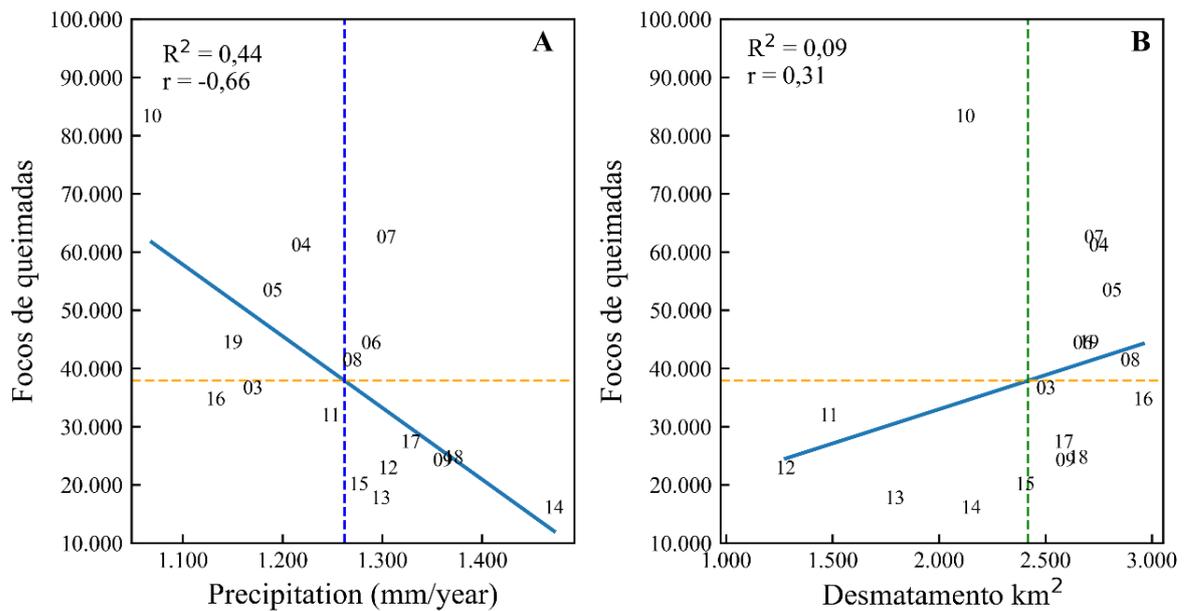


Figura 17. Regressão linear na Bolívia: (A) focos de queimadas e precipitação do TRMM durante o período de 2003 a 2019, (B) queimadas e desmatamentos, durante o período de 2003 a 2020.

Com base nos resultados apresentados acima, pode-se concluir que, de modo geral, a precipitação anual explica significativamente a ocorrência dos focos de queimadas no Estado do Acre e Bolívia, no entanto, a taxa de desmatamento anual explica em maior parte a variabilidade de focos de queimadas nos Estados do Mato Grosso, Rondônia e Acre. A relação interanual não significativa entre focos de queimadas e precipitação anual nos Estado do Amazonas, Rondônia e Mato Grosso, indica que não existe uma relação direta, o que significa que as atividades antropogênicas são importantes na ocorrência das queimadas.

A relação interanual positiva das queimadas associadas ao desmatamento, em especial, foram significativas nos Estados do Acre, Rondônia e Mato Grosso. No Estado do Amazonas, mesmo não apresentando uma relação significativa, a variabilidade interanual das queimadas segue o padrão do desmatamento, em que o uso da terra é um fator dominante na ocorrência das queimadas na região da área de estudo.

A conversão de florestas nativas, pelo desmatamento são principalmente para o uso de pastagens. Entre 1985 a 2019, as maiores transições de cobertura e uso do solo que foram observadas da floresta natural para pastagens, ocorrem em maior área no Estado

do Mato Grosso 141.700,73 km², seguido de Rondônia 64.287,69 km², no Amazonas 18.904,94 km² e Acre 15.199,31 km² (MAPBIOMAS, 2021b).

As condições nas regiões mais úmidas limitam ou restringem as atividades de queimadas. Sob condições climáticas atuais a floresta Amazônica, restringe 58% da sua área às queimadas decorrentes de desmatamentos, no entanto, sob mudanças climáticas com reduções de precipitação anual de 200 mm, a restrição da floresta Amazônica é reduzida a 24% (LE PAGE et al., 2010). Isso mostra a importância de ações de redução dos desmatamentos e queimadas em áreas sensíveis às mudanças climáticas e à pressão das atividades antrópicas.

6.6. Anomalias dos focos de queimadas durante anos com eventos de secas

Nas Figura 18 e 19 apresentam-se as distribuições espaciais das anomalias dos focos de queimadas e precipitação, respectivamente, na Bolívia e nos Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia durante os anos de extremos climáticos. Estudos anteriores relataram secas intensas nos anos 2005, 2007, 2010, 2015 na bacia da Amazônia (MARENGO et al., 2008; CHEN et al., 2011; PANISSET et al., 2017; JIMENEZ et al., 2018; ANDERSON et al., 2018), nos anos 2019 (BISSOLLI et al., 2020; BILBAO et al., 2020) e em 2020 (GFED, 2020).

Em 2005, as máximas anomalias positivas de focos de queimadas com cerca $+4\sigma$ ocorreram na Bolívia na região leste envolvendo o Departamento do Beni e a região norte, no Departamento do Pando divisa com o Estado do Acre, onde também mostrou anomalias positivas na região leste. No Estado do Amazonas observou-se na região central, em Rondônia na região central e sul e no Estado do Mato Grosso na região nordeste (Figura 18). As áreas com anomalias positivas de queimadas coincidem com as anomalias negativas de precipitação anual de 900 mm inferior do que a média de 2003 a 2019, especialmente no Estado do Acre e Departamento do Pando e Beni na Bolívia. Também, nota-se anomalias de precipitação negativa em parte da região norte do Estado do Mato Grosso (Figura 19). A seca intensa de 2005, concentrada na região oeste e sudeste da bacia Amazônica, esteve associada à anomalia positiva da temperatura da superfície do mar (TSM) do Atlântico Tropical Norte (ATN) (MARENGO et al., 2008; PANISSET et al., 2017; ESPINOZA et al., 2018).

Em 2007, maiores anomalias positivas com $+3,8\sigma$ de focos de queimadas foram observadas na região sudeste da Bolívia, na região sul do Estado de Rondônia e norte do

Estado do Mato Grosso, em contraste com os Estados do Acre e Amazonas que não apresentaram anomalias positivas (Figura 18). A maior correspondência espacial das anomalias positivas dos focos de queimadas ocorre no Mato Grosso com as anomalias negativas de precipitação anual, apresentada na Figura 19, com valores inferiores de 600 mm da média anual. Na região leste Bolívia, nota-se uma menor anomalia de precipitação inferior a 300 mm do que a média anual. Por outro lado, notou-se anomalias negativas de precipitação entre 300 mm e 600 mm no Estado do Acre e Amazonas, no entanto não foram observadas anomalias positivas de queimadas. De acordo com Chen et al. (2011), a seca de 2007 podem ter sido causadas pelas anomalias da TSM do ATN em combinação com o evento de El Niño. Seu estudo mostra uma significativa relação temporal positiva dos focos de queimadas e índices de ONI e AMO no Estado do Mato Grosso, Acre, Amazonas, Rondônia e Beni na Bolívia.

Em 2010, máximas anomalias positivas com $+4\sigma$ de focos de queimadas estiveram concentradas na região sul e leste do Estado do Mato Grosso, na Bolívia distribuídos no noroeste e parte do centro leste e sudeste (Figura 18). As anomalias positivas de focos de queimadas têm relação espacial com anomalias negativas de precipitação principalmente ao longo da região noroeste e leste da Bolívia e sul do Mato Grosso com precipitações inferiores entre 300 mm e 600 mm da média anual. Segundo Panisset et al. (2017), a seca de 2010 foi mais intensa e extensa do que a seca de 2005, afetou cerca de 42% da superfície da bacia Amazônica comparado com 37% em 2005, a região oeste e sudeste da bacia Amazônica foram mais afetadas durante a época de seca (JJAS) com desvios de déficit hídrico de $+2,1\sigma$. A seca de 2010 esteve associada as anomalias sucessivas de um evento do El Niño, seguido do aquecimento anômalo da TSM do ATN.

Em 2015, as anomalias positivas com $+3,5\sigma$ distribuídos em toda a região na região leste do Estado do Amazonas, leste e oeste do Estado do Mato Grosso, e leste e sul da Bolívia. Anomalias positivas com menor intensidade na região norte do Estado de Rondônia e Acre (Figura 18). Nota-se uma relação espacial das anomalias positivas de focos de queimadas e anomalias negativas de precipitação de 900 mm inferior da média anual na região leste do Estado do Amazonas. Na Bolívia, observa-se também uma relação espacial inversa na região leste e no Estado do Mato Grosso na região leste-oeste (Figura 19). A seca de 2015, considerada seca mais extensa aos de 2005 e 2010, afetou 80% da bacia Amazônica, com maior intensidade na estação de transição de seca para chuvosa (ONDJ) na região leste com déficit de precipitação de $+3,4\sigma$ (PANISSET

et al., 2017), associada ao evento do El Niño e anomalias da TSM do ATN (ESPINOZA et al., 2018).

Em 2019, notou-se anomalias positivas de focos de queimadas com $+4\sigma$ nos extremos do sudeste, sudoeste e central da Bolívia, também, observou-se anomalias positivas generalizada no Estado do Acre, no norte do Estado de Rondônia, nos Estados do Amazonas e Mato Grosso, observa-se anomalias positivas dispersas em toda a região dos Estados, no entanto acentuadas no oeste do Estado do Amazonas (Figura 18). Existe uma maior relação espacial entre anomalias positivas de queimadas e anomalias negativas de precipitação na região sudeste da Bolívia, onde apresentou precipitações inferiores a 900 mm do que a média anual. Além disso, nota-se a relação inversa em parte da região noroeste e oeste dos Estados do Amazonas e Mato Grosso, com anomalias negativa de precipitações de 600 mm e 300 mm, respectivamente (Figura 19). As anomalias de precipitação na região sul do da Bolívia e Brasil são consistentes com Bissolli et al. (2020), que observaram reduções de precipitação anual entre 20 a 40% da média de 1981 a 2010, a seca pode ter sido associada ao evento fraco do El Niño e aquecimento anômalo positivo da TSM do ATN.

Já em 2020, as anomalias positivas de focos de queimadas estiveram distribuídas em maior extensão comparado aos anteriores anos de secas intensas, nota-se em toda a região da área de estudo, com maior intensidade destaca-se na região oeste e nordeste da Bolívia, na região centro, sul e leste do Amazonas, na região sudoeste do Mato Grosso, oeste e central no Acre com cerca de $+4\sigma$. Rondônia apresentou menores valores de anomalias espaciais comparados aos outros Estados (Figura 18). De acordo com ClimateEngine (2021) foram observadas precipitações inferiores a 160 mm/mês da média de 2003 a 2020 na região sudeste do Estado do Mato Grosso, o que poderia ter influenciado o aumento ocorrência de queimadas nessa região. Além disso se observou anomalias de precipitação na região metade norte da Bolívia, que em parte explicaria as anomalias positivas de focos de queimadas, no entanto, não foi observado anomalias negativas de precipitação no oeste da Bolívia, região que apresentou anomalias positivas máximas de focos de queimadas.

Nos Estado do Amazonas, maiores anomalias de precipitação estiveram concentradas na região oeste, sul e nordeste, não coincidindo diretamente com a região com máxima anomalias positiva de queimadas. No Estado do Acre, observaram somente anomalias negativas de precipitação no extremo noroeste, não mostra uma relação significativa com as anomalias de queimadas no restante da região do Estado.

Finalmente no Estado de Rondônia, observaram anomalias de precipitação negativas generalizada, exceto na região central (CLIMATEENGINE, 2021).

De acordo com GFED (2020), a secas de 2020, poderiam ter sido geradas pelas combinações das anomalias de TSM do pacífico e ATN, desde início de 2020 observaram foram observadas valores das TSMs significativamente acima da média de 2001 a 2015, em base a essas anomalias positivas foram projetadas riscos altos de queimadas nos Estados do Acre, Amazonas, Rondônia e Mato Grosso.

As secas de 2019 e 2020 afetaram significativamente outras regiões como o Pantanal no Brasil e Bolívia. Um estudo recente de Marengo et al. (2021), demonstra que as secas do pantanal ocorreram durante anomalias positivas da TSM do ATN. Reduções de precipitações na região da bacia Amazônia podem ter sido associadas às anomalias das TSM do Pacífico e ATN.

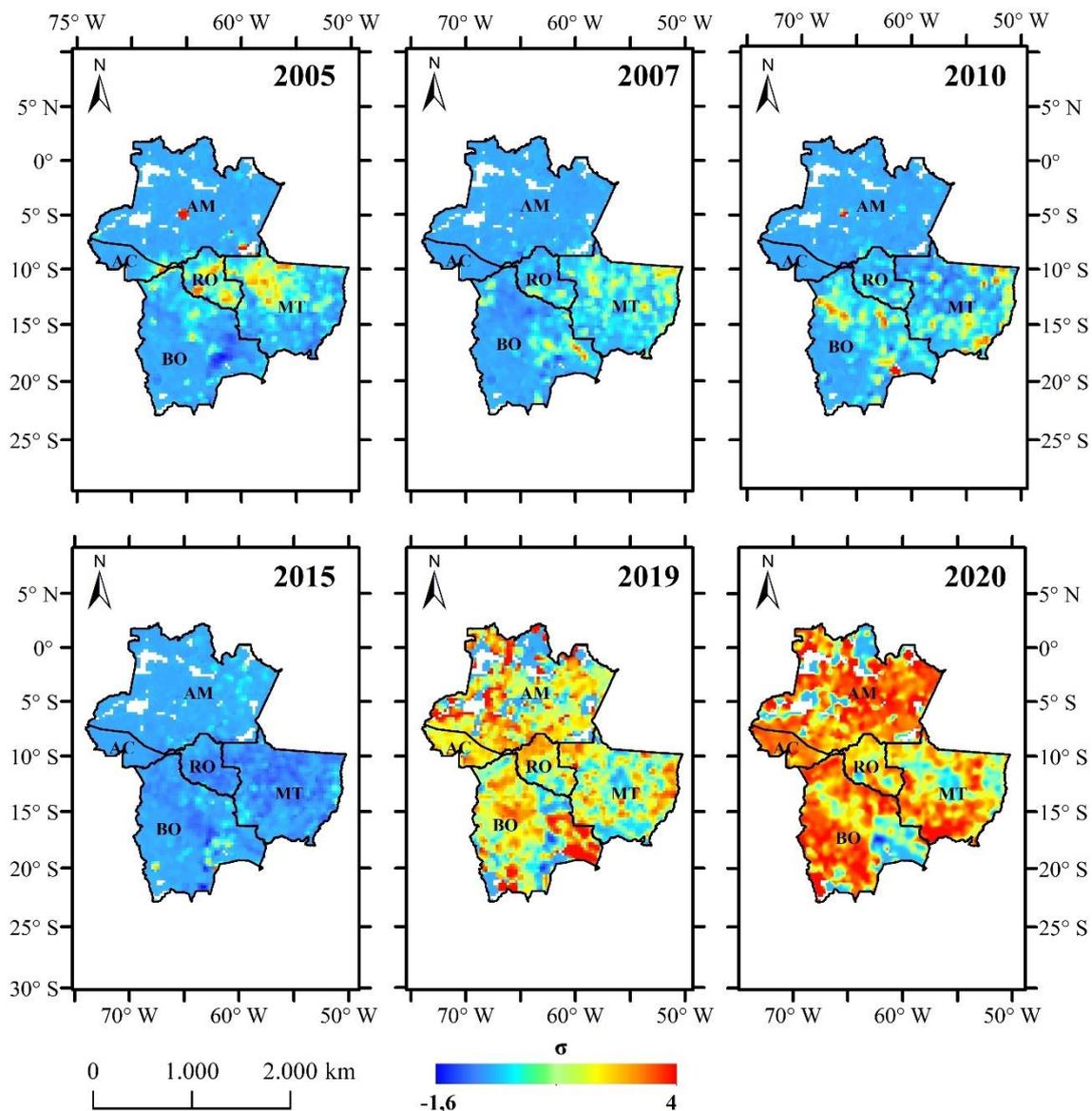


Figura 18. Anomalias de focos de queimadas durante os anos 2005, 2010, 2015 e 2020. As siglas indicam os nomes dos Estados brasileiros: AM (Amazonas), AC (Acre), MT (Mato Grosso). RO (Rondônia) e BO (Bolívia).

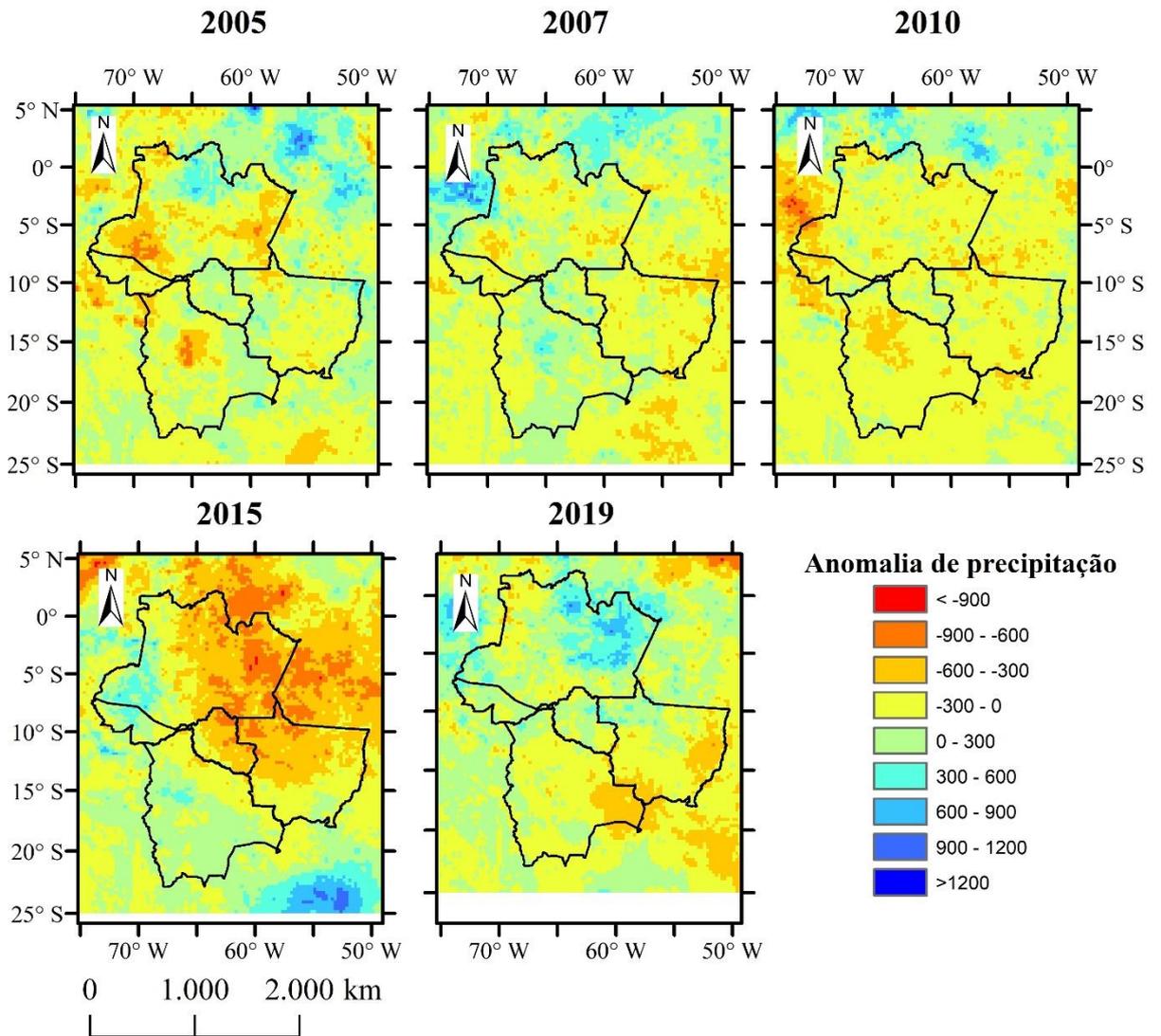


Figura 19. Anomalias de precipitação anual do TRMM na Bolívia e nos Estados do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia. As anomalias de cada ano são em relação à média anual durante o período de 2003 a 2019.

7. Conclusões

A ocorrência interanual dos focos de queimadas na região central da América do Sul, que envolve a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia no período de 2003 a 2020, apresenta um comportamento heterogêneo, com uma maior variação no Estado de Rondônia ($CV=72\%$). Além disso, observou-se uma correlação significativa da variabilidade interanual entre os Estado do Acre, Rondônia, Mato Grosso e Bolívia. Quanto à época de queimadas é semelhante na região estudada, que compreende aumento de focos de queimadas comparado aos outros meses, a partir de julho a outubro, que compreende o final da estação seca e começo da estação chuvosa.

Por outro lado, notou-se uma distribuição espacial dos focos de queimadas concentrados na região leste da Bolívia e Acre, no sul do Estado do Amazonas, na região norte de Rondônia e no Estado do Mato Grosso. Assim também, observamos tendências significativas positivas principalmente em Municípios localizados na porção sul do Estado do Amazonas, na região centro-oeste na Bolívia e centro do Acre.

Finalmente notou-se uma relação interanual significativa entre focos de queimadas e precipitação na Bolívia e Acre, e uma relação significativa entre focos de queimadas e desmatamento nos Estado de Rondônia, Mato Grosso e Acre. A relação espacial entre focos de queimadas e precipitação, foram observadas maiores correspondências de aumento de queimadas e reduções de precipitação em 2005 no Acre, Bolívia e Mato Grosso, em 2007 no Estado do Mato Grosso. Em 2010, essa correspondência notou-se principalmente na Bolívia. Já em 2015 apenas notou-se no Estado do Amazonas, no entanto, mesmo que foram observadas precipitações inferiores à média no Estado de Rondônia e Mato Grosso, não apresentaram anomalias positivas de focos de queimadas. Já em 2019, as anomalias positivas de focos de queimadas na região sudeste na Bolívia e sudoeste no Mato Grosso, apresentaram anomalias negativas de precipitação nessas regiões e finalmente em 2020, notou-se uma anomalia positiva de focos de queimadas com maior extensão na área de estudo comparado aos anteriores anos de secas intensas.

CAPÍTULO 2

Cataño et al., 2021. Variação espaço-temporal dos focos de queimadas sobre a Bolívia a partir de observações remotas.

Submetido a *Environmental Monitoring and Assessment*.

Resumo

Nos últimos anos, diferentes regiões da América do Sul têm sofrido uma mudança na frequência e intensidade na ocorrência das queimadas. As queimadas são uma fonte significativa de poluentes para a atmosfera, afetam a estabilidade dos ecossistemas, dos sistemas sociais e econômicos em escala local, regional e global. Neste estudo, fez-se uma avaliação da variação espaço-temporal das queimadas na Bolívia, a partir dos dados do sensor MODIS do satélite AQUA, no período de 2003 a 2020. Os resultados mostram uma média anual de 37.996 focos de queimadas, observou-se um ponto de quebra significativo na série temporal no ano 2010, em que a média dos focos de queimadas foi maior no período de 2003 – 2010 que durante 2011 – 2020 (+82%). Observa-se um comportamento sazonal de ocorrência de queimadas bem definido, com o início da estação de queimadas no final do inverno (estação seca) e começo da primavera (transição da estação seca para chuvosa), sendo os meses de agosto, setembro e outubro, os que concentraram 79% das queimadas. Os Departamentos de Santa Cruz e Beni concentraram 85% do total das ocorrências de queimadas no país. Análises entre os períodos de 2003–2010 e 2011–2020 mostram que dos nove Departamentos somente La Paz, Chuquisaca e Tarija apresentaram uma redução significativa do número de focos de queimadas no período mais recente. De modo geral, a combinação de eventos de secas com políticas públicas que visam a expansão das atividades agropecuárias causa aumentos no número de queimadas. É preciso reduzir as queimadas, para a sustentabilidade dos ecossistemas florestais e biodiversidade, reduzindo assim os riscos à saúde pública e perdas econômicas causadas pelas queimadas não controladas.

Keywords: queimadas. política pública. secas. sensoriamento remoto. Bolívia.

Introdução

As queimadas têm ocorrido desde os tempos geológicos (período carbonífero), cujo regime foi controlado por processos naturais até a revolução industrial no século XVIII (SCOTT, 2000). A partir da revolução industrial, houve um aumento das queimadas impulsionadas pelas atividades antropogênicas, sendo estas, desde então, o fator dominante no controle do regime das queimadas (PECHONY; SHINDELL, 2010).

Apesar de mais de 50% das ecorregiões do mundo dependerem do fogo para sua sustentabilidade ecológica, como é o caso das savanas, pastagens, matagal mediterrâneo e floresta de coníferas, há outras altamente sensíveis à ação do fogo, como as florestas tropicais úmidas, subtropicais, altos andinos e andino-patagônicos (Shlisky et al., 2007). As queimadas afetam a estrutura, composição e funcionamento dos ecossistemas florestais acarretando danos à biodiversidade, perdas na atividade econômica e produtiva, além de impacto na infraestrutura rural, conflitos e deslocamento de pessoas, degradação da qualidade do ar e aumento das emissões de gases de efeito estufa (Liu et al., 2010; Liu et al., 2012; GFMC, 2013; Manta and Sanhueza, 2015; Bilbao et al., 2020).

No início do século XXI, as ocorrências das queimadas na América do Sul têm sido associadas principalmente, à mudança do uso do solo, padrões demográficos e políticas públicas que favorecem a expansão agropecuária em detrimento da proteção dos ecossistemas florestais. Além disso, as ocorrências de queimadas podem ser afetadas pelo aquecimento global e eventos climáticos de secas intensas (Chen et al., 2011; GFMC, 2013; Morton et al., 2013; Aragão et al., 2018; Ribeiro et al., 2018). Durante o ano de 2005, a seca intensa afetou principalmente a região sudoeste da Amazônia, enquanto para os anos de 2010 e 2015 condições mais secas se estenderam em toda a região da Amazônica (PANISSET et al., 2017). Essas condições de secas intensas favoreceram o aumento da ocorrência das queimadas na Amazônia Brasileira (Aragão et al., 2018, Ribeiro et al., 2018).

Entre os anos 2001 e 2012, aproximadamente 60% das queimadas da América do Sul ocorreram no Brasil, 10% ocorreram na Bolívia e 9% na Argentina (Chen et al., 2013). De acordo com a *Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra* – ABT (2011), foram detectados, em média anual, 22.000 focos de queimadas na Bolívia, entre os anos 2000 e 2010. Em 2010, mais de 95% das queimadas foram

ilegais, o que mostra a informalidade e a dificuldade do Estado em controlar os proprietários de terras que utilizam o fogo em suas atividades agropecuárias.

No período entre 2003 e 2016, os países da América do Sul com maior média anual de ocorrências de focos de queimadas foram: Brasil (181.764), Argentina (32.558), Bolívia (28.407), Paraguai (18.855) e Venezuela (18.855) (White, 2017). No entanto, em relação à ocorrência de focos de queimadas proporcional à área de cada país, a Bolívia foi o segundo país com maior proporção de ocorrência das queimadas por área, depois do Paraguai, ficando o Brasil, Venezuela e Argentina, em terceiro, quarto e sexto lugar, respectivamente.

Em 2019, apenas a Bolívia e Venezuela tiveram o número de ocorrência de queimadas acima da média do período de 2001 a 2018, tanto em áreas queimadas quanto em número de focos de queimadas (LIZUNDIA-LOIOLA; PETTINARI; CHUVIECO, 2020), o que acarretou grande repercussão nas mídias regional e internacional (Pinna and Da Silva, 2019; GFW, 2020). A área queimada na Bolívia no ano de 2019 foi a maior dos últimos nove anos, com cerca de 64.000 quilômetros quadrados (km²), representando 82% a mais em relação à média anual (35.000 km²) de 2001 a 2008 (FAN, 2019b).

Uma das coberturas florestais da Bolívia mais ameaçadas pelas queimadas recorrentes são as florestas de Chiquitano (florestas tropicais secas com período sazonal de seca prolongada e breve período chuvoso, localizadas no extremo sul da Amazônia), que abriga a maior ecorregião de floresta seca contínua da América do Sul. Em 2019, cerca de 14.000 km² das florestas de Chiquitano foram queimadas, o que equivale a 14% da área desta floresta (Romero-Muñoz et al., 2019; FAN, 2019b).

Ainda, as projeções sobre os riscos de ocorrência de queimadas para região das florestas de Chiquitano, considerando as condições climáticas secas e as políticas agrárias e econômicas que levam à expansão da fronteira agrícola, ampliação da rede de estradas pavimentadas de acordo com as projeções nacionais e as taxas de desmatamentos, estima-se um aumento de até 1,8 vezes de áreas queimadas até 2025, em comparação com as áreas queimadas em 2010 (20.400 km²) (Devisscher et al., 2016).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é analisar a variabilidade anual e interanual dos focos de queimadas para os diferentes Departamentos da Bolívia (organização territorial), no período de 2003 a 2020, a fim de identificar as regiões mais afetadas pelas queimadas. Assim, a contribuição deste estudo reside na regionalização

das análises sobre os focos de queimadas sobre todos os Departamentos da Bolívia. Estas informações regionalizadas são essenciais para melhorar o entendimento da dinâmica das queimadas; no monitoramento das queimadas pelos gestores públicos, além de auxiliá-los na adoção de políticas públicas adequadas em termos de prevenção, redução das emissões e diminuição das queimadas na região.

Dados e Metodologia

Área de estudo

A Bolívia está localizada entre as latitudes 9°38' S e 22°53' S e longitudes 57°26' W e 69°38' W (Fig.1), se organiza territorialmente em nove Departamentos, fazendo divisa com parte de uma das principais regiões de desmatamento e ocorrências de queimadas do Brasil, conhecida como o arco do desmatamento (INPE, 2020).

Na Bolívia, predomina o clima Tropical na região leste, e o clima Temperado e Árido, na região oeste (FINLAYSON; MCMAHON, 2007). A estação chuvosa ocorre entre dezembro e fevereiro, com precipitação média mensal de 100 milímetros (mm) e temperatura média anual de 11°C em terras altas (acima de 3.200 metros acima do nível do mar, oeste) e precipitação de 220 mm e temperatura média anual de 26°C em terras baixas (abaixo de 800 metros acima do nível do mar, leste). Já a estação seca ocorre entre junho e agosto, com precipitação média mensal inferior a 50 mm em todas as regiões e temperatura média anual de 3°C e 22°C em terras altas e terras baixas, respectivamente, sendo um período de maior vulnerabilidade à ocorrência de queimadas, principalmente nos Departamentos de Beni e Santa Cruz devido à ação antrópica (Seiler, 2009 e Tierra, 2019).

Dados dos focos de queimadas

Os dados de focos de queimadas utilizados neste trabalho foram obtidos do sensor MODIS, que opera a bordo do satélite AQUA, com resolução espacial de 1 km x 1 km e resolução temporal diária, para o período de 2003 a 2020. Os dados estão disponíveis na plataforma on-line do Programa Queimadas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (<http://www.inpe.br/queimadas/bdqueimadas/>) (INPE, 2020a).

Análise Estatística

A avaliação do comportamento temporal dos focos de queimadas para o período de 2003 a 2020 foi feita a partir de uma análise exploratória dos dados que inclui o cálculo das médias mensais, sazonal e anual, diagramas de box-plot e análises de frequência. Variações dos focos de queimadas em relação ao comportamento médio anual (anomalia interanual) foram obtidas considerando às variações percentuais anuais do número de focos de queimadas em cada ano em relação à média do período de 2003 a 2020.

Para avaliar a existência de diferenças entre as médias dos focos de queimadas registrados entre os meses do ano, do período de 2003 a 2020, foi realizada a análise de variância (ANOVA) (WILKS, 2006). A estatística F testa a hipótese nula (H_0), de que a média mensal dos focos queimadas é igual entre os meses do ano e a hipótese alternativa (H_1), de que a média mensal dos focos de queimadas é diferente entre os meses do ano, considerando um nível de significância de 5%. O teste ANOVA, também, foi calculado para analisar a variância da ocorrência dos focos de queimadas entre os Departamentos.

A partir do teste de Tukey, foi possível analisar em quais meses as diferenças das ocorrências das queimadas foram significativas no período estudado, para em seguida classificá-los em grupos indicados pelas letras A, B, C e D. Cada grupo representa um mês ou um conjunto de meses nos quais as médias mensais de foco de queimadas diferem significativamente das respectivas médias mensais dos outros grupos.

Por fim, a análise da distribuição espacial da ocorrência das queimadas para os departamentos da Bolívia foi realizada a partir da metodologia de classificação proposta por White (2018), que considera 5 (cinco) classes de frequência de ocorrência de focos de queimadas anual por área (em km^2), ilustradas na Tabela 1. No entanto, antes de aplicar a classificação de White (2018), foi testada a homogeneidade da série de número de focos de queimada sobre a Bolívia durante o período de 2003 a 2020, a partir do teste não paramétrico de Pettitt (PETTITT, 1979). Como resultado, desta análise foi observado um ponto de quebra significativo na série temporal de focos de queimadas ao nível de significância de 5%, no ano de 2010 (Figura 2A). Esta quebra significativa em 2010 justifica a divisão da série temporal em duas séries temporais, uma abrangendo o período 2003–2010 e a outra durante o período 2011–2020. Assim, as frequências de ocorrência de focos de queimadas foram calculadas para os dois períodos distintos, com

a finalidade de identificar o padrão espacial da ocorrência das queimadas em cada período.

Resultados e discussão

Variabilidade interanual dos focos de queimadas

Os números anuais de focos de queimadas na Bolívia durante o período de 2003 a 2020 são apresentados na Figura 2A. Ao longo do período de estudo, foram detectados 683.934 focos de queimadas pelo sensor MODIS/AQUA, com uma média anual de 37.996 focos de queimadas. O valor mínimo foi observado em 2014 (15.891) e o maior valor, em 2010 (83.119). Também em relação à média anual da quantidade dos focos de queimadas para o período de 2003–2020, foram observados aumentos dos focos de queimadas desde 2004 até 2010 (com exceção de 2009), diminuições de 2011 a 2018 e, aumentos em 2019 e 2020.

A série média anual de focos de queimada durante o período de 2003-2020 mostra um ponto de ruptura estatisticamente significativo ($p\text{-value} < 0.05$) em 2010 usando o teste de Pettitt. Assim, o ano de 2010 é assumido como o ano de ruptura e a série é classificada como não homogênea (Figura 2A). O ponto de ruptura obtido para a série média anual de focos de queimada em 2010 justifica sua divisão em duas séries temporais, que abrangem os períodos 2003-2010 e 2011-2020. A maior média anual em torno de 50.695 focos de queimadas durante 2003-2010 representa um aumento de 82% de focos de queimadas no primeiro período em relação ao segundo período (média anual de 27.837).

Variações interanuais são destacadas na Figura 2B, que apresenta com anomalias (em porcentagem) positivas nos anos de 2010 (+119%), 2007 (+64%), 2004 (+60%), 2005 (+40%), 2019 (+17%), 2006 (+16%), 2008 (+9%), e 2020 (+5%) e negativas nos anos de 2014 (-58%), 2013 (-54%), 2015 (-48%), 2012 (-40%), 2009 (-37%), 2018 (-35%), 2017 (-28%), 2011 (-16%), 2016 (-9%) e 2003 (-4%). Os anos foram listados em ordem decrescente das correspondentes magnitudes das anomalias.

Esses resultados são consistentes com o estudo de Heyer et al. (2018), com exceção de 2011, quando eles observaram anomalia positiva. O aumento no número de focos de queimadas na Bolívia é causado, principalmente, pela ação humana e intensificado por

condições de secas intensas associadas às anomalias positivas da temperatura da superfície do mar (TSM) do Pacífico tropical (evento El Niño) e do Atlântico Tropical Norte (ATN) (Bilbao et al., 2020). As anomalias positivas da TSM do ATN e Pacífico tropical estão associadas à uma diminuição na precipitação em diferentes regiões da AS. Panisset et al. (2017) observaram que as anomalias positivas da TSM do ATN causam secas, principalmente sobre a região oeste e sudoeste da bacia Amazônica, enquanto, as variações de TSM no Pacífico tropical, associadas ao El Niño, causam uma diminuição da precipitação, particularmente na região centro e leste da bacia Amazônica.

Dos anos com anomalias positivas ao longo do período de estudo, apenas 2007 e 2008 não estiveram sob a ação de um El Niño (GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2020). Consistente com o estudo de Chen et al. (2011), os resultados aqui apresentados sugerem aumentos das ocorrências de queimadas durante anos de El Niño (2004, 2005 e 2010). Por outro lado, as diminuições dos focos de queimadas ocorreram em anos de atuação do evento de La Nina ou anos neutros, com exceção de 2015 e 2016 que tiveram eventos de El Niño (GOLDEN GATE WEATHER SERVICES, 2020).

O aumento, em torno de 119%, do número de focos de queimada em 2010 foi associado às condições de secas intensas. Segundo Heyer et al. (2018), o ano de 2010 apresentou maior índice de secagem da vegetação nos meses de agosto a outubro e menor valor de umidade relativa (abaixo de 30%) na Bolívia, comparado ao período entre 2001 e 2016. Após 2010, oito anos consecutivos de diminuição de focos de queimadas foram observados na Bolívia, com um ligeiro aumento somente a partir de 2019 (Fig. 2B). De acordo com Bissolli et al. (2020), fatores que podem ter contribuído para o aumento da frequência de queimadas em 2019 incluem: anomalias positivas significativas da temperatura do ar, particularmente no sudeste e leste da Bolívia, durante janeiro, fevereiro, junho e setembro, com máximas temperaturas registradas em janeiro ($1.5^{\circ}\text{C} - 2.5^{\circ}\text{C}$ acima da média) e, na região leste, precipitações abaixo da média climatológica de julho a outubro. Além disso, as queimadas em 2019 podem ter sido agravadas pelas políticas públicas de legalização de queimadas e ampliação da fronteira agropecuária (ROMERO-MUÑOZ et al., 2019).

Os totais anuais do número de focos de queimadas por Departamento são mostrados na Figura 3. De acordo com o teste ANOVA, as médias mensais dos focos de queimadas variaram significativamente entre os Departamentos ($F=49,1$; $p<0,05$). As variações interanuais dos focos de queimadas de cada Departamento são mostradas na Figura 4. Em geral, a variabilidade interanual dos focos de queimadas apresenta

comportamento similar para os Departamentos de Santa Cruz, Beni, Cochabamba, Pando, La Paz, Tarija e Chuquisaca, e distinto dos Departamentos de Oruro e Potosi que é semelhante entre si (Figura 4). Destaca-se que durante os anos de 2003 a 2007 (2013 a 2015), Oruro e Potosi apresentaram variações negativas (positivas) de queimadas, enquanto os outros departamentos, anomalias de sinais inversos. Além disso, os maiores aumentos dos focos de queimadas ocorreram no ano de 2010 em Santa Cruz (+135%), Beni (+120%), Cochabamba (+78%) e La Paz (+76%), em 2020 nos Departamentos de Chuquisaca (+122%) e Potosi (+77%), e em 2003, 2005 e 2008, respectivamente, nos Departamentos de Tarija (+69%), Pando (+124%) e Oruro (+87%). Por outro lado, nos anos de 2012, 2017 e 2018, todos os Departamentos apresentaram variações negativas (abaixo de 18%) de focos de queimadas.

Para o Departamento do Beni, os aumentos do número de focos de queimada em 2005, 2007 e 2010 podem estar associados às anomalias positivas de TSM no Pacífico tropical e ATN, as quais reduziram de forma acentuada a precipitação na região (CHEN et al., 2011). Em 2005, no Departamento do Pando, Fuentes and Selaya (2011) observaram menor precipitação anual, cerca de 1.600 mm, em comparação com a do período de 2006 a 2010, que variou cerca de 1.800 mm a 3.300 mm. Essa condição de seca pode estar associada ao aumento de focos de queimada em 2005.

Comportamentos distintos da variabilidade interanual das ocorrências dos focos de queimadas entre os Departamentos é função da ocupação e uso solo, da localização e de anomalias climáticas. Mendoza et al. (2015), analisando a variabilidade interanual dos focos de queimadas em função do tipo de uso do solo, durante o período de 2010 a 2014, para cinco Departamentos, observaram que as queimadas predominaram em áreas de pastagens (Beni, Santa Cruz e Cochabamba), em relação às áreas agropecuárias (Pando e La Paz). Por outro lado, Seiler et al. (2013) avaliando os impactos dos eventos de ENOS sobre as variações de precipitação, no período de 1960 a 2009, mostraram um impacto significativo na precipitação anual sobre a região de Terras Baixas (região leste da Bolívia), com o aumento significativo de precipitação no período de JJA (DJF) durante anos de El Niño (La Niña) e uma diminuição significativa de precipitação na região dos Andes e Altiplano (região oeste da Bolívia), durante eventos de El Niño. Então infere-se que a variabilidade anual da precipitação associado ao ENOS varia espacialmente e pode favorecer ou reduzir a ocorrência das queimadas em cada Departamento.

Variabilidade mensal e sazonal dos focos de queimadas

Na Figura 5 é mostrado o box-plot mensal de focos de queimadas entre 2003 e 2020 na Bolívia. De acordo com o teste ANOVA, a ocorrência dos focos de queimadas foi diferente entre os meses do ano ($F=29,5$; $p<0,05$). Baseando-se no teste de Tuckey, os meses foram classificados em quatro grupos (A, B, C e D), os meses indicados com letras diferentes são significativamente diferentes entre as médias mensais dos focos de queimadas. Com isso, observa-se um ciclo anual bem definido, com os maiores números de queimadas ocorrendo nos meses de agosto a outubro (compartilham as letras A, B, C), o que indica que são significativamente diferentes dos outros meses. O mês com maior ocorrência de focos de queimadas foi setembro com uma média de 13.591(36%) de focos de queimadas, seguido por agosto 9.865(26%) e outubro 6.711(19%). Os resultados são consistentes com estudos anteriores (Rodríguez-Montellano A.M., 2014; Heyer et al., 2018). A estação das queimadas começa no final do inverno (junho, julho e agosto – JJA) e começo da primavera (setembro, outubro e novembro – SON), com média sazonal de 14.047 (37%) e 22.247 (58,5%) focos de queimadas, respectivamente. O outono (março, abril e maio - MAM) e o verão (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF), são as estações que apresentam as menores frequências de queimadas, com 967 (2,5%) e 736 (1,9%), respectivamente.

Na Bolívia, a época das queimadas coincide com o final da estação seca (JJA) e começo da estação de transição (SON) de seca para a estação chuvosa seguinte (DJF), onde a precipitação diária na estação seca (transição de seca à chuvosa) é inferior a 1 mm (2,5 mm), respectivamente (BLACUTT et al., 2015). Além disso, na estação seca começa a limpeza de áreas agrícolas e pastagens com o uso do fogo, o que contribui para o aumento do número de queimadas nessa época do ano (FUNDACIÓN TIERRA, 2019).

Variabilidade espacial dos focos de queimadas

As Figuras 6A e 6B apresentam, respectivamente, as frequências e densidades de focos de queimadas por Departamento na Bolívia. A maior quantidade de focos de queimadas entre o período de 2003 e 2020, ocorreu nos Departamentos de Santa Cruz e Beni, com uma média anual de 17.280 (45,5%) e 15.067 (39,7%), respectivamente (Fig. 6A). Estes dois Departamentos totalizaram 85,1% dos focos de queimadas na Bolívia, seguidos pelos Departamentos de La Paz (5,2%), Cochabamba (3,5%), Pando (3,2%),

Chuquisaca (1,5%), Tarija (1,2%), Oruro (0,2%) e Potosi (0,1%) (Fig 6A). Considerando a área territorial de cada Departamento, Beni foi o Departamento com maior densidade de focos de queimadas por unidade de área (km²), seguido por Santa Cruz e Cochabamba (Fig. 6B).

A Figura 7 e Tabela 2, apresentam a classificação da frequência dos focos de queimadas por Departamento seguindo a metodologia proposta por White (2018). Ao longo do período de estudo, na classificação com a frequência “Muito alta” de focos de queimadas, o Departamento do Beni ocupou a primeira posição, seguido de Santa Cruz, e na classificação com a frequência “Muito baixa”, o Departamento de Potosi ocupou a última posição (Tabela 2).

Ao analisar a série de dados em dois períodos distintos é possível notar que nos primeiros nove anos da série temporal (2003–2010), observou-se uma maior frequência de ocorrência dos focos de queimadas em sete Departamentos, os quais foram classificados como “Muito alta”, sendo eles: Beni, Santa Cruz, Cochabamba, La Paz, Pando, Chuquisaca e Tarija. Os Departamentos Oruro e Potosi foram classificados com frequência “Muito baixa” (Fig. 7A). Por outro lado, para o período de 2011–2020, apenas quatro Departamentos apresentaram frequência “Muito alta”, sendo Beni, Santa Cruz, Cochabamba e Pando. Três Departamentos passaram a ser classificados com frequência “Alta”, sendo La Paz, Tarija e Chuquisaca, e os Departamentos de Oruro e Potosi permaneceram com frequência “Muito baixa” (Fig. 7B).

A redução das queimadas a partir de 2011, pode ser atribuída em parte às mudanças na obtenção das licenças de queimadas e desmatamentos, que têm sido mais restritivas e ao temor dos proprietários às sanções, que tinham sido aplicadas de forma mais estrita desde 2011 às atividades de queimada e desmatamento ilegal (DEVISSCHER; MALHI; BOYD, 2018). Ainda, nos relatórios anuais da Autoridade responsável pelo monitoramento das queimadas, desde 2010 as inspeções de controle de queimadas ilegais foram sendo intensificadas passando de 75 inspeções em 2010 para 748 em 2020 (ABT, 2020).

Neste contexto, Mendoza et al. (2015) argumentaram que a redução das queimadas após 2010, também pode ser atribuída ao programa “*Amazonía Sin Fuego*”, executado no período 2011–2015 pelo governo nacional com apoio do *Banco de Desarrollo de América Latina* (CAF) e os governos do Brasil e Itália. O programa foi criado tendo como referência o fato de que o ano de 2010 apresentou o recorde histórico de queimadas, e teve como foco realizar campanhas de conscientização e promoção de

alternativas para o uso do fogo em 48 municípios localizados nos Departamentos de Beni, Cochabamba, La Paz, Pando e Santa Cruz. Esses autores observaram diminuições significativas dos focos de queimadas de 81% até 2014 em relação ao ano de 2010, e sugeriram que as ações preventivas e de informação aos agropecuários tiveram efeito positivo na diminuição ocorrência das queimadas na região.

Na Bolívia, os desmatamentos têm um papel fundamental no aumento de queimadas na região. Existe uma tendência crescente de desmatamento, sendo que no período de 2012 a 2017, foram detectadas 21% a mais do que a média anual do período de 2001 a 2011 (1.818,64 km²). O aumento dos desmatamentos de acordo com a *Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra*, é atribuído às políticas públicas do governo nacional que visam a expansão da área produtiva. Enquanto isso, 57% dos desmatamentos foram ilegais no período de 2016 a 2017 e a região leste do país apresentou maior área desmatada, com o Departamento de Santa Cruz totalizando 81% dos desmatamentos nesse período (ABT, 2018).

Heyer et al. (2018) mostraram que durante o período de 2001 a 2015, a perda de cobertura florestal pelo desmatamento na região leste da Bolívia teve relação espacial com as queimadas ocorridas nesse período. Além disso, a região leste está pressionada pelos novos assentamentos de comunidades campesinas autorizadas pelo Instituto Nacional de Reforma Agrária (INRA) e assentamentos ilegais, que utilizam o fogo como prática de manejo de pastagens (FUNDACIÓN TIERRA, 2019).

A redução dos desmatamentos é fundamental para a diminuição das queimadas. Brando et al. (2020) mostraram através de simulações numéricas para a região meridional da Amazônia brasileira, que prevenções de novos desmatamentos podem reduzir em até 50% as emissões líquidas decorrentes das queimadas e, conseqüentemente, ajudar a impedir que as queimadas atinjam as florestas. O desmatamento, além de ser uma fonte de ignição de queimadas, aumenta a inflamabilidade das florestas remanescentes elevando as temperaturas nas bordas, reduzindo a precipitação local (BARLOW et al., 2019).

Além da influência dos desmatamentos, da expansão agropecuária e das condições climáticas de secas intensas no aumento das queimadas nos últimos anos, as políticas públicas também podem ter influenciado na ocorrência das queimadas nos Departamentos da Bolívia (Redo et al., 2011; Romero-Muñoz et al., 2019; Tierra, 2019). Na Tabela 3 apresentam-se as Leis florestais e agrárias que foram aprovadas nas últimas duas décadas. O governo da Bolívia fez diversas mudanças regulatórias para

promover a expansão agropecuária e a migração de populações, por meio de projetos de assentamentos (Correo del Sur, 2019; GFW, 2020; Guardiania, 2020).

Em um estudo de Redo et al. (2011) para a região leste da Bolívia, foi possível verificar que a partir das políticas de expropriação e redistribuição de terras, em descumprimento da função econômica social da Reforma Agrária de 2006 (Lei N° 3545), houve uma aceleração do desmatamento pela agricultura comercial, ao longo do Corredor Bioceânico (maior e mais importante região agrícola), o qual produziu um aumento das queimadas na região leste da Bolívia.

A partir de 2015, o desmatamento aumentou 200% em relação ao período anterior, devido à Lei N°337 (Lei de regularização de desmatamento ilegais, aprovada em 2013) (ABT, 2019b). Além disso, a aprovação da Lei N° 1171 em 2019, sobre uso e manejo de queimadas, pode ter influenciado no aumento das queimadas nos últimos dois anos da série temporal estudada (2019 e 2020), consistente com os resultados encontrados por Romero-Muñoz et al. (2019) e Fundación Solón (2020).

Em 2019, diversas organizações não governamentais, organizações indígenas e organização da sociedade civil manifestaram-se através de vários pronunciamentos públicos contra a uma série de Leis florestais e agrárias, que permitiu a regularização das queimadas ilegais e fomento à expansão da fronteira agropecuária (*Centro de Estudios Jurídicos e Investigación* - CEJIS, 2019; Colectivo Árbol, 2019; Correo del Sur, 2019; Guardiania, 2020; Fundación Solón, 2020).

Além disso, em dezembro de 2019, o Tribunal Internacional dos direitos da Natureza, o qual surgiu a partir da Declaração Universal dos Direitos da Mãe Terra, aprovada na Conferência Mundial dos Povos sobre Mudança do Clima e os Direitos da Mãe Terra, com a participação de 142 países, reunida na Bolívia em abril de 2010, atendeu a uma denúncia apresentada por representantes de povos indígenas, comunidades camponesas e sociedade civil da Bolívia, por ações que poderiam ter constituído o crime de ecocídio na Chiquitânia, Chaco e Amazônia, os quais afetaram os animais, as florestas e os seres humanos, causada pelas queimadas de 2019. Em agosto de 2020, o veredito do Tribunal resolve as ações como ecocídio, provocado pelas políticas do Estado e do agronegócio. Como consequência, recomendou-se revogar 14 regulamentos que foram emitidos desde 2013 (Tabela 2), os quais promoveram o aumento das ocorrências de queimadas na região (International Rights of Nature Tribunal, 2020; Guardiania, 2020; Tierra, 2020).

Em 2020, foi declarada emergência nacional, devido às queimadas que novamente afetaram o país e o governo revogou o Decreto Supremo N° 3973. No entanto, é possível que a ação não tenha sido efetiva para reduzir as ocorrências de queimadas (GUARDIANA, 2020), já que no mês de outubro de 2020 foi observado um aumento de 127 % nas queimadas, em relação a outubro de 2019 (INPE, 2020b). Então, a política pode não estar tendo o resultado desejado e mostra que o Estado tem controle limitado sobre as atividades de desmatamento e queimadas dos proprietários de terras (REDO; MILLINGTON; HINDERY, 2011).

Em vista das projeções futuras que indicam uma mudança do regime global de queimadas impulsionado pela mudança climática no século XXI (PECHONY; SHINDELL, 2010), uma melhor compreensão dos riscos futuros pode ajudar a melhorar a capacidade para prevenir as queimadas (BRANDO et al., 2020b).

Devisscher et al. (2016b) mostra que a redução dos riscos de queimadas na Bolívia foi melhor num cenário de gestão das queimadas do que num cenário de supressão das queimadas, a supressão das queimadas exigia mais investimento em transferência de tecnologia e implementação do que no cenário de gerenciamento das queimadas.

Por tanto é essencial que os governos possam adotar políticas públicas integrais, considerando as mudanças climáticas, com um enfoque para reduzir as queimadas, mas também incentivar as pesquisas científicas para o conhecimento sobre a ecologia dos ecossistemas naturais, saber quando e onde o fogo pode ser tolerável ou necessário para manter os ecossistemas que dependem do fogo, bancos de dados de queimadas, incorporação de medidas de adaptação que considerem a ameaça dos eventos de secas intensas, os interesses das comunidades locais, seus conhecimentos e práticas tradicionais de uso do fogo (Devisscher et al., 2018; Bilbao et al., 2020).

Conclusões

A análise temporal dos focos de queimadas revela a presença de uma variabilidade interanual, mensal e sazonal das ocorrências das queimadas na Bolívia. Essa variabilidade é atribuível às ações antropogênicas, que vão desde práticas agropecuárias, sendo elas as principais fontes de ignição, a políticas públicas, e são intensificados pelos eventos climáticos de secas intensas na região.

A estação do fogo começa no final do inverno e início da primavera, que coincide com a estação seca e de transição de seca para chuvosa, cobrindo os meses de agosto a outubro, com maior número de queimadas ocorrendo em setembro. A região leste da Bolívia concentrou a maior frequência de ocorrência de focos de queimadas.

Considerando a área de cada Departamento, para o período de 2003 a 2020, Beni apresentou a maior densidade de focos de queimadas, seguido pelo Departamento de Santa Cruz. Estes dois Departamentos representaram 85,1% dos focos de queimadas na Bolívia. Esse fato pode ser decorrente do impacto, por atividades agropecuárias que foram beneficiados com as novas políticas públicas que visaram a expansão das atividades agropecuárias no país, como fomento à criação extensiva de gado (entre 5 e 15 ha por cabeça de gado), expansão agrícola, principalmente da produção da soja, 85% destinada para a exportação (ABT, 2011), além da regularização das queimadas e desmatamentos ilegais a partir de 2013 (CORREO DEL SUR, 2019).

Análises dos períodos de 2003–2011 e 2012–2020 mostram que sete dos nove Departamentos apresentaram uma frequência de ocorrência de queimadas muito alta no primeiro período, enquanto no segundo período somente 4 Departamentos apresentaram uma frequência muito alta. Assim, os resultados indicam uma redução significativa do número de focos de queimadas somente nos Departamentos de La Paz, Chuquisaca e Tarija, enquanto para outros Departamentos a classificação de frequência de ocorrência de focos de queimada permaneceu a mesma.

Assim, ações que fortalecem a instituição encarregada de monitoramento com foco nas prevenções das queimadas continuam necessárias, a fim de reduzir a taxa de queimadas ilegais. Ações como o Programa “Amazonía sin Fuego”, que com duração apenas de cinco anos teve resultados satisfatórios, a capacitação para criação de gados sem fogo, a criação alternativa para agricultura tradicional que usa o fogo com incentivos e créditos, a criação de canais efetivos de colaboração entre pesquisadores e gestores públicos, podem fornecer estratégias para o gerenciamento das queimadas e melhor compreensão dos riscos futuros de queimadas que podem ser agravadas durante eventos de secas intensas na região.

Tabela 1. Classificação da frequência de ocorrência dos focos de queimadas de acordo com White (2018).

Ocorrência	Número dos Focos de queimadas por Ano
Muito Baixa	Nenhum ou um foco de queimada para uma área de 601 km ² ou mais.
Baixa	Um foco de queimada para uma área entre 301–600 km ²
Média	Um foco de queimada para uma área entre 151–300 km ²
Alta	Um foco de queimada para uma área entre 76–150 km ²
Muito Alta	Um foco de queimada para uma área de 75 km ² ou menos.

Fonte: (WHITE, 2018)

Tabela 2. Lista dos Departamentos da Bolívia e suas áreas; números de focos de queimadas detectados (FQ); média anual de FQ; área pela média anual de FQ (densidade de FQ); classificação da frequência de focos de queimadas de acordo com White (2018). Os departamentos estão em ordem decrescente em relação à densidade FQ.

Posição	Departamento	Área dos Departamentos (km ²)	Período de 2003–2010			Período de 2011–2020		
			Média anual ^a FQ	Densidade (km ² /FQ)	Frequência de FQ	Média anual ^a FQ	Densidade de FQ (km ² /FQ)	Frequência de FQ
1	Beni	213,564	19,523	11	Muito Alta	11,502	19	Muito Alta
2	Santa Cruz	370,621	23,880	16	Muito Alta	12,000	31	Muito Alta
3	Cochabamba	55,631	1,736	32	Muito Alta	979	57	Muito Alta
4	Pando	63,827	1,692	38	Muito Alta	846	75	Muito Alta
5	La Paz	133,985	2,341	57	Muito Alta	1,665	80	Alta
6	Tarija	37,623	609	62	Muito Alta	316	119	Alta
7	Chuquisaca	51,524	795	65	Muito Alta	407	127	Alta
8	Oruro	53,588	71	755	Muito Baixa	64	843	Muito Baixa
9	Potosi	118,218	50	2,370	Muito Baixa	60	1,987	Muito Baixa

^a Média anual entre 2003–2010 e 2011–2020 (Fonte: INPE, 2020).

Tabela 3. Reformas de políticas agrárias, florestais e de queimadas (2006–2020) na Bolívia. Adaptado de Redo et al. (2011); International Rights of Nature Tribunal (2020); Correo del Sur (2019).

Ano	Reformas	Finalidades
2006	Lei N° 3.545	Lei de recondução de reforma agrícola concede ao Estado o direito de expropriar e redistribuir terras em não cumprimento da função socioeconômica.
2013	Lei N° 337	Isentos de penalidades para quem desmatou, queimou sem autorização em áreas florestais entre 1996 e 2011.
2014	Lei N° 502	Extensões dos termos e modificações da Lei N° 337.
2015	Lei N° 739	Extensões dos termos e modificações da Lei N° 337.
2015	Lei N° 741	Permite desmatamentos e queimadas em áreas de Terras de Produção Florestal Permanente (TPFP), infringindo os artigos 380, 386 e 387 da Constituição Política do Estado.
2017	Lei N° 952	Extensões dos termos e modificações da Lei N° 337.
2018	Lei N° 1098	Produção de Aditivos de origem vegetal.
2018	D.S. 3467 ^a	Distribuição de terras públicas como unidades coletivas.

2019	Lei nº 1171	Uso e manejo racional de queimadas, que inclui regularização de queimadas não autorizadas.
2019	D.S. 3874 ^a	Procedimentos abreviados para avaliação modificação genética da soja nos evento Soja HB4 e evento Soja Intacta.
2019	D.S. 3973 ^a (Revogado em Setembro de 2020)	Expande desmatamentos em Terras Florestais do departamento de Beni e Santa Cruz.
2019	Lei Departamental N°93 (Beni)	Aprovação do Plano de Uso do Solo, onde não foi submetido a processo de Consulta e Consentimento Prévio, Livre e Informado. Modifica a classificação das florestas, transformando esses espaços em solos para uso agrícola extensivo.
2020	D.S. 4232 ^a	Estabelecer procedimentos para modificação genética não só da soja, mas também do milho, cana-de-açúcar, algodão e trigo.
2020	D.S. 4238 ^a	
2020	R.A. 084/2020 ^a SENASAG	Aprova requisitos fitossanitários para importação de Eucalyptus spp. a ser implementado em plantações florestais.

^a Os significados das siglas: D.S. (Decreto Supremo), R.A. (Resolução Administrativa)

Lista de figuras

Fig. 1 Localização da Bolívia na América do Sul, com seus nove Departamentos. Fonte da imagem satelital: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community (http://goto.arcgisonline.com/maps/World_Imagery)

Fig. 2 Focos de queimada na Bolívia: (A) Série temporal do total anual e (B) anomalia (%) em relação à média total no período de 2003–2020. As linhas de estilo travessões horizontais em A vermelho(laranja) indica o valor médio do período de 2003–2010 (2011–2020), respectivamente. A linha preta pontilhada vertical em A indica o ponto de mudança da série temporal baseado no teste do Pettitt ao nível de 5% de confiança

Fig. 3 Série temporal do total anual de focos de queimadas por Departamento da Bolívia entre 2003 e 2020. A linha horizontal em cada gráfico indica o valor médio.

Fig. 4 Série temporal das anomalias anuais de focos de queimadas por Departamento da Bolívia entre 2003 e 2020

Fig. 5 Boxplot mensal do número de focos de queimadas na Bolívia no período 2003–2020. As letras A, B, C e D indicam os grupos com diferenças significativas. Os meses não agrupados com a mesma letra são significativamente diferentes com base no teste de Tukey.

Fig.6 (A) Frequência (%) e (B) densidade de focos de queimadas por Departamento da Bolívia, para o período de 2003 a 2020. Os Departamentos são representados por siglas: BN (Beni), SC (Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).

Fig. 7 Categorização dos Departamentos da Bolívia de acordo com a classificação proposta White (2018), baseada na média anual correspondente aos períodos: (A) 2003–2010 e (B) 2011–2020. Os Departamentos são representados por siglas: BN (Beni), SC (Santa Cruz), CB (Cochabamba), PD (Pando), LP (La Paz), TJ (Tarija), CH (Chuquisaca), OR (Oruro) e PT (Potosi).

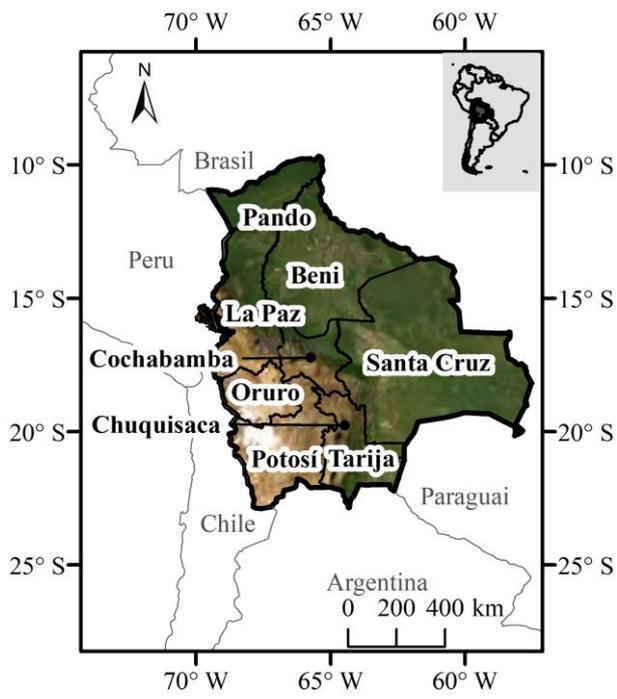


Fig. 1

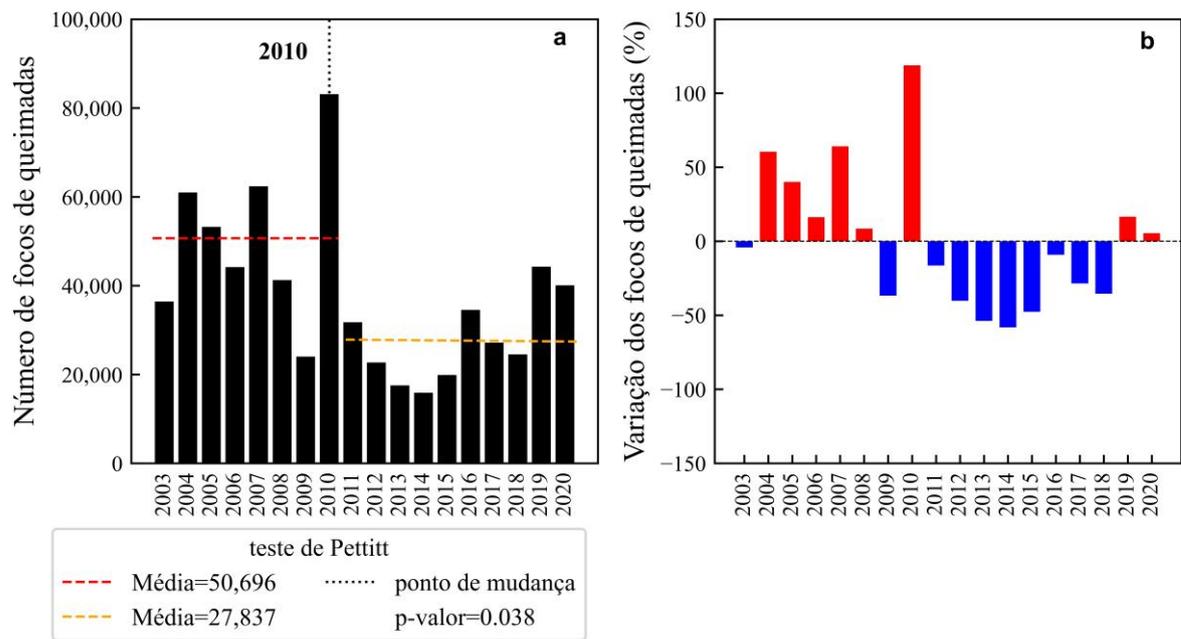


Fig. 2

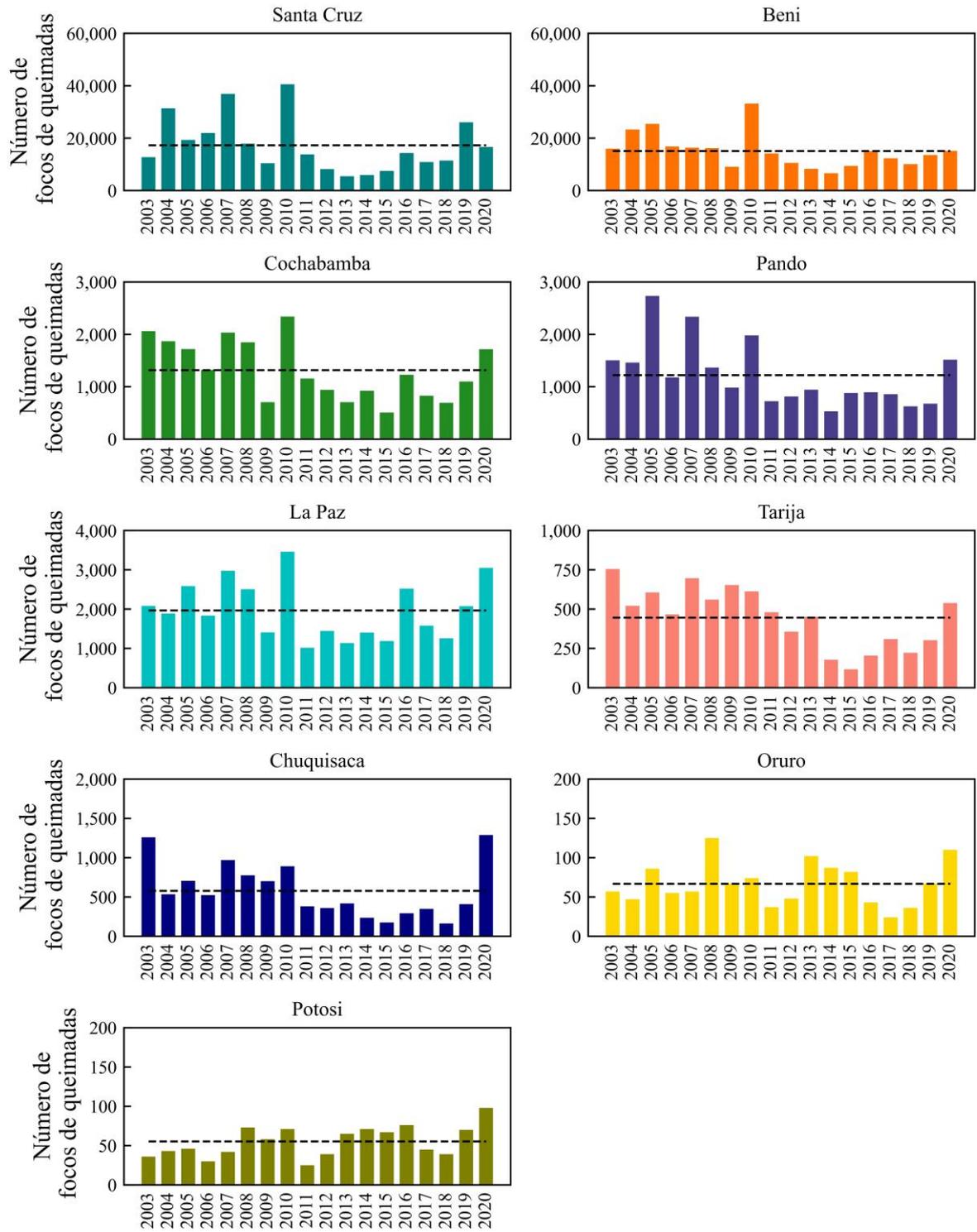


Fig. 3

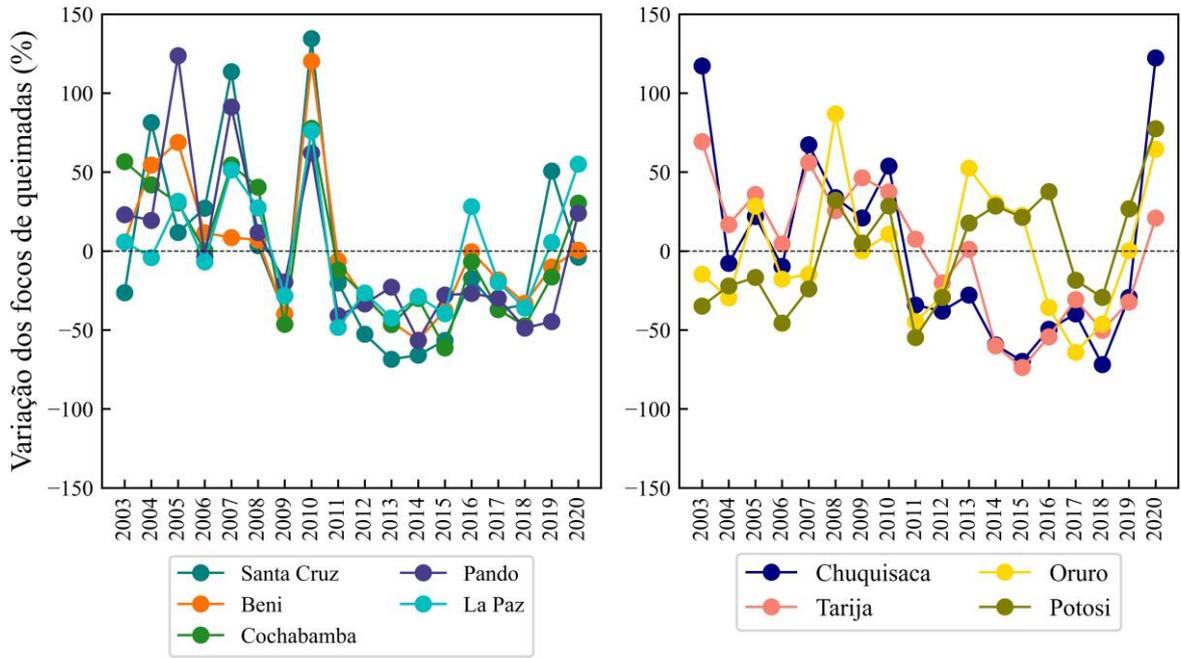


Fig. 4

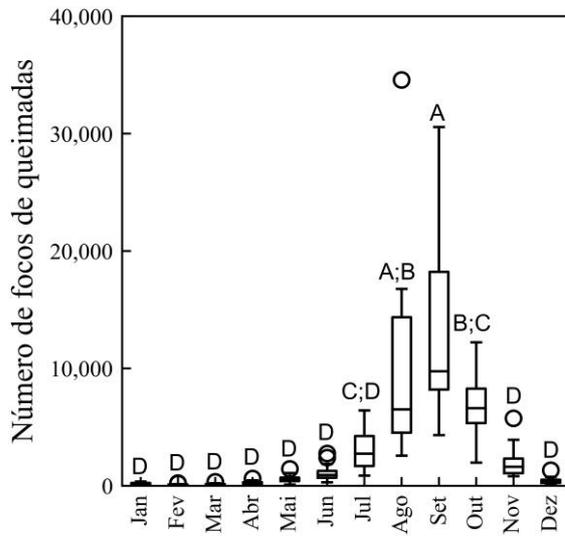


Fig. 5.

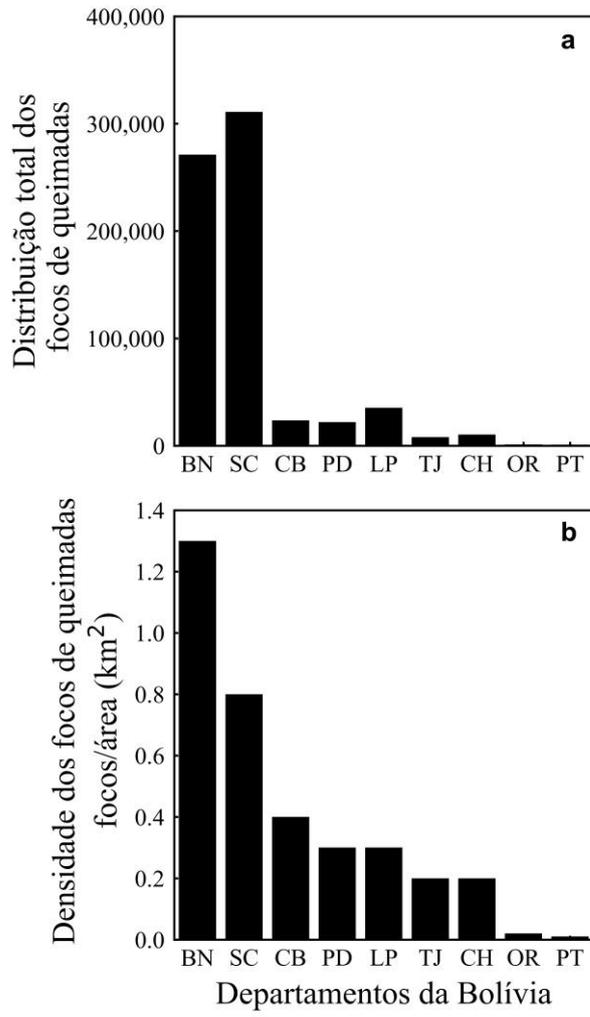


Fig.6

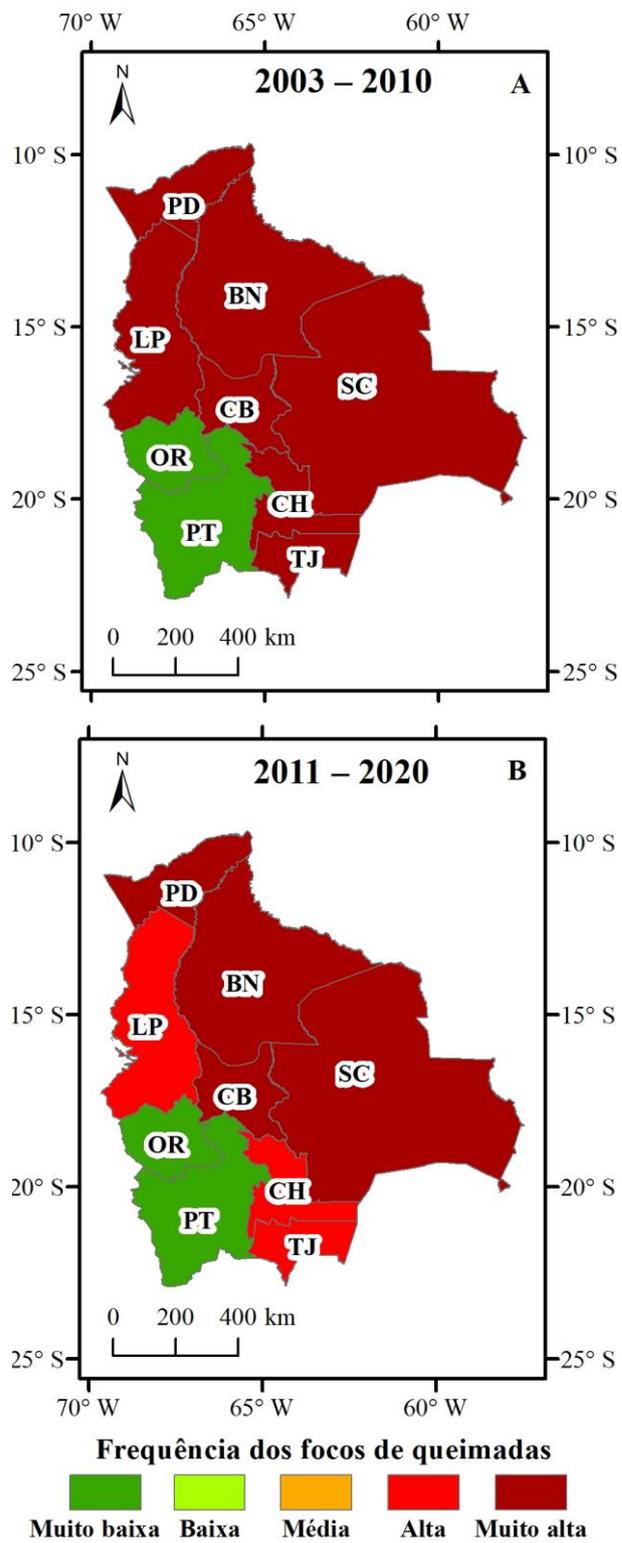


Fig. 7

8. SÍNTESE

O presente estudo faz a contribuição no conhecimento da dinâmica dos focos de queimadas na região central da América do Sul. Os dados de focos de queimadas foram utilizados do satélite AQUA, os dados de precipitação anual do TRMM e os dados de desmatamento anual do PRODES do Brasil e ABT da Bolívia. Inicialmente analisou-se a variabilidade temporal interanual e mensal dos focos de queimadas na área de estudo, que envolve a Bolívia e os Estados brasileiros do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia no período de 2003 a 2020. Além disso, analisou-se a classificação da frequência dos focos de queimadas baseados na metodologia do (WHITE, 2018), a tendência temporal dos focos de queimadas por Município, a influência da variabilidade da precipitação e desmatamento na ocorrência dos focos de queimadas e, por fim, estudou-se as anomalias espaciais dos focos de queimadas e sua relação com as anomalias da precipitação durante os anos de secas intensas de 2005, 2007, 2010, 2015, 2019 e 2020.

No capítulo 1, iniciou-se com a apresentação dos resultados da variabilidade temporal dos focos de queimadas, observou-se que a região estudada contribuiu com 28% dos focos de queimadas na América do Sul durante o período de 2003 a 2020. Na Bolívia e nos Estados brasileiros observou-se uma variabilidade interanual heterogênea dos focos de queimadas, em que as maiores variações notaram-se nos Estados de Rondônia e Mato Grosso, com coeficientes de variação de 72% e 60%, respectivamente. Menores valores de variação nos Estados do Amazonas, Acre e Bolívia, com 29%, 43% e 47%, respectivamente. Além disso, notou-se um comportamento similar na variabilidade interanual dos focos de queimadas entre os Estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso e Bolívia e uma relação significativa entre Acre e Amazonas.

Após, avaliou-se as anomalias interanuais dos focos de queimadas, observou-se anomalias positivas em todos os locais da área de estudo nos anos 2005, 2007, 2010, com algumas exceções nos anos 2004 (exceto no Amazonas), 2006 (exceto no Acre) e 2020 (exceto em Rondônia) e as anomalias negativas coincidiram em 2009 e de 2011 a 2014. Também, estudou-se as ocorrências interanuais dos focos de queimadas dos Estado do Amazonas, Rondônia, Mato Grosso e Acre, em que observou-se uma tendência positiva significativa nos Estado do Amazonas e Acre, e uma tendência negativa não significativa dos focos de queimadas nos Estados de Rondônia e Mato Grosso. Isso mostra a necessidade de ações de prevenção dos focos de queimadas

ilegais com maior atenção nos Estados do Amazonas e Acre, assim como a atenção na redução das queimadas associadas aos desmatamentos, já que os dados do PRODES mostraram um aumento dos focos de queimadas nos últimos anos.

O ciclo anual dos focos de queimadas, apresentou uma época de queimadas concentrados entre os meses de julho e outubro, sendo setembro o mês com maiores ocorrências de focos de queimadas nos Estados de Rondônia, Mato Grosso, Acre e Bolívia e agosto no Estado do Amazonas. A época de queimadas coincide com o final da estação seca e começo da estação chuvosa, não tendo uma relação direta entre o mês com maiores focos de queimadas e o meses mais secos (entre junho e agosto) da Amazônia (PINTO et al., 2009).

No estudo da distribuição espacial das ocorrências dos focos de queimadas, notou-se no Estado de Rondônia a maior densidade de focos de queimadas por área em km^2 , seguido do Estado do Mato Grosso, Acre, da Bolívia e do Estado do Amazonas. Além disso, a análise da distribuição espacial baseado na densidade de Kernel, observou-se as maiores ocorrências na região leste da Bolívia e Acre, no norte do Estado de Rondônia, Sul do Amazonas e parte da região sudoeste, nordeste e centro-norte do Estado do Mato Grosso. As distribuições espaciais dos focos de queimadas coincidem com as áreas de uso do solo de agropecuárias principalmente de pastagens.

A avaliação das tendências baseada no teste de Mann-Kendall por Municípios, em geral, notou-se tendências positivas significativas nos Municípios de Humaitá, Novo Aripuanã e Tapauã no Estado do Amazonas, no Município do Manoel Urbano do Estado do Acre. Na Bolívia, nos Municípios do Anzaldo, Ravelo, Sica Sica, Tacopaya e Tapacarí, localizados na região oeste do país, contrastando com os Municípios localizados na região leste que apresentam maiores números de ocorrências de focos de queimadas, no entanto, apresentaram em geral tendências negativas e somente três Municípios com tendências positivas não significativas.

Na relação da influência da precipitação e desmatamento na ocorrência dos focos de queimadas, observou-se que a variabilidade da precipitação anual explica significativamente a ocorrência dos focos de queimadas no Estado do Acre ($R^2=41\%$) e Bolívia ($R^2=44\%$) e o desmatamento anual explica significativamente a ocorrência dos focos de queimadas nos Estados de Mato Grosso ($R^2=61\%$), Rondônia ($R^2=80\%$) e Acre ($R^2=30\%$).

As anomalias espaciais dos focos de queimadas e precipitação anual durante os episódios de seca de 2005, 2007, 2010, 2015, 2019 e 2020. Em geral observou-se em

2005, relações negativas entre o aumento dos focos de queimadas com $+4\sigma$ e redução da precipitação anual inferiores a 900 mm na região leste da Bolívia e Acre, Sul do Amazonas e noroeste do Mato Grosso. Em 2007, a maior relação espacial das anomalias positivas dos focos de queimadas com $+3,8\sigma$ ocorreu no Estado do Mato Grosso e as anomalias negativas da precipitação cerca de 600 mm. Em 2010, a maior relação negativa das anomalias positivas de focos de queimadas com $+4\sigma$ e redução da precipitação entre 300 mm e 600 mm, notou-se na região leste e nordeste da Bolívia e sul do Mato Grosso. Em 2015, observou-se menor anomalia positiva com $+3,5\sigma$ de focos de queimadas comparado aos outros anos, concentrado no Estado do Amazonas e com reduções de precipitação anual inferior a 900 mm. Em 2019 e 2020, observaram-se uma distribuição generalizada das anomalias espaciais com $+4\sigma$ dos focos de queimadas em toda a área de estudo comparado a uma menor distribuição espacial nos anos anteriores. No sudeste na Bolívia em 2019 notou-se claramente uma relação negativa entre a maior anomalia de queimadas e redução da precipitação inferior a 900 mm.

No capítulo 2, apresentou-se um estudo específico da variabilidade temporal e espacial dos focos queimadas por Departamento da Bolívia. Revela-se a presença de uma variabilidade interanual, mensal e sazonal das ocorrências das queimadas. Os Departamentos Santa Cruz e Beni concentraram 85,1 % dos focos de queimadas na Bolívia. Baseados no teste de Pettitt, observou-se a quebra da série temporal em 2010, com isso, fez-se a classificação da frequência dos focos de queimadas nas duas séries temporais de 2003–2011 e 2012–2020, em que a maior média anual foi observada no primeiro período da série temporal com 50.695 focos de queimadas, o que representa 82% de focos de queimadas a mais em relação ao segundo período (média anual de 27.837).

Este estudo permitiu compreender a dinâmica das ocorrências dos focos de queimadas na região central da América do Sul e sua relação com a variabilidade da precipitação e desmatamento, assim como as tendências dos focos de queimadas a nível Municipal, o que pode contribuir na gestão das queimadas pelos governos Municipais para a prevenção e redução destas.

Para trabalhos futuros, sugerem-se para Bolívia a avaliação das queimadas por tipo de cobertura e uso do solo. De forma geral, recomenda-se avaliar a relação espacial por grade de célula dos focos de queimadas, precipitação e desmatamento. Ademais, uma avaliação da regressão com modelos não lineares entre focos de queimadas e precipitação, principalmente para os Estados de Mato Grosso e Rondônia que

apresentaram valores de relação muito baixa, onde os valores extremos em alguns anos de focos de queimadas podem ter interferido nas análises da regressão. Também, é importante realizar uma avaliação de tendências pixel a pixel para detecção dos locais específicos onde podem ser potenciais no aumento de queimadas e dessa forma os gestores públicos tenham o conhecimento para a prevenção e controle das atividades de queimadas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABT. **Informe anual 2010 y Balance de la Década**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <www.abt.gob.bo>.

ABT. **Deforestación en el Estado Plurinacional de Bolivia periodo 2016–2017**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <www.abt.gob.bo>.

ABT. **ABT suspende temporalmente las autorizaciones de quema en Santa Cruz y Beni**. Disponível em:

<http://abt.gob.bo/index.php?option=com_content&view=article&id=1483:abt-suspende-temporalmente-las-autorizaciones-de-quema-en-santa-cruz-y-beni-2&catid=8:noticias&Itemid=211&lang=es>. Acesso em: 7 maio. 2020a.

ABT. **Desarrollo Integral de bosques y tierras**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.abt.gob.bo/images/stories/Noticias/2019/abril/informe-audiencia-inicial.pdf>>.

ABT. **Informes anuales**. Disponível em:

<http://abt.gob.bo/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=27&Itemid=162&lang=en>.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil.

Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, N. D. O. et al. Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Nature**, p. 1–13, 2017.

ANDERSON, L. O. et al. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts.

Phil. Trans. R. Soc. B. Sci., v. 373, n. 1760, 2018.

ANDRADE FILHO, V. et al. Distribuição espacial de queimadas e mortalidade em idosos em região da Amazônia Brasileira, 2001 – 2012. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, p. 245–253, 2015.

ANDRADE, R. G. et al. **Análise das áreas queimadas no Estado do Acre nos anos**

de 2010 e 2011. Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE. **Anais...**Foz do Iguaçu, PR, Brasil: INPE, 2013

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018.

ARAUJO, R.; PONTE, M. Efeitos do desmatamento em larga-escala na hidrologia da bacia do Uraim, Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, p. 1275–1291, 2011.

ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde TT - Biomass burning and its effects on health. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2, p. 158–175, 2004.

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO; LEGISLATIVO. **Lei Complementar nº 873, de 12 de maio de 2016.** Disponível em: <<https://sapl.al.ro.leg.br/norma/7496>>. Acesso em: 16 out. 2021.

ASSIS, L. F. et al. TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 11, p. 513, 2019.

BARBOSA, M. L. et al. Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, p. 2707–2720, 2019.

BARLOW, J. et al. Clarifying Amazonia ’ s burning crisis. **Global Change Biology**, v. 26, p. 319–321, 2019.

BATISTA, A. C. Detecção De Incêndios Florestais Por Satélites. **Floresta**, v. 34, n. 2, p. 237–241, 2004.

BILBAO, B. et al. **En: Adaptacion frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos - Informe RIOCCADAPT [Moreno, J.M., C. Laguna-Defior, V. Barros, E. Calvo Buendía, J.A. Marengo y U. Oswald Spring (eds.)].Cuadernos de geografía.** Madrid, España: [s.n.].

BISSOLLI, P. et al. Regional Climates State of the Climate in 2019. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 101, n. 8, p. S321–S420, 2020.

BLACUTT, L. A. et al. Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and Combined Scheme datasets in Bolivia. **Atmospheric Research**, v. 163, p. 117–131, 2015.

BOLIVIA. **Ley N° 337** Asamblea Legislativa Plurinacional, , 2013. Disponível em: <<http://www.gacetaoficialdebolivia.gob.bo/normas/>>

BRADLEY, A. V.; MILLINGTON, A. C. Spatial and temporal scale issues in determining biomass burning regimes in Bolivia and Peru. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 11, p. 2221–2253, 2006.

BRANDO, P. et al. Amazon wildfires: Scenes from a foreseeable disaster. **Flora**, v. 268, n. 151609, 2020a.

BRANDO, P. M. et al. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought – fire interactions. **PNAS**, p. 1–6, 2014.

BRANDO, P. M. et al. The gathering firestorm in southern Amazonia. **Science Advances**, n. January, p. 1–10, 2020b.

BROWN, F. et al. Monitoring Fires in Southwestern Amazonia Rain Forests. **EOS. Trans. Am. Geophys. Union**, v. 87, n. 26, p. 2005–2007, 2006.

CANO-CRESPO, A. et al. Forest edge burning in the Brazilian Amazon promoted by escaping fires from managed pastures. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 120, n. 10, p. 2095–2107, 2015.

CARDOZO, S. et al. Avaliação das áreas queimadas no Estado de Rondônia - Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, p. 705–716, 2014.

CAÚLA, R. H. et al. Overview of fire foci causes and locations in Brazil based on meteorological satellite data from 1998 to 2011. **Environ Earth Sci**, p. 1–12, 2015.

CEJIS. **Deforestación e incendios forestales en Bolivia y derechos humanos y de pueblos indígenas**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.cejis.org/>>.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - CPTEC. **Monitoramento Brasil**. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

CHEN, Y. et al. Forecasting Fire Season Severity in South America Using Sea Surface Temperature Anomalies. **Science**, v. 334, p. 787–792, 2011.

CHEN, Y. et al. Long-term trends and interannual variability of forest, savanna and agricultural fires in South America. **Carbon Management**, v. 4, n. 6, p. 617–638, 2013.

CLIMATEENGINE. **CHIRPS precipitation**. Disponível em: <<https://app.climateengine.org/>>. Acesso em: 19 set. 2021.

COLECTIVO ÁRBOL. **Listado de Pronunciamientos Públicos sobre los Incendios Forestales**. Disponível em: <<https://colectivoarbol.org/2019/09/17/listado-de-pronunciamientos-publicos-sobre-los-incendios-forestales/>>.

CORREO DEL SUR. **Al menos una decena de normas atentan contra la Madre Tierra**. Disponível em: <<https://correodelsur.com/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

DA SILVA JÚNIOR, L. A. S. et al. Fire dynamics in extreme climatic events in western amazon. **Environmental Development**, v. 32, n. December 2018, p. 100450, 2019.

DA SILVA, M. C.; ROMEU, L.; FIGUEIREDO, S. M. **Análise temporal de focos de calor no Acre: padrões e distribuição**. Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...**Jardim, Mato Grosso do Sul: 2018

DE SOUZA, P. A. L. et al. **Avanços no monitoramento de queimadas realizado no INPE 2004**. São Paulo, Brasil: [s.n.].

DEVISSCHER, T. et al. Increased wildfire risk driven by climate and development interactions in the Bolivian Chiquitania, Southern Amazonia. **PLoS - ONE**, v. 11, n. 9, p. 1–29, 2016.

DEVISSCHER, T.; BOYD, E.; MALHI, Y. Anticipating future risk in social-ecological systems using fuzzy cognitive mapping: The case of wildfire in the Chiquitania, Bolivia. **Ecology and Society**, v. 21, n. 4, 2016.

DEVISSCHER, T.; MALHI, Y.; BOYD, E. Deliberation for wildfire risk management: Addressing conflicting views in the Chiquitania, Bolivia. **Geographical Journal**, v. 185, n. 1, p. 38–54, 2018.

EMBRAPA. **Pesquisas da Embrapa Rondônia revelam potencial do estado para a eucaliptocultura**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1480998/pesquisas-da-embrapa-rondonia-revelam-potencial-do-estado-para-a-eucaliptocultura>>. Acesso em: 16 out. 2021.

ESPINOZA, J. C. et al. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate Dynamics**, 2018.

EVANS, J. D. **Straightforward statistics for the behavioral sciences** Pacific Grove/Brooks/Cole Pub. Co., , 1996. Disponível em: <<file://catalog.hathitrust.org/Record/007132857>>

FAN. **Reporte de incendios forestales a nivel nacional 25 de septiembre de 2019**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <www.fan-bo.org>.

FAN. **Incendios forestales en Bolivia 2019**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/reportes/INCENDIOS_FORESTALES_2019.jpg>.

FAN. **Reporte sobre incendios forestales en bolivia - agosto 2019**. Disponível em: <<http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/publicaciones/>>. Acesso em: 14 out. 2019c.

FAN & WCS. **Incendios Forestales en Bolivia-Análisis de impactos de los incendios forestales sobre los valores de conservación en Bolivia, 2020**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <www.fan-bo.org%0AWildlife>.

FAO. **The state of the world's forests 2018 - Forest pathways to sustainable development**. Rome: [s.n.].

FINLAYSON, P.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger Climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007.

FUENTES, N. H. L.; SELAYA, G. **Evolución de Focos de Calor en Bolivia e Implicaciones Transfronterizas del Humo de Incendios Forestales Herencia , Calle Cívica , 042 – Cobija – Pando , Bolívia University of Florida , Gainesville , USA- Universidad Amazónica de Pando**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Curitiba, PR, Brasil: 2011

FUNDACIÓN SOLÓN. **Las leyes incendiarias en Bolivia**. Disponível em: <<https://fundacionsolon.org/2020/02/20/las-leyes-incendiarias-en-bolivia/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

FUNDACIÓN TIERRA. **Fuego en Santa Cruz**. La Paz, Bolívia: [s.n.].

FUNDACIÓN TIERRA. **El TIDN resuelve que los incendios del 2019 fueron un Ecocidio ocasionado por la política de Estado y el agronegocio**. Disponível em: <www.ftierra.org>. Acesso em: 20 out. 2020.

GARCIA, R.; PIVETTA, M. Como monitorar o fogo. **Pesquisa FAPESP**, 2019.

GFED. **Elevated climate-driven fire risk for the southern Amazon in 2020**. Disponível em: <<https://globalfiredata.org/pages/category/amazon/>>. Acesso em: 14 jun. 2020.

GFMC. **Vegetation Fires and Global Change - Challenges for concerted International Action**. Germany: Kessel Publishing House, 2013.

GFW. **We Lost a Football Pitch of Primary Rainforest Every 6 Seconds in 2019. Global Forest Watch**. Disponível em: <<https://blog.globalforestwatch.org/data-and-research/global-tree-cover-loss-data-2019>>. Acesso em: 4 jun. 2020.

GIGLIO, L. et al. An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. v. 87, p. 273–282, 2003.

GIGLIO, L.; CSISZAR, I.; JUSTICE, C. O. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 111, n. 2, p. 1–12, 2006.

GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. **El Niño and La Niña Years and Intensities**. Disponível em: <<https://ggweather.com/enso/oni.htm>>. Acesso em: 16 out. 2020.

GOMES, A. C. D. S. et al. Análise Estatística das Tendências de Elevação nas Séries de Temperatura Média Máxima na Amazônia Central: Estudo de Caso para a Região do Oeste do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 82–97, 2015.

GRANEMANN, D.; CARNEIRO, G. Monitoramento de focos de incêndio e áreas queimadas com a utilização de imagens de sensoriamento remoto. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 1, p. 55–62, 2009.

GÜ ÇLÜ, Y. S. Multiple sen-innovative trend analyses and partial Mann-Kendall test. **Journal of Hydrology**, p. 1–30, 2018.

GUARDIANA. **Áñez anula 1 de 14 normas incendiarias e indígenas se alistarán para iniciar juicio por ecocidio**. Disponível em: <<https://guardiana.com.bo/>>. Acesso em: 26 out. 2020.

GUIMARÃES, P. et al. Análise dos impactos ambientais de um incêndio florestal. **Agrarian Academy, Centro Científico Conhecer**, v. 1, p. 38–60, 2014.

HEYER, J. P. et al. The impacts of recent drought on fire, forest loss, and regional smoke emissions in lowland Bolivia. **Biogeosciences**, v. 15, n. 14, p. 4317–4331, 2018.

INE. **Aspectos-políticos-y-administrativos**. Disponível em: <<https://www.ine.gob.bo/index.php/bolivia/aspectos-politicos-y-administrativos/>>. Acesso em: 7 maio. 2020.

INPE. **Lançamento da “Base 2” de focos de queima de vegetação**. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/novidades/lancamento-da-colecao-2-de-dados-de-focos-de-calor>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

INPE. **Programa de queimadas**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas/portal%0A>>. Acesso em: 4 maio. 2020a.

INPE. **Monitoramento dos Focos Ativos por Países**. Disponível em: <http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/>. Acesso em: 2 nov. 2020b.

INPE. **Programa Queimadas - Perguntas Frequentes**. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal/informacoes/perguntas-frequentes>>. Acesso em: 19 ago. 2021a.

INPE. **A taxa consolidada de desmatamento por corte raso para os nove estados da Amazônia Legal em 2020 foi de 10.851 km²**. Disponível em:

<http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5811>. Acesso em: 12 set. 2021b.

INTERNATIONAL RIGHTS OF NATURE TRIBUNAL. **Final Veredict Case Chiquitania, Chaco and Amazonía v. the Plurinational State of Bolivia**, 2020.

Disponível em: <<https://www.rightsofnaturetribunal.org/cases/ecocide-in-the-amazon-chiquitania-case/#1596645255748-323760e5-6fd4>>

JIA, G. et al. Land-Climate Interactions. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, v. 20, n. 3, p. 998, 2019.

JIMENEZ, J. C.; LIBONATI, R.; PERES, L. F. Droughts Over Amazonia in 2005 , 2010 , and 2015 : A Cloud Cover Perspective. v. 6, n. December, p. 1–7, 2018.

KAZMIERCZAK, M. L. **Análise da distribuição espacial das queimadas no Brasil no período de 2000 a 2009**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Curitiba, PR, Brasil: 2011

LARREA, D.; RODRIGUEZ, A.; CUÉLLAR, S. **Reforestación y restitución de bosques: reflexiones en el marco de la Ley 337** Santa Cruz de la Sierra, Bolivia Editorial FAN, , 2014. Disponível em: <www.fan-bo.org/wp-content/files/policybriefMCF.pdf>

LE PAGE, Y. et al. Modeling fire-driven deforestation potential in Amazonia under current and projected climate conditions. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 115, n. 3, p. 1–11, 2010.

LIU, Y.; STANTURF, J.; GOODRICK, S. Trends in global wildfire potential in a changing climate. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 685–697, 2010.

LIU, Z. et al. Spatial patterns and drivers of fire occurrence and its future trend under climate change in a boreal forest of Northeast China. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 2041–2056, 2012.

LIZUNDIA-LOIOLA, J.; PETTINARI, M. L.; CHUVIECO, E. Temporal Anomalies in Burned Area Trends: Satellite Estimations of the Amazonian 2019 Fire Crisis. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 151, 2020.

MANTA, M.; SANHUEZA, P. Wildfires in South America. **Crisis Response**, v. 6, n. 1, p. 56–57, 2015.

MAPBIOMAS. **Lanzamiento de la Colección 2.0 de mapas anuales de cobertura y uso del suelo del 1985 a 2018 de la Pan-Amazonía**. Disponível em:

<<https://amazonia.mapbiomas.org/lanzamiento-de-la-coleccion-20>>. Acesso em: 22 set. 2021.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 1 da série anual de Cicatrizes de fogo do Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 17 ago. 2021a.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas - Coleção 6 da Série Anual de Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 17 ago. 2021b.

MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**, v. 3, n. February, 2021.

MARENGO, J.; NOBRE, C.; TOMASELLA, J. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, n. 3, p. 495–516, 2008.

MEENA, M. Rainfall Statistical Trend and Variability Detection Using Mann- Kendall Test , Sen’s Slope and Coefficient of Variance - A Case Study of Udaipur District (1957-2016). **Applied Ecology and Environmental Sciences**, v. 8, n. 1, p. 34–37, 2020.

MENDOZA, E.; OLGUÍN, L.; GALLIZIOLI, P. **Programa Amazonia sin Fuego: una propuesta de prácticas agropecuarias alternativas y sostenibles en la región amazónica de Bolivia**. Molina y A ed. La Paz - Bolívia: [s.n.]. v. 53

MIELNICKI, D. M.; CANZIANI, P. O.; DRUMMOND, J. **Quema de biomasa en el centro-sur de Sudamerica: Incendios locales, Impactos regionales**. Anales IX Congreso Argentino de Meteorología. **Anais...**Buenos Aires, Argentina: 2004Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/265819965>>

MORISSETTE, J. T. et al. Validation of MODIS Active Fire Detection Products Derived from Two Algorithms. **Earth Interactions**, v. 9, n. 9, 2005.

MORTON, D. C. et al. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, 2013.

NEPSTAD, D.; MOREIRA, A.; ALENCAR, A. **Flames in the rain forest: Origins, Impacts and Alternatives to Amazonian Fire**. Brasilia, Brazil: The Pilot Program to Conserve the Brazilian Rain Forest, 1999.

OOM, D.; PEREIRA, J. M. C. Exploratory spatial data analysis of global MODIS active fire data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, n. 1, p. 326–340, 2012.

PAGE, Y. LE et al. Global fire activity patterns (1996 ? 2006) and climatic influence :

an analysis using the World Fire Atlas. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 8, n. 7, p. 1911–1924, 2008.

PANISSET, J. S. et al. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 1096–1104, 2017.

PECHONY, O.; SHINDELL, D. T. Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. **PNAS**, v. 107, n. 45, p. 19167–19170, 2010.

PETTITT, A. N. A Non-parametric to the Approach Problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.

PINNA, M.; DA SILVA, J. V. **Amazon Fires: Bolivia experiences worst wildfires in living memory**. Disponível em: <<https://www.euronews.com/2019/09/30/amazon-fires-bolivia-experiences-worst-wildfires-in-living-memory>>. Acesso em: 20 set. 2020.

PINTO, L. et al. Comparação de produtos de precipitação para a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 4, p. 461–472, 2009.

PIVELLO, V. R. et al. Understanding Brazil’s catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, 2021.

PONVERT-DELISLES, D. R. **Tecnologías espaciales, desastres naturales y agricultura em países de Iberoamérica**. 2da. ed. La habana, Cuba: UNAH, 2009.

PORTILLO, C.; SANCHEZ, A.; ESPIRITO-SANTO, M. Monitoring deforestation with MODIS Active Fires in Neotropical dry forests: An analysis of local-scale assessments in Mexico, Brazil and Bolivia. **Journal of Arid Environments**, v. 97, p. 150–159, 2013.

RAMOS, A. B. R.; DO NASCIMENTO, E. R. P.; DE OLIVEIRA, M. J. **Temporada de incêndios florestais no Brasil em 2010: análise de série histórica de 2005 a 2010 e as influências das chuvas e do desmatamento na quantidade dos focos de calor**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**Curitiba, PR, Brasil: INPE, 2011Disponível em:
<message:%3C4E1CB62D.8010204@cptec.inpe.br%3E%5Cnpapers3://publication/uuid/7323BCAF-3381-44C9-A412-0D7AD96B23FA>

REDO, D.; MILLINGTON, A. C.; HINDERY, D. Deforestation dynamics and policy changes in Bolivia’s post-neoliberal era. **Land Use Policy**, v. 28, n. 1, p. 227–241, 2011.

RIBEIRO, I. O. et al. Biomass burning and carbon monoxide patterns in Brazil during

the extreme drought years of 2005 , 2010 , and 2015. **Environmental Pollution**, v. 243, p. 1008–1014, 2018a.

RIBEIRO, I. O. et al. Impact of the biomass burning on methane variability during dry years in the Amazon measured from an aircraft and the AIRS sensor. **Science of the Total Environment**, v. 624, p. 509–516, 2018b.

RIOTERRA. **Projeto Plantar**. Disponível em: <<https://plantar-ro.org.br/o-projeto/>>. Acesso em: 16 out. 2021.

RODRIGUEZ-MONTELLANO A.M. **Incendios y quemas en Bolivia, análisis histórico desde 2000 a 2013**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <<http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/mapa-interactivo>>.

RODRÍGUEZ, A. P. **Prevención , control y uso del fuego en la Chiquitanía**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.]. Disponível em: <www.cambioclimatico-bolivia.org>.

ROMERO-MUÑOZ, A. et al. Fires scorching Bolivia ’ s Chiquitano forest Misguided approach to dengue vaccine risk Need for mountain weather stations climbs. **Science**, v. 366, n. 6469, p. 1082, 2019.

SAI, M. B. Analysis of Wildfires in Brazil. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 07, n. 07, p. 1070–1072, 2020.

SANTOS, P. R. et al. Análise da frequência da incidência de queimadas na américa do sul para o período de 2000 a 2012. **Territorium Terra**, v. 2, n. 4, p. 101–112, 2014.

SCHROEDER, W. et al. **The spatial distribution and interannual variability of fire in Amazonia**. in: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, P.; Dias, P. (Eds). **Amazonia and Global Change**. The American Geophysical Union. Washington, DC, United States: [s.n.].

SCOTT, A. C. The Pre-Quaternary history of fire. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, p. 281–329, 2000.

SEDAM. **Uso do Fogo**. Disponível em: <<http://www.sedam.ro.gov.br/legislacao-sedam/>>. Acesso em: 16 out. 2021.

SEILER, C. **Implementation and validation of a Regional Climate Model for Bolivia**. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: [s.n.].

SEILER, C.; HUTJES, R. W. A.; KABAT, P. Climate variability and trends in bolivia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 52, n. 1, p. 130–146, 2013.

SEMA. **Relatório de monitoramento de focos de calor 2015**. Cuiabá - Mato Grosso, Brasil: [s.n.]. Disponível em: <www.MT.GOV.BR>.

SHLISKY, A., J. et al. Fire, ecosystems and people: threats and strategies for global

biodiversity conservation. Global Fire Initiative Technical Report 2007-2. **The Nature Conservancy**, 2007.

SILVA, S. S. DA et al. Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 424, n. April, p. 312–322, 2018.

SILVERMAN, B. W. **Density Estimation for Statistics and Data Analysis**. London: [s.n.].

STAAL, A. et al. Feedback between drought and deforestation in the Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 4, 2020.

TEJADA, G. et al. Deforestation scenarios for the Bolivian lowlands. **Environmental Research**, v. 144, p. 49–63, 2016.

VAN MARLE, M. J. E. et al. Fire and deforestation dynamics in Amazonia (1973–2014). **Global Biogeochemical Cycles**, v. 31, n. 1, p. 24–38, 2017.

VASCONCELOS, S. S. et al. Variability of vegetation fires with rain and deforestation in Brazil ' s state of Amazonas. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 199–209, 2013.

VENTURIEIRI, A. et al. **Dinâmica das queimadas no Estado do Mato Grosso entre os anos de 2008 e 2010**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...2013**

VOILAND, A. **Reflecting on a Tumultuous Amazon Fire Season**. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/146355/reflecting-on-a-tumultuous-amazon-fire-season>>. Acesso em: 30 set. 2021.

VOILAND, A. **Fires Raged in the Amazon Again in 2020**. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/147946/fires-raged-in-the-amazon-again-in-2020>>.

WHITE, B. L. A. Satellite detection of wildland fire in South America. **World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering**, p. 1–8, 2017.

WHITE, B. L. A. Spatiotemporal variation in fire occurrence in the state of Amazonas, Brazil, between 2003 and 2016. **Acta Amazonica**, v. 48, n. 4, p. 358–367, 2018.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Second Edi ed. California, USA: Elsevier, 2006. v. 91

YING, H. et al. The Effect of Snow Depth on Spring Wildfires on the Hulunbuir from 2001 – 2018 Based on MODIS. **Remote sensing**, 2019.