

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOLOGIA

IZADORA SANTOS DE CARVALHO

AS RELAÇÕES VEGETAÇÃO-FOGO-CLIMA NOS ECOSSISTEMAS SAVÂNICOS
DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS

São Luís
2024

IZADORA SANTOS DE CARVALHO
Engenheira Florestal Mestre em Agricultura e Ambiente

**AS RELAÇÕES VEGETAÇÃO-FOGO-CLIMA NOS ECOSSISTEMAS SAVÂNICOS
DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Agroecologia da Universidade
Estadual do Maranhão, para obtenção do título
de Doutora em Agroecologia.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz
Coorientadora: Prof.^a. Dr.^a Swanni T. Alvarado

São Luís
2024

Carvalho, Izadora Santos de.

As Relações Vegetação-Fogo-Clima nos Ecossistemas Savânicos do Parque Nacional da Chapada das Mesas. / Izadora Santos de Carvalho. – São Luís, MA, 2024.

144 f.

Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Agroecologia) – Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz.

Coorientadora: Profa. Dra. Swanni T. Alvarado.

1. Regime do fogo. 2. Sensoriamento remoto. 3. Cerrado.
4. Fitofisionomias. 5. Variáveis climáticas. I. Título.

CDU:581.5(213.54) (812.1)

IZADORA SANTOS DE CARVALHO

**AS RELAÇÕES VEGETAÇÃO-FOGO-CLIMA NOS ECOSISTEMAS SAVÂNICOS
DO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Agroecologia da Universidade
Estadual do Maranhão, para obtenção do título
de Doutora em Agroecologia.

Aprovado em: 23/08/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz (Orientador)
Doutor em Fisiologia Vegetal

Prof. Dr. Caio Vinícius de Mira Mendes (UEMA)
Doutor em Ecologia e Conservação da Biodiversidade

Prof. Dr. Daniel Borini Alves (UEPA)
Doutor em Geografia

Prof. Dr. Ronaldo dos Santos Barbosa (UEMASUL)
Doutor em Geografia

Prof. Dr. José Fernando Rodrigues Bezerra (UEMA)
Doutor em Geografia

A minha mãe, Izabel Pereira Santos, meu oxigênio.
E em memória de Sebastião Pastora de Carvalho Neto, meu pai.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por estar junto a mim nesta jornada, por me manter firme espiritualmente, especialmente quando o corpo e a mente não estavam tão bem.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Massi Ferraz, muito obrigada por todos esses anos de apoio e orientação científica e pessoal, sempre disposto a fornecer os recursos possíveis (e até quase impossíveis) para o desenvolvimento do trabalho e por estimular a realização de outros projetos, contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal. Agradeço por acreditar e caminhar junto, por ser exemplo de profissional e ser humano. Desejo que possamos continuar trilhando a parceria profissional e a amizade, pois tens minha admiração e gratidão por tudo.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a. Swanni T. Alvarado (sim, tive o privilégio de ter dois orientadores que me acompanharam desde o mestrado), há muito tempo não consigo chamá-la de coorientadora, mesmo que os meios oficiais me obriguem. Lembro-me de quando a conheci pessoalmente em 2018, a partir daquele momento, sabia que seria minha referência de pesquisadora mulher, e que sorte e privilégio eu tive. Por isso, falar de você sempre será difícil e fácil ao mesmo tempo. Difícil, pois podem faltar palavras para expressar toda a admiração e gratidão que sinto. Fácil, pois poderia falar por horas da honra que é conhecer e conviver com uma profissional de excelência, que ama o que faz. Muito obrigada por absolutamente tudo, por compartilhar seus conhecimentos, por acreditar em mim mesmo quando eu não acreditava, por todas as orientações na pesquisa e na vida, e por me fazer querer sempre buscar dar o meu melhor. Desejo seguir tendo a sorte e o privilégio de continuar compartilhando o campo profissional e a amizade com você.

À minha mãe, um agradecimento em poucas palavras, pois agradeço a cada milésimo de segundo que respiro por ter a melhor mãe de todas.

À minha família, que agora não vai mais perguntar “quando vai terminar?”, mal sabem que, na verdade, nunca termina. A busca por conhecimento e a vontade de contribuir com uma gota neste vasto oceano da pesquisa é infinita, apenas mudamos de fase. Que bênção eu tenho de poder contar com a minha família (materna e paterna) em todas estas fases.

Ao meu amigo, namorado, parceiro, e esposo, Patrick Costa Silva, que escolheu compartilhar comigo os bons e maus momentos, sou grata a Deus por trilharmos juntos essa vida até aqui, que continuemos juntos até o fim, como companheiro na vida e no trabalho. Te amo e admiro muito.

À equipe de campo: Léo V. Leonel, Patrick C. Silva, José Carlos, Ana Lúcia, Lailson Dantas, Franques e Marcão, peças fundamentais na realização do trabalho, sou grata pela vida de cada um de vocês. Com vocês, o sol do meio-dia da chapada ficou mais brando.

Ao Laboratório de Ciências Ambientais e Biodiversidade – LCAB da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, que orgulhosamente posso chamar de família LCAB, aos professores, Prof. Dr. Fábio Afonso e Prof. Dr. José Roberto, e a todos os seus alunos, bolsistas e pesquisadores, que fizeram as pedras do caminho se tornarem um pouco mais leves.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, através do PDPG-FAP (Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação - processo nº 18/2020), ao Projeto MAP-Fire Maranhão (FAPESP nº 2020/16457-3, e CNPq processo nº 409531/2021-9), e à FAPEMA (nº. CACD 02989/20; nº BD-01136/20), pelo apoio e financiamento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia – PPGA da Universidade Estadual do Maranhão e a todos os seus professores e alunos que conheci e que compartilharam comigo essa trajetória. À Profª. Drª. Thais Roseli Correa, coordenadora do PPGA, por todo apoio durante a realização do curso.

Ao apoio e à disponibilidade das instalações e utilização dos equipamentos e laboratórios do Centro de Ciências Agrárias - CCA da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, em especial a Profª. Drª. Alinne da Silva, por todo apoio e parceria.

E a todos que partilharam seus conhecimentos ao longo dessa trajetória, em especial, ao Dr. Daniel Borini Alves, sempre disposto a contribuir para a melhoria do trabalho e compartilhar seu conhecimento, Dr. Caio Mendes, Dr. Celso H. L. Silva-Júnior, e Profª. Drª. Camila Pinheiro Nobre, pelas parceiras e contribuições para a melhoria e desenvolvimento do trabalho.

Às minhas amigas e amigos de infância que torcem e acreditam em mim. E aos que conquistei ao longo da trajetória na pesquisa.

E a todos(as) que contribuem direta e indiretamente para o desenvolvimento da pesquisa científica no Brasil, no estado do Maranhão, e em especial no Cerrado.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Ecologia dos ecossistemas savânicos e sua relação com o fogo.....	16
1.2 Dinâmica do fogo em ecossistemas savânicos	18
1.3 Sensoriamento remoto aplicado no estudo de monitoramento de fogo e vegetação.....	21
1.4 Efeitos das variações climáticas na ocorrência e comportamento do fogo.....	23
CAPÍTULO II: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	25
1. ESTRUTURA E OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	25
1.1 Hipóteses	25
1.2 Objetivos	25
1.2.1 Geral.....	25
1.2.2 Específicos	26
1.3 Área de estudo	26
1.4 Mapeamento do regime de fogo e tipos de vegetação.....	29
1.5 Dados da vegetação arbórea e métricas biofísicas da vegetação combustível.....	31
1.6 Mapeamento das regiões microclimáticas.....	34
CAPÍTULO III: THE INFLUENCE OF FIRE ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF VEGETATION PHYSIOGNOMIES IN AMAZON-CERRADO TRANSITION ZONE, NORTHERN BRAZILIAN CERRADO	36
1 INTRODUCTION.....	37
2. MATERIAL AND METHODS.....	38
2.1 Study Area	38
2.2 Mapping the Fire Regime History	38
2.3 Spatio-temporal Assessment of Vegetation Cover.....	39
2.3.1 Image Segmentation.....	41
2.3.2 Image Classification.....	42
2.3.3 Validation of Classification.....	42
2.4 Relationship Between Fire Frequency and Vegetation Types.....	43
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	43
3.1 Mapping the Fire Regime History	43
3.2 Spatio-temporal Assessment of Vegetation Cover.....	45
3.3 Relationship Between Fire Frequency and Vegetation Types.....	48
4. CONCLUSION.....	50
5. ACKNOWLEDGMENTS	51
CAPÍTULO IV: COMO OS DIFERENTES HISTÓRICOS DE FOGO E A SAZONALIDADE INFLUENCIAM A DINÂMICA DA BIOMASSA COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES TIPOS DE VEGETAÇÃO SAVÂNICA	52
1 INTRODUÇÃO	53
2 METODOLOGIA	55
2.1 Área de estudo	55

2.2	Amostragem da vegetação lenhosa	57
2.3	Biomassa combustível	58
2.4	Relação entre dados de campo e índices de vegetação	59
2.5	Análises estatísticas	61
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1	Vegetação arbórea.....	61
3.2	Biomassa combustível	65
3.3	Relação entre dados de campo e índices de vegetação.	71
4.	CONCLUSÃO	74
5.	AGRADECIMENTOS.....	75
CAPÍTULO V: CLASSIFICAÇÃO DE REGIÕES MICROCLIMÁTICAS E CARACTERIZAÇÃO COM BASE NO REGIME DE FOGO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO - BRASIL.....		76
1.	INTRODUÇÃO	77
2.	METODOLOGIA	78
2.1	Área de estudo	78
2.2	Mapeamento das regiões microclimáticas.....	79
2.3	Histórico do regime de fogo.....	81
2.4	Fisionomias vegetais.....	82
2.5	Análise e processamento dos dados	82
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
3.1	Regiões microclimáticas: aspectos gerais	82
4.	CONCLUSÕES	88
5.	AGRADECIMENTOS.....	88
CONSIDERAÇÕES.....		90
REFERÊNCIAS		91
APÊNDICE		102
Capítulo II.....		102
Capítulo III		108
Capítulo IV		113

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Distribuição global dos tipos de regimes de fogo. Fonte: adaptado de Shlisky <i>et al.</i> (2007).	16
Figura 2. Condições dos sistemas naturais de fogo (regime de fogo) por ecorregião terrestre. Fonte: adaptado de Shlisky <i>et al.</i> (2007), acesso em: https://databasin.org/datasets/bc0f2102d5044d9aaeb3569802da3b3e/	17
Figura 3. Mapa ecorregional do Cerrado (Brasil) destacando as principais características do fogo em cada ecorregião. Fonte: Adaptado de Silva <i>et al.</i> (2021).	19
Figura 4. Exemplo de métodos de sensoriamento para obtenção de dados (temperatura, uso e cobertura, variáveis meteorológicas, etc.). Fonte: adaptado de Farella <i>et al.</i> (2022).	22

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização do Parque Nacional da Chapada das Mesas, ao norte do Cerrado brasileiro, em área de transição Amazônia-Cerrado.	27
Figura 2. Primeira expedição de campo realizada em novembro de 2021 para reconhecimento das áreas (a e b) e testes de coletas com os equipamentos em campo (c e d).	28
Figura 3. Ilustração do mapeamento manual de cicatriz de área queimada no PNCM. Fonte: De Carvalho <i>et al.</i> , 2024.	29
Figura 4. (a) Mapa de fitofisionomias de vegetação do PNCM (De Carvalho <i>et al.</i> , 2024). Em destaque as vegetações de cerrado aberto e cerrado denso e locais das parcelas de campo (b e c).	30
Figura 5. Limiares para determinação das classes de frequência de ocorrência de queimada na área do PNCM a partir do regime de fogo de 1984-2022.	31
Figura 6. Mapa de classes de histórico de ocorrência de fogo.	32
Figura 7. Distribuição e dimensão das parcelas para coleta de dados biométricos dos indivíduos arbóreos (30x30m), dados biofísicos (1x1m) e coleta de biomassa e serrapilheira (0,50x0,50m).	33
Figura 8. Coletas de dados em campo, com (a) coleta de coordenadas da área das parcelas, (b, c) coleta dados biofísicos com fluorímetro (d) e SPAD (c), (d, e, f) registro de imagens termográficas.	33
Figura 9 - Processo de coleta de biomassa em campo, com (a) seleção (aleatória) da área das parcelas, (b, c) coleta de biomassa (gramíneas, herbáceas e serrapilheira), (d, e, f) e separação, pesagem e secagem em laboratório.	34
Figura 10 - Fluxograma com a estrutura e organização da tese.	35

CAPÍTULO III

Figure 1 - Location of the study area, the Chapada das Mesas National Park - CMNP, transition zone between the Cerrado (savanna) and the Amazon. Fire frequency regime considering the historical series 1984 – 2022: Low fire frequency (LF): 1-5 fire events; Moderate fire frequency (MF): 6-18 fire events; High fire frequency (HF): more than 18 fire events over the 39-year; and No fire (NF): without event fire.	39
---	----

Figure 2 - Input data (a) and segmentation results for 1985 (b). The input data includes spectral imagens with bands: blue, green, red, NIR, SWIR1, and SWIR2 for two seasonal periods within the year. Figure (b) shows the results of the segmentation process in yellow..... 42

Figure 3 - Recurrence map of fires for the period 1984 to 2022 (39 years) in Chapada das Mesas National Park (A). Frequency of fires before the creation of the CMNP for the period 1984-2005 (22 years) (B), and after creation for the period 2006-2022 (17 years) (C). Raster dataset of the 1990 to 2017 by Carvalho et al. (2023), available at <https://zenodo.org/records/10289082>..... 44

CAPÍTULO IV

Figura 1 - Mapa de localização do (a) Parque Nacional da Chapada das Mesas, no Cerrado brasileiro, (b) o local de estudo dentro do parque, (c) tipos de vegetação de cerrado denso e cerrado aberto no parque (De Carvalho *et al.*, 2024), (d) classes de histórico de fogo usadas no estudo: HF1 - 1 a 2 anos desde o último fogo; HF2 - 3 a 4 anos desde o último fogo; HF3 - 6 a 7 anos desde o último fogo; e HF4 - mais de 10 anos desde o último fogo. 56

Figura 2 - Precipitação total mensal para 2021 e 2022 na região do PNCM. Dados obtidos da estação 747000 (7° 19' 23,14" S e 47° 27' 51,83" W), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA. 57

Figura 3 – Número de indivíduos lenhosos por parcela (900 m²). Classes de histórico de fogo: HF1: 1 a 2 anos desde o último fogo; HF2: 3 a 4 anos desde o último fogo; HF3: 6 a 7 anos desde o último fogo; e HF4: mais de 10 anos desde o último fogo. 62

Figura 4 - Parâmetros de análise fitossociológica (frequência) para espécies considerando os tipos de vegetação (cerrado denso e cerrado aberto) e tempo desde o último fogo..... 64

Figura 5 - Parâmetros de análise fitossociológica (frequência) das famílias para os tipos de vegetação (cerrado denso e cerrado aberto) e tempo desde o último fogo..... 65

Figura 6 - Biomassa em diferentes tipos de vegetação (cerrado aberto e cerrado denso) com diferentes históricos de incêndio (HF1=1-2 anos, HF2=3-4 anos, HF3=6-7 anos e HF4=mais de 10 anos desde o último fogo) no Parque Nacional da Chapada das Mesas, Brasil. Onde temos a biomassa de (a) gramínea morta (kg/m²), (b) gramínea viva (kg/m²), (c) serrapilheira (kg/m²), (d) herbácea viva (kg/m²), (e) total de gramínea e herbácea (kg/m²), e (f) total de gramínea (kg/m²), herbácea e serrapilheira (kg/m²). (**p<0,01, *p<0,05)..... 67

Figura 7 – (a) Intensidade de verde (Índice SPAD), (b) Temperatura média da parcela medida com a câmera FLIR, (c) Eficiência do fotossistema II (Fv/Fm) e (d) Eficiência do fotossistema II (PI) para o início e final da estação seca e o tempo desde o último fogo (HF1=1-2 anos, HF2=3-4 anos, HF3=6-7 anos e HF4=mais de 10 anos desde o último fogo). (****p<0.0001, ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05). 71

Figura 8 – Matriz de correlação entre dados de campo (altura da biomassa combustível, índice SPAD, Fv/Fm, PI, quantidade de biomassa (kg/m²), Temp. FLIR, cobertura da parcela de biomassa), índices espectrais (MCARI1, MNDWI, NDMI, NDVI, SAVI, SLAVI) e LST (*Land Surface Temperature*). Onde: Temp. FLIR = temperatura da biomassa combustível medida com a câmera térmica FLIR. As correlações significativas são indicadas por caixas preenchidas, vermelhas para correlações negativas e azuis para correlações positivas, variando de -1 a 1. As correlações não significativas são destacadas com valor de p. 73

CAPÍTULO V

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, o Parque Nacional da Chapada das Mesas. (A) Classe de frequência de fogo com base na reconstrução do histórico de fogo de 1984 até 2022, onde: frequência baixa, são áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada, queimaram de 6-18; frequência alta, áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima. (B) Classe de fisionomias vegetais encontradas na área de estudo (De Carvalho <i>et al.</i> , 2024). E (C) Zoneamento com base no plano de manejo do PNCM (ICMBio, 2019).....	79
Figura 2 - Variáveis climáticas do <i>TerraClimate</i> utilizadas no estudo (evapotranspiração real=ER, déficit de pressão de vapor=DPV, temperatura máxima=Tmax, temperatura mínima=Tmin, precipitação anual=PA, umidade do solo=US, velocidade do vento=Vs e elevação=MDE). Dados reamostrados para 30x30m o tamanho do pixel, exceto MDE.....	81
Figura 3 - (A) Classificação das regiões microclimáticas do PNCM, (B) classes de vegetação e uso (cerrado aberto=Ca, cerrado denso=Cd, cerrado rupestre=Cr, cerradão terras altas=Cta, cerradão terras baixas=Ctb, mata de galeria=Mg, e mosaico de agricultura e pastagem=M. agr. past.), e (C) classes de frequência de fogo: frequência baixa=FB, áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada=FM, queimaram de 6-18; frequência alta=FA, áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima=SQ, onde não teve ocorrência de fogo no período mapeado (1984-2022).	83
Figura 4 - Tipos de vegetação e uso do solo por região microclimática no PNCM.....	85

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Descrição das classes de históricos de fogo utilizadas no estudo.	32
---	----

CAPÍTULO III

Table 1 – Vegetation types classes used for mapping land cover in the Chapada das Mesas National Park, Brazilian Cerrado, between 1985 and 2022, using Landsat historical data, NDVI, and digital elevation model.	40
Table 2 - Validation metrics for vegetation cover mapping. Producer's and user's accuracy metrics for the different mapped classes and general product metrics classified as overall accuracy and Cohen's Kappa.	45
Table 3 - F1-score metrics for the different mapped classes.	46

CAPÍTULO IV

Tabela 1 – Descrição das classes de histórico de fogo usadas no estudo.	57
Tabela 2 – Índices de vegetação testados neste estudo.	59
Tabela 3 - Descrição das bandas de satélite utilizadas.	60

CAPÍTULO V

Tabela 1 - Descrição dos dados utilizados no estudo.	80
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca – Cerrado aberto.
Cd – Cerrado denso.
CMNP – Chapada das Mesas National Park.
DAP - Diâmetro à altura do peito.
Fv/Fm - Eficiência Quântica Máxima do FSII.
IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente.
ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade.
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change.
LST– Land Surface Temperature.
MCARI1– Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index.
MIF – Manejo Integrado do Fogo.
MNDWI – Modified Normalized Difference Water Index.
MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index.
NIR - Near Infrared.
NMDI – Normalized Difference Moisture Index.
OLI – Operational Land Imager.
OS – Open Savanna.
PI - Photosynthetic Index.
PNCM – Parque Nacional da Chapada das Mesas.
PREVFOGO – Centro Nacional de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais.
SAVI– Soil-Adjusted Vegetation Index.
SLAVI – Specific Leaf Area Vegetation Index.
SPAD - Soil Plant Analysis Diagnostic.
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
SWIR - Shortwave Infrared.
TI – Território Indígena.
TIR - Thermal Infrared.
TM – Thematic Mapper.
VI - Valor de Importância.
VIS - Visible.
WS – Woodland Savanna.

RESUMO

As savanas ocupam cerca de 20% do território global e evoluíram com a presença constante do fogo durante milhares de anos. O fogo desempenha um papel crucial na manutenção de processos ecológicos na biodiversidade desses ecossistemas. Este estudo tem por objetivo a análise dos ecossistemas savânicos no Brasil e a interação dinâmica entre o fogo e a biodiversidade presente. A dinâmica do fogo em savanas foi explorada ao abordar a heterogeneidade vegetal, frequência e histórico de fogo, e as respostas da vegetação à presença do fogo nas fisionomias de cerrado aberto e cerrado denso. A pesquisa combina o uso do sensoriamento remoto para monitorar o fogo e a vegetação, além do uso de dados coletados por expedições em campo na área de estudo. Portanto, nosso objetivo foi compreender como o regime de fogo afeta a distribuição da vegetação, a diversidade de espécies arbóreas e as condições da biomassa combustível, com enfoque no Cerrado brasileiro. Na pesquisa, foram analisados 39 anos de dados de fogo, com o uso de imagens de satélite Landsat. No mapeamento das fitofisionomias, foram utilizadas imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat 5 Thematic Mapper (TM) e Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), abrangendo os anos de 1985, 1995, 2005, 2015, 2020 e 2022. Para analisar os efeitos do tipo de vegetação, histórico de fogo e sazonalidade na estrutura da vegetação lenhosa e nas condições da biomassa combustível foi realizada a coleta da biomassa combustível, no início e final do ciclo de queima do ano de 2022, juntamente com dados da vegetação lenhosa por inventário, considerando áreas com diferentes históricos de fogo, em duas fisionomias de savana (cerrado aberto e cerrado denso). Os resultados mostram que áreas com frequência moderada de ocorrência de fogo são mais comuns e este regime de fogo tende a favorecer formações de cerrado aberto e cerrado denso. Foi identificado que as principais respostas na quantidade de biomassa combustível foram influenciadas pelos efeitos da interação do histórico de fogo e sazonalidade ($F_{3,74}=2,867$, $p=0,0422$), com tendências de diferença na recuperação da biomassa após eventos de fogo, e na acumulação de biomassa combustível entre as classes de histórico de fogo e vegetação. Além disso, foi possível analisar como as variáveis climáticas influenciam na distribuição espacial do regime de fogo no PNCM, por meio da classificação das regiões microclimáticas com os dados do TerraClimate e modelo digital de elevação, utilizando o algoritmo de classificação não supervisionada wekaKMean. Foram classificadas seis regiões microclimáticas (R1, R2, R3, R4, R5 e R6), revelando diferenças nas características climáticas de distribuição dos tipos de vegetação entre as regiões e as influências no regime de fogo. A pesquisa fornece subsídios para a conservação e manejo de ecossistemas savânicos, como o Parque Nacional da Chapada das Mesas – PNCM, um ecótono de transição entre os biomas Amazônia-Cerrado, que abriga espécies endêmicas, sítios arqueológicos, nascentes de água e um rico patrimônio cultural e histórico.

Palavras-chave: Regime do fogo, Sensoriamento remoto, Cerrado, Fitofisionomias, Variáveis climáticas.

ABSTRACT

Savannas occupy around 20% of the global land area and have evolved with the constant presence of fire for thousands of years. Fire plays a crucial role in maintaining the ecological processes and biodiversity of these ecosystems. This study aims to analyze savanna ecosystems in Brazil and the dynamic interaction between fire and biodiversity they support. Fire dynamics in savannas were explored by addressing vegetation heterogeneity, fire frequency and history,

and vegetation responses to fire in open savanna and woodland savanna physiognomies. The research combines remote sensing for monitoring fire and vegetation with data collected during field expeditions in the study area. Our objective was to understand how the fire regime affects vegetation distribution, tree species diversity, and fuel biomass conditions, focusing on the Brazilian Cerrado. In the research, 39 years of fire data were analyzed using Landsat satellite images. For the mapping of phytophysiomies, surface reflectance images from the Landsat 5 Thematic Mapper™ and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) satellites were used, covering the years 1985, 1995, 2005, 2015, 2020, and 2022. To analyze the effects of vegetation type, fire history, and seasonality on the structure of woody vegetation and the conditions of fuel biomass, data were collected at the beginning and end of the 2022 burning cycle, along with an inventory of woody vegetation in areas with different fire histories, across two savanna physiognomies (open savanna and woodland savanna). The results show that regions with a moderate frequency of fire occurrence are more common, and this fire regime tends to favor the formation of open savanna and woodland savanna. It was identified that the main variations in the amount of fuel biomass were influenced by the interaction effects of fire history and seasonality ($F_{3,74}=2.867$, $p=0.0422$), with observed differences in biomass recovery after fire events and in the accumulation of fuel biomass between different fire history and vegetation classes. Furthermore, it was possible to analyze how climatic variables influence the spatial distribution of the fire regime in the PNCM by classifying microclimatic regions using TerraClimate data and a digital elevation model, with the unsupervised classification algorithm wekaKMean. Six microclimatic regions were identified (R1, R2, R3, R4, R5, and R6), revealing differences in the climatic characteristics and distribution of vegetation types between regions and their influences on the fire regime. This research provides valuable insights for the conservation and management of savanna ecosystems, such as the Chapada das Mesas National Park (CMNP), a transitional ecotone between the Amazon-Cerrado biomes, which is home to endemic species, archaeological sites, water sources, and a rich cultural and historical heritage.

Keywords: Fire regime, Remote sensing, Savanna, Phytophysiomies, Climatic variables.

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

1. INTRODUÇÃO

1.1 Ecologia dos ecossistemas savânicos e sua relação com o fogo

A compreensão sobre a biodiversidade nos ecossistemas, incluindo as funções de várias espécies da fauna e flora, e suas interações com o meio (solo, clima, fragmentação de habitats, hidrografia, interação humana, e outros) ainda é um desafio constante. Alguns fatores que caracterizam os diferentes tipos de ecossistemas existentes no mundo e suas biodiversidades são: topografia, altitude, temperatura, pluviosidade, geolocalização, características edáficas e hidrológicas (Coutinho, 2016; Geary *et al.*, 2020; Olson; Dinerstein, 2008). Outros eventos que também influenciam na formação e estrutura dos ecossistemas são as ocorrências de atividades vulcânicas, eventos climáticos extremos, como secas, inundações, o fogo, e atividades antropogênicas (Bowman *et al.*, 2020; Wallis *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Porém em relação ao fator fogo, a nível global, os ecossistemas podem ser classificados segundo suas condições em sensíveis ao fogo; independentes do fogo e dependentes do fogo (Figura 1) (Hardesty; Myers; Fulks, 2005; Shlisky *et al.*, 2007).

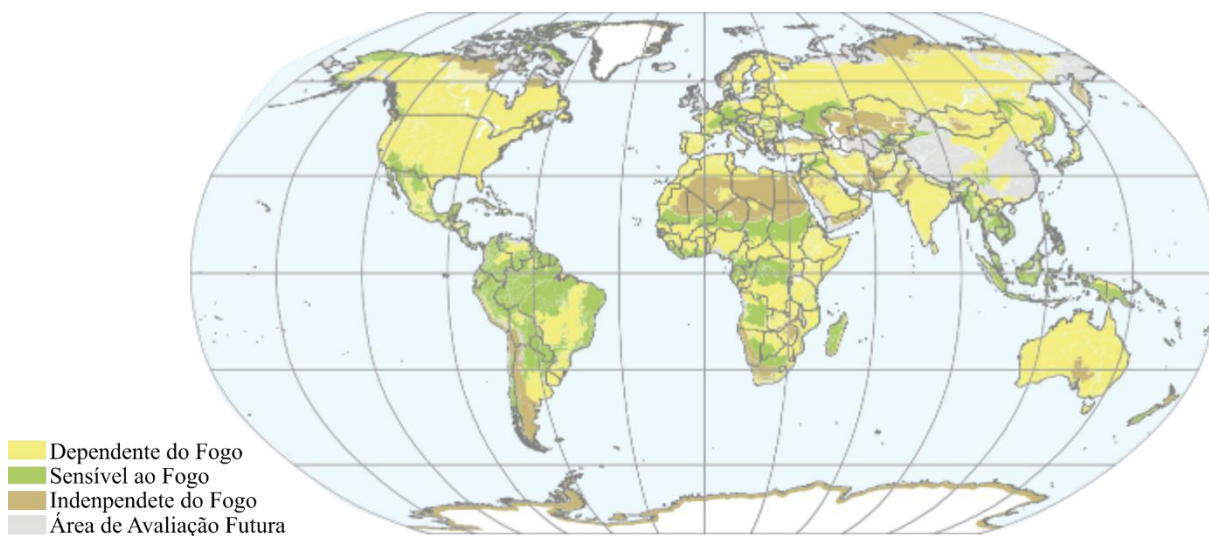


Figura 1. Distribuição global dos tipos de regimes de fogo. Fonte: adaptado de Shlisky *et al.* (2007).

As ecorregiões dependentes do fogo ocupam aproximadamente 53% da área terrestre do globo, considerando todas as ecorregiões avaliadas sendo as Savanas um exemplo. As ecorregiões sensíveis ao fogo e as independentes fogo cobrem 22% e 8%, respectivamente. E

quando analisadas as condições de regime de fogo, as ecorregiões com regime de fogo em situação de degradação correspondem a 53% da área terrestre global (Figura 2) (Shlisky *et al.*, 2007).

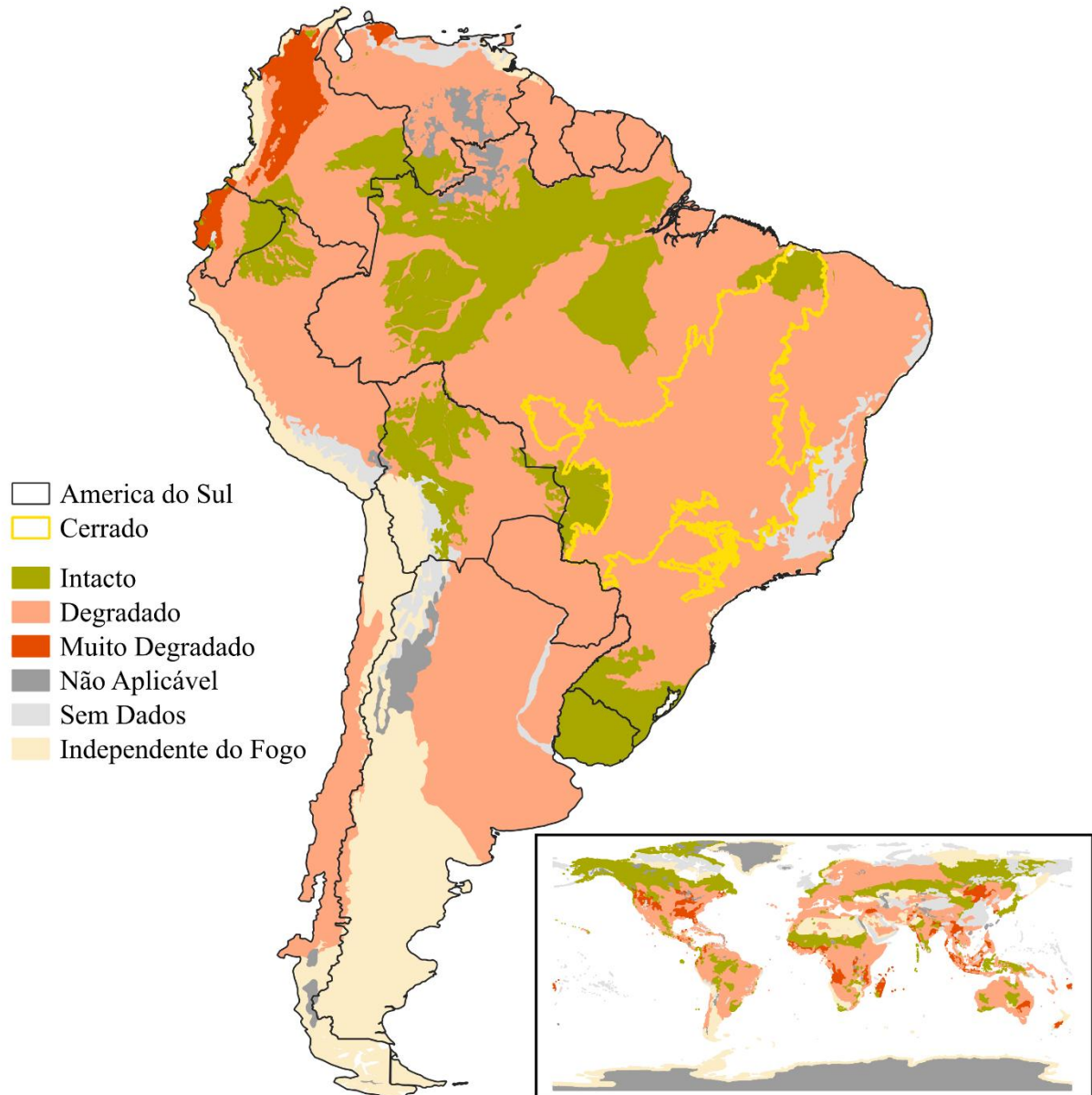


Figura 2. Condições dos sistemas naturais de fogo (regime de fogo) por ecorregião terrestre. Fonte: adaptado de Shlisky *et al.* (2007), acesso em: <https://databasin.org/datasets/bc0f2102d5044d9aeb3569802da3b3e/>.

Os ecossistemas savânicos evoluíram ao longo de milhões de anos na presença do fogo (Pivello, 2011), e dependem da ocorrência periódica de fogo para manter seus processos ecológicos, importantes para a manutenção da biodiversidade (Shlisky *et al.*, 2007, Pivello, 2011). As áreas de savanas estão distribuídas entre os continentes da África, América do Norte,

América do Sul, Ásia e Oceania e ocupam aproximadamente 20% do território global (Archibald *et al.*, 2013; Lehmann *et al.*, 2014; Scholes; Archer, 1997). Dentre as principais ameaças à manutenção do papel ecológico do fogo nos habitats podemos citar o desenvolvimento urbano; a pecuária, a agricultura; as políticas concentradas apenas na supressão de fogo; a extração de recursos naturais; e as mudanças climáticas (Pivello, 2011; Schmidt; Eloy, 2020; Shlisky *et al.*, 2007).

As regiões de Savanas são consideradas ecossistemas subtropicais e tropicais e recebem outras denominações, como Cerrado e Caatinga no Brasil, Miombo na Angola, e Llanos na Colômbia e Venezuela (Eamus; Huete; Yu, 2016). Estes ecossistemas são caracterizados por períodos de estação seca geralmente mais prolongadas e estação chuvosa com variações significativas na precipitação e temperatura ao longo do ano (Baudena *et al.*, 2015; Eamus; Huete; Yu, 2016), influenciando no regime de fogo e na estrutura e composição da vegetação (Archibald *et al.*, 2018; Ribeiro; Walter, 2008). Assim, a vegetação das Savanas varia de gramíneas a arbustos e árvores, distribuídas em diferentes densidades, com adaptações específicas para sobreviver a ocorrência frequente de fogo, seca e variações de temperatura (Archibald *et al.*, 2018; Eamus; Huete; Yu, 2016).

Muitos estudos abordam sobre os impactos das mudanças climáticas na biodiversidade dos ecossistemas de savana a nível regional e global (Archibald *et al.*, 2013; Wallis *et al.*, 2021) e como afetam o regime natural de fogo e a biodiversidade desses ecossistemas (Kelly *et al.*, 2020; Lasslop *et al.*, 2020). Entretanto, cada região tem suas particularidades, e devem ser tratadas também em escalas locais para que as ações de manejo, preservação e conservação tenham efetividade (Alvarado *et al.*, 2020). Portanto, são necessárias mais pesquisas para explorar a biodiversidade e a complexa rede de relações ecológicas nas savanas e as relações frente às alterações no regime natural do fogo.

1.2 Dinâmica do fogo em ecossistemas savânicos

Os ecossistemas Savânicos são caracterizados por uma cobertura vegetal heterogênea com grande diversidade de espécies composta por gramíneas, arbustos e árvores, presentes em diversas regiões do globo (Eamus; Huete; Yu, 2016). O fogo desempenha um papel fundamental na dinâmica desses ecossistemas, ao influenciar a biodiversidade, a estrutura e formação da vegetação e os processos ecológicos (Shlisky *et al.*, 2009). Portanto, o regime de fogo é um fator chave para a composição e estruturação da vegetação em savanas (Bond;

Keeley, 2005), o que demonstra a importância de entender a relação entre fogo e ecossistemas Savânicos.

Entender os fatores que determinam o regime de fogo em área de Savana envolve a compreensão de diversas variáveis ambientais, habitat e antropogênicas ao longo do tempo (Wallis *et al.*, 2021). Assim, os fatores bióticos e abióticos influenciam na diversidade de regime de fogo encontrados nos ecossistemas de Savana (Bond; Keeley, 2005). Os principais aspectos analisados na determinação e estudos desses regimes são: frequência, intensidade, sazonalidade, severidade, biomassa combustível e variáveis meteorológicas para ocorrência de fogo (Hardesty *et al.*, 2005; Keeley, 2009; Shlisky *et al.*, 2007). Isso impulsiona a realização de estudos para o entendimento do comportamento do fogo como parte do processo de evolução desses ecossistemas (Figura 3).

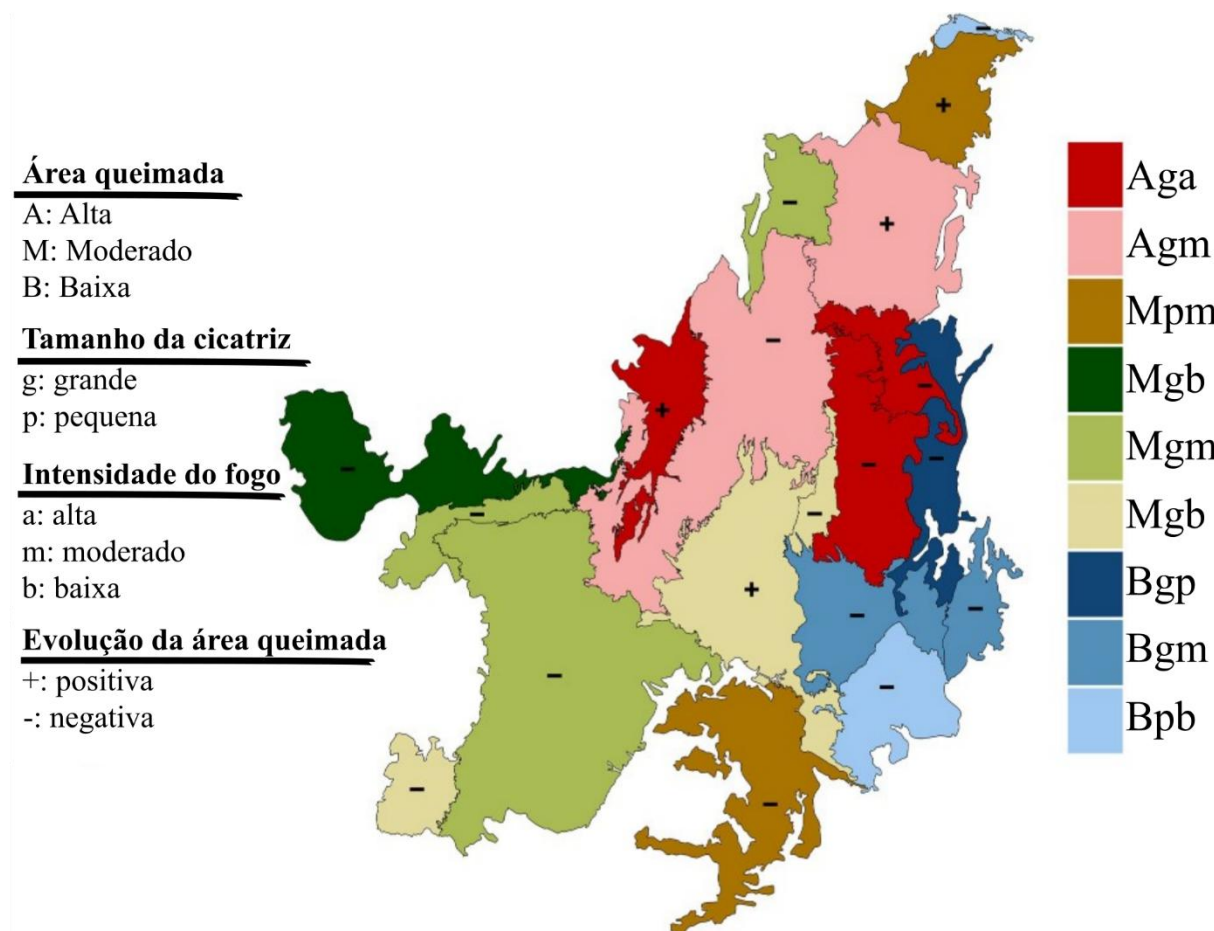


Figura 3. Mapa ecorregional do Cerrado (Brasil) destacando as principais características do fogo em cada ecorregião. Fonte: Adaptado de Silva *et al.* (2021).

Outros aspectos relevantes nos estudos das dinâmicas de regime de fogo que permitem identificarmos padrões existentes são a recorrência do fogo, ou seja, quanto vezes o fogo ocorre em uma mesma área, o intervalo entre as ocorrências dos eventos de fogo, duração da estação propícia a ocorrência de fogo, o tamanho das áreas atingidas pelo fogo, e o quantitativo de áreas anualmente queimada (Archibald *et al.*, 2013). Assim, mesmo em um mesmo ecossistema ocorre heterogeneidade entre os padrões de regime de fogo (Alvarado *et al.*, 2020; Archibald *et al.*, 2013; Lehmann *et al.*, 2014). Essas diferenças e limiares podem ser identificadas a partir das relações dos fatores que determinam os padrões do regime de fogo e as características climáticas.

Em estudo realizado por Pais *et al.* (2023), foram estabelecidas 15 regiões globais com características de regime de fogo semelhantes (frequência de fogo, área queimada, intensidade, sazonalidade), com base em fatores como vegetação, clima e demografia. Os resultados deste estudo sugerem que os principais fatores que influenciam os regimes de fogo, em escala global, são a combinação de fatores climáticos, uso e ocupação do solo e socioeconômicos. Contudo, destacam, que devido à grande variabilidade entre regiões, não se podem concluir os principais fatores que definem cada região.

Diversas características adaptativas são encontradas em espécies vegetais e associadas à presença de fogo em ecossistemas Savânicos. Podemos destacar a maior espessura de casca e alto vigor da rebrota do sistema radicular, o que não ocorre ou apresentam-se menos abundantes em ambientes onde o fogo não é presente (Simon *et al.*, 2009), além da quebra de dormência de sementes após queima, estrutura da vegetação, adaptação de raízes, capacidade de rebrota e floração após queima, entre outros mecanismos evolutivos das relações fogo-vegetação (Ferreira; Ely; Beal-Neves, 2021; Le Stradic *et al.*, 2015; Pilon *et al.*, 2021; Sarmiento, 1992).

Estudar o regime de fogo em ecossistemas savânicos e seus padrões é uma das etapas para entender diversos processos ecológicos desses ambientes, principalmente no cenário atual de mudanças climáticas que vivemos (Keeley; Syphard, 2016). Desse modo, compreender as características e condições da vegetação em fisionomias onde há maior ocorrência desses eventos, pode gerar informações sobre a dinâmica ecológica e como contribuem na manutenção da biodiversidade e qualidade desses habitats, além da contribuição para ações de manejo, conservação, prevenção e combate a incêndios (Alvarado *et al.*, 2020; Sano *et al.*, 2019).

1.3 Sensoriamento remoto aplicado no estudo de monitoramento de fogo e vegetação

A complexidade dos estudos que buscam analisar as relações do fator fogo e seus efeitos nos ecossistemas de savana são confirmados, dentre outros fatores, pela heterogeneidade da vegetação (Archibald *et al.*, 2013), considerando ainda a variabilidade espacial e temporal das ocorrências de fogo (Libonati *et al.*, 2021). Com isso, grande parte dos trabalhos sobre o fogo e sua influência na vegetação visam realizar o mapeamento de áreas queimadas (Libonati *et al.*, 2021), e mensurar métricas como a frequência, severidade e tamanho de área queimada para determinação dos padrões de regime de fogo (Archibald *et al.*, 2013; Handesty *et al.*, 2005; Keeley, 2009; Shlisky *et al.*, 2007). Nesse cenário, tem início, entre os anos de 1970 e 1990, a utilização de produtos e ferramentas de sensoriamento remoto para o mapeamento de focos e áreas de queimadas (Chuvieco *et al.*, 2019; Chuvieco; Congalton, 1988; Libonati *et al.*, 2021).

A detecção de áreas queimadas a partir de imagens de satélites é possível devido a resposta espectral após a ocorrência de fogo, em razão da fumaça, deposição de cinzas no solo e alteração na estrutura da vegetação (Chuvieco *et al.*, 2019; Libonati *et al.*, 2021). Dentre as imagens mais utilizadas para a detecção de ocorrência de fogo estão os produtos do satélite Landsat, que iniciou sua operação em 1972, imagens do sensor MODIS disponíveis a partir do ano de 2000, e imagens do satélite Sentinel, (Bowman *et al.*, 2003; Chuvieco *et al.*, 2019; Chuvieco; Congalton, 1988; Giglio *et al.*, 2003; Roteta *et al.*, 2019). Porém ressalta-se que as imagens de satélite já eram utilizadas anteriormente em estudos de monitoramento ambiental (Chuvieco; Congalton, 1988).

Por exemplo, para determinar as características dos regimes de fogo, em escala global, Archibald *et al.* (2013) utilizaram dados obtidos por sensoriamento remoto (imagens do sensor MODIS, dados climáticos da base *WorldClim*, dados de emissões da base *Global Fire Emissions - GDF*), em que demonstraram a relação das características dos regimes de fogo nos diferentes biomas, com os padrões de clima, atividades humanas e vegetação, ao identificar a complexidade na compreensão dos impactos das mudanças nos padrões de regime de fogo. Como no estudo realizado por Alvarado *et al.* (2020), que também utilizaram produtos do sensor MODIS de área queimada e uso e cobertura do solo, e dados climáticos do *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data – CHIRPS*, onde identificaram importantes resultados sobre a relação entre variáveis como umidade e biomassa combustível com a ocorrência de fogo em ecossistemas de Savana em diferentes regiões do globo (África, América do Sul e Austrália).

O uso de dados obtidos por imagens de sensoriamento remoto, como os índices de vegetação e diferentes bandas espectrais, permite inferir sobre a qualidade da vegetação, quantidade de biomassa e recuperação da vegetação pós-fogo (Franke *et al.*, 2018; Pérez-Cabello; Montorio; Alves, 2021). No entanto, a representatividade e confiabilidade desses dados são discutidas devido às limitações atribuídas, como a escala das imagens. Mesmo assim, o sensoriamento remoto oferece alternativas eficazes para estudos e geração de produtos em termos de tempo e custo em comparação com a obtenção de dados em campo (Pérez-Cabello; Montorio; Alves, 2021). Portanto, ressalta-se a importância da validação e calibração dos produtos de sensoriamento remoto com dados de campo (Figura 4) (Wu *et al.*, 2019).

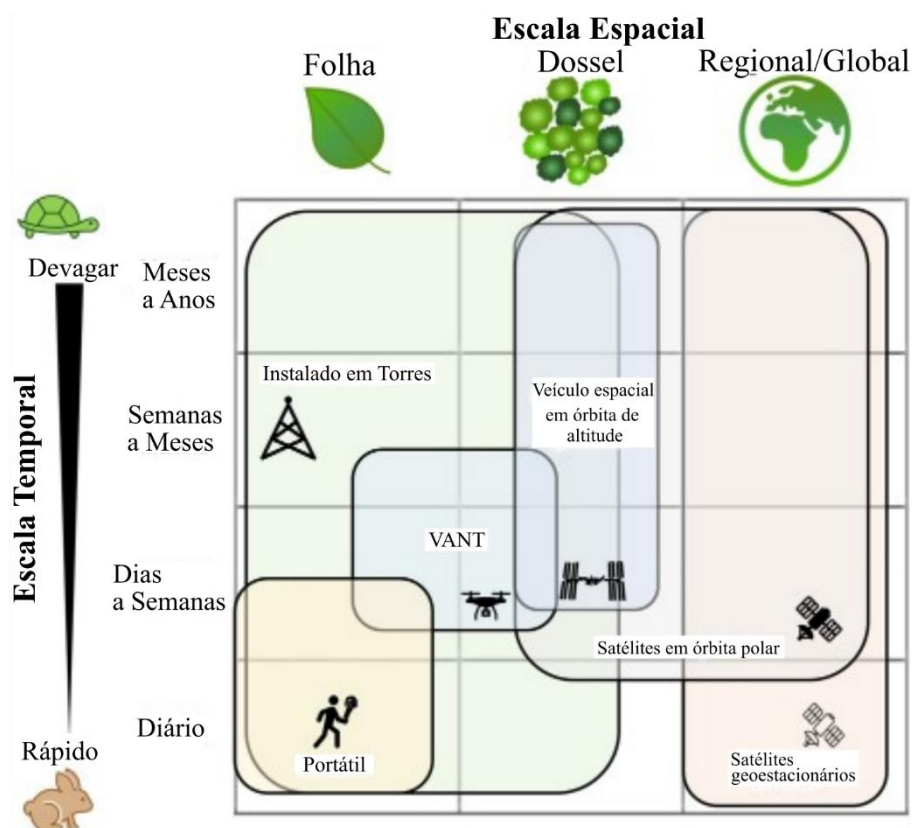


Figura 4. Exemplo de métodos de sensoriamento para obtenção de dados (temperatura, uso e cobertura, variáveis meteorológicas, etc.). Fonte: adaptado de Farella *et al.* (2022).

A relação entre os parâmetros ecofisiológicos da vegetação e fatores ambientais podem trazer respostas sobre as condições do material combustível e como podem favorecer a ocorrência de fogo (Libonati *et al.*, 2021). Os principais processos biofísicos da vegetação que são estudados (absorção de luz, transpiração, fotossíntese, fases fenológicas etc.), podem ser inferidos de forma direta ou através de métodos indiretos (Gitelson *et al.*, 2022). O estudo realizado por Wang *et al.* (2016) demonstra o potencial do uso de produtos do sensoriamento

remoto, aplicados ao estudo da biomassa, diversidade e produtividade de espécies. Além disso, outros aspectos da vegetação como os ciclos reprodutivos e vegetativos são importantes como observados por Ferreira et al. (2023), que avaliaram os padrões fenológicos da vegetação em área de savana no Brasil demonstrando a relação da sazonalidade do fogo no processo de floração e frutificação da vegetação.

A combinação dessas informações provenientes de imagens de satélite e dados de campo permite uma compreensão mais abrangente e precisa, do estado da vegetação e sua relação com a ocorrência de fogo e contribui para estudos sobre a qualidade da vegetação e para a avaliação de processos ecológicos. Portanto, estabelecer as condições que uma vegetação possui quando se encontra susceptível a ocorrência de fogo pode colaborar para o avanço dos métodos e modelos de previsão de risco de fogo, onde as variáveis meteorológicas são consideradas e as condições do material combustível, como a umidade da vegetação, por exemplo, não são incluídas (Libonati *et al.*, 2021).

1.4 Efeitos das variações climáticas na ocorrência e comportamento do fogo

Apesar dos habitats de savana apresentarem adaptações que possibilitam uma maior resiliência após a ocorrência de fogo (Ferreira; Ely; Beal-Neves, 2021; Le Stradic *et al.*, 2015; Pilon *et al.*, 2021), a frequência e recorrência com que atualmente acontecem, conduzem a intensificação de problemas como perda e fragmentação de habitats. Aproximadamente 60% dos habitats dependentes do fogo tiveram seu regime de fogo alterado (Shlisky *et al.*, 2009). Entre os aspectos que influenciam tais mudanças no regime de fogo em muitos biomas, estão as alterações no clima, com uma previsão de aumentar os riscos de ocorrência de fogo frente às mudanças climáticas futuras (IPCC, 2005).

Os fatores essenciais que influenciam e são utilizados em análises de modelagem para previsão e risco de incêndios e mudanças dos padrões de regime de fogo são as variáveis climáticas como temperatura, precipitação, umidade relativa e vento (Silva *et al.*, 2019). Além desses fatores, os aspectos microclimáticos, como déficit de pressão de vapor, velocidade do vento, umidade relativa do ar, juntamente com as informações de vegetação arbórea e biomassa combustível, são necessários para se obter dados sobre como o comportamento do fogo (Gomes *et al.*, 2020). Uma vez que a quantidade e condições de biomassa disponível para queimada somada às variáveis climáticas, topografia e uso e cobertura da terra possibilitam uma

modelagem de previsão e risco de queima mais complexa (Chuvieco *et al.*, 2021; Setzer *et al.*, 2021).

Em estudo realizado na região do Cerrado brasileiro foram demonstradas as principais tendências para a ocorrência de fogo (queimadas e incêndios) considerando diferentes cenários de mudanças climáticas (Silva *et al.*, 2019). Os autores destacaram a importância de manter a temperatura média global da terra a níveis menores que 1,5 °C, onde o aumento de áreas queimadas apresentou uma média de 22%, a menor entre os cenários analisados. Contudo, em todos os cenários analisados houve aumento de área queimada, pois as alterações no clima são impulsionadas pelas atividades humanas, que também influenciam as mudanças nos padrões de fogo em ecossistemas dependentes e também nos ecossistemas que não dependem do fogo para a manutenção dos seus processos ecológicos (Kelly *et al.*, 2020).

Eventos climáticos como secas prolongadas, *El Niño* e *La Niña*, sempre fizeram parte dos períodos evolutivos do planeta, porém devido às ações antropogênicas houve uma diminuição no intervalo e aumento na intensidade desses eventos que conduz ao aumento da suscetibilidade a ocorrência de fogo (Silva *et al.*, 2019; Soares-Filho *et al.*, 2012). A influência do clima na atividade do fogo, estudada por meio de modelos climáticos, mostram que o aumento de temperatura e as variações nos padrões de precipitação nas próximas décadas pode impactar diretamente na sazonalidade e duração da época de ocorrência de fogo (Wasserman; Mueller, 2023). Dessa forma busca-se compreender como as mudanças climáticas estão alterando os ecossistemas e seus processos e os regimes de fogo naturais para então planejar e indicar formas de mitigação dos impactos das atividades humanas.

CAPÍTULO II: PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

1. ESTRUTURA E OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A tese está estruturada em forma de capítulos, onde este capítulo corresponde à introdução e contextualização do trabalho e descrição das hipóteses, objetivos e procedimentos metodológicos gerais para embasar os artigos apresentados nos capítulos seguintes. Os capítulos (III, IV e V) correspondem ao desenvolvimento de respostas para atender cada objetivo apresentado a seguir.

1.1 Hipóteses

- A mudança na dinâmica do fogo ao longo do tempo pode determinar o tipo de vegetação existente, onde por sua vez a frequência elevada de queimadas favorece a presença de formações abertas em detrimento das formações florestadas, assim como a ausência desses eventos podem influenciar o adensamento de espécies lenhosas em fisionomias abertas.
- A qualidade e quantidade de biomassa, assim como a diversidade de espécies em áreas de savana podem ser influenciadas pelo tempo desde a última ocorrência de queima em áreas onde o fogo ocorre com maior frequência ao longo do tempo.
- As características microclimáticas locais influenciam nos padrões de regime de fogo ao longo do tempo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Nesta pesquisa buscamos compreender como o regime de fogo afeta a distribuição espacial da vegetação, a diversidade de espécies arbóreas e as condições da biomassa combustível, em diferentes intervalos de fogo. Portanto, avaliamos a interação entre a dinâmica do fogo, a composição e estrutura da vegetação e os fatores climáticos em ecossistemas savânicos com o foco na região do Cerrado maranhense, uma área de transição Amazônia-Cerrado.

1.2.2 Específicos

- ✓ Determinar como os diferentes padrões de ocorrência de fogo influenciam na distribuição dos tipos vegetação savânica, identificando as mudanças ao longo do tempo no período de 1984-2022;
- ✓ Relacionar diferentes históricos de fogo com a dinâmica da comunidade arbórea e biomassa combustível, correlacionando métricas ecofisiológicas coletadas em campo (intensidade de verde, rendimento quântico máximo do fotossistema II - FSII (F_v/F_m) e o índice fotossintético – PI), com índices de vegetação obtidos por produtos de sensoriamento remoto, para determinar as condições da biomassa combustível;
- ✓ Relacionar os tipos de vegetação, as variáveis microclimáticas (temperatura, evapotranspiração real, precipitação, umidade do solo, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento) e o regime de fogo, para gerar um mapeamento de regiões microclimáticas.

1.3 Área de estudo

A área escolhida para a realização da pesquisa foi a unidade de conservação de proteção integral Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM), criado no ano de 2005 com o objetivo de preservar e conservar o patrimônio natural (Pãozinho; Ponciano, 2018; Sudré *et al.*, 2020), fauna e flora da região, onde existem espécies endêmicas (Ferraz *et al.*, 2020), sítios arqueológicos (Silva; Araujo; Da Conceição, 2019) e mais de 400 nascentes de água (Lima *et al.*, 2007), em região considera ecótono de transição entre os biomas Amazônia-Cerrado (Ferraz *et al.*, 2020). O parque está localizado em um complexo regional de elevado interesse ecológico e geoturístico, abriga um importante patrimônio cultural e histórico das comunidades tradicionais que residem no interior do parque e no entorno (Marques; Amorin, 2014; Pãozinho; Ponciano, 2018), e requer atenção por ser uma das poucas áreas remanescentes do bioma Cerrado ainda preservada no estado do Maranhão (Figura 1).

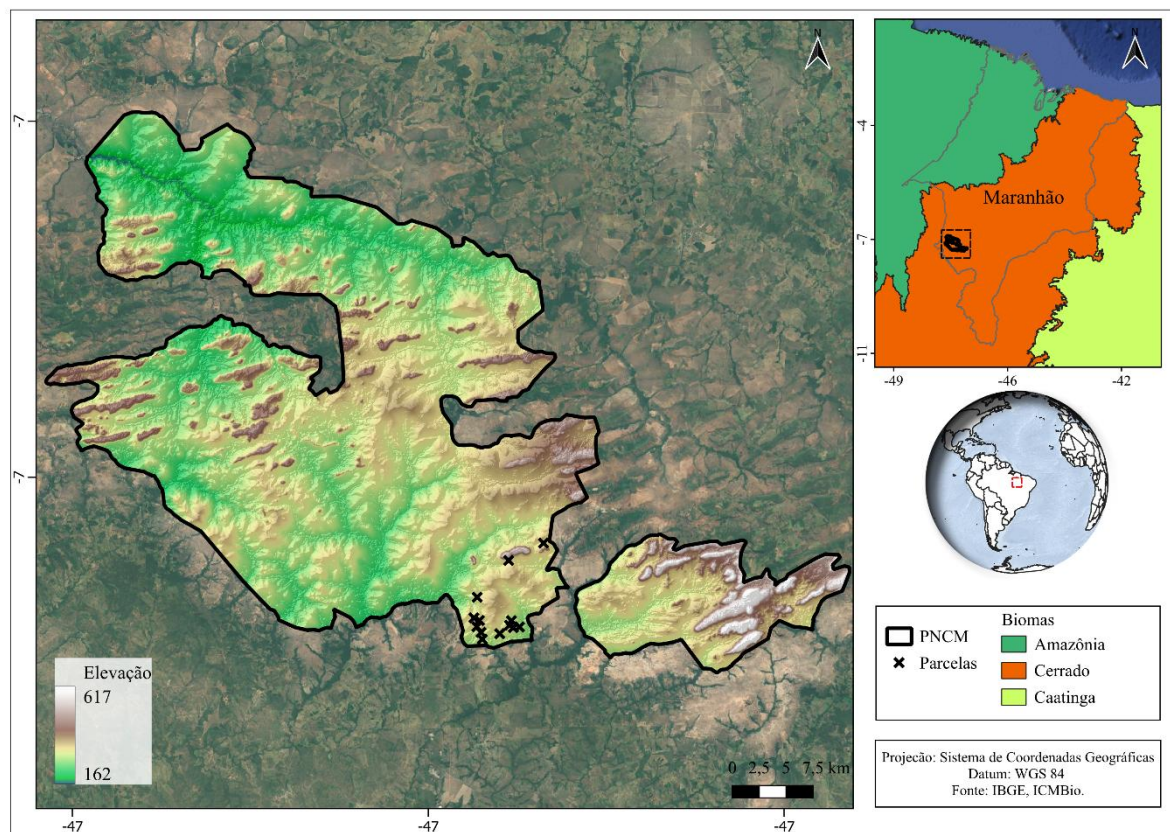


Figura 1. Localização do Parque Nacional da Chapada das Mesas, ao norte do Cerrado brasileiro, em área de transição Amazônia-Cerrado.

No ano de 2019 foi concluído o plano de manejo do PNCM, que apresenta as necessidades e prioridades para o manejo e conservação dos recursos naturais, culturais e sociais da área de proteção e seu entorno (ICMBio, 2019; Sudré; Pãozinho; Leite, 2022). Além disso, o impacto do fogo em áreas de cursos d'água e seu uso para a renovação de pastagem é pontuado como ameaça no plano de manejo, que permite a utilização do fogo apenas para as atividades de manejo integrado do fogo (MIF) e realização de queima prescrita (ICMBio, 2019).

O Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM) foi uma das áreas integrantes do projeto piloto de Manejo Integrado do Fogo em unidades de conservação do Cerrado, através do Projeto Cerrado Jalapão, que contemplo outras duas áreas protegidas (APs), Parque Estadual do Jalapão e Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins (Schmidt *et al.*, 2016, 2018). A implantação do MIF colabora para o manejo e gestão de áreas protegidas (APs), sendo ainda uma forma de aproximação entre os gestores das áreas, pesquisadores e comunidade, além de buscar evitar a incidência de grandes incêndios. De Carvalho *et al.* (2023) mostraram que antes da implantação do MIF no PNCM em 2014, cerca de 69% da área do parque queimou pelo menos uma vez entre 2010-2013, enquanto que, durante o período de 2014-2017 houve uma

redução de 11%. Portanto, compreender o regime do fogo nas APs pode tornar os programas de MIF mais efetivos, além de agregar mais informações de como os fatores que atuam na ocorrência de queimadas atuam sobre os padrões de regime do fogo, contribuindo para a gestão e monitoramento das APs e um maior sucesso da implantação do MIF dos ecossistemas dependentes do fogo.

A realização da pesquisa possibilitou o registro espaço-temporal do regime de queimada em uma importante região de Cerrado ecotonal (Amazônia-Cerrado), ainda preservada, mas que vem sofrendo com as ações das atividades antrópicas, com pretensão de subsidiar o planejamento ambiental para a otimização das ações de gestão tanto da área do PNCM como a nível mais regional, podendo o estudo ser replicado em áreas que estão no início do processo de manejo e compreensão do regime de fogo, ou na busca por melhorias nas atividades de manejo já existentes. A pesquisa utiliza métodos e ferramentas de geoprocessamento, produtos de sensoriamento remoto e dados de campo para validação do produto da classificação (Figura 2), para colaborar na implementação do uso de ferramentas e métodos que possam contribuir para o aprimoramento de metodologias.

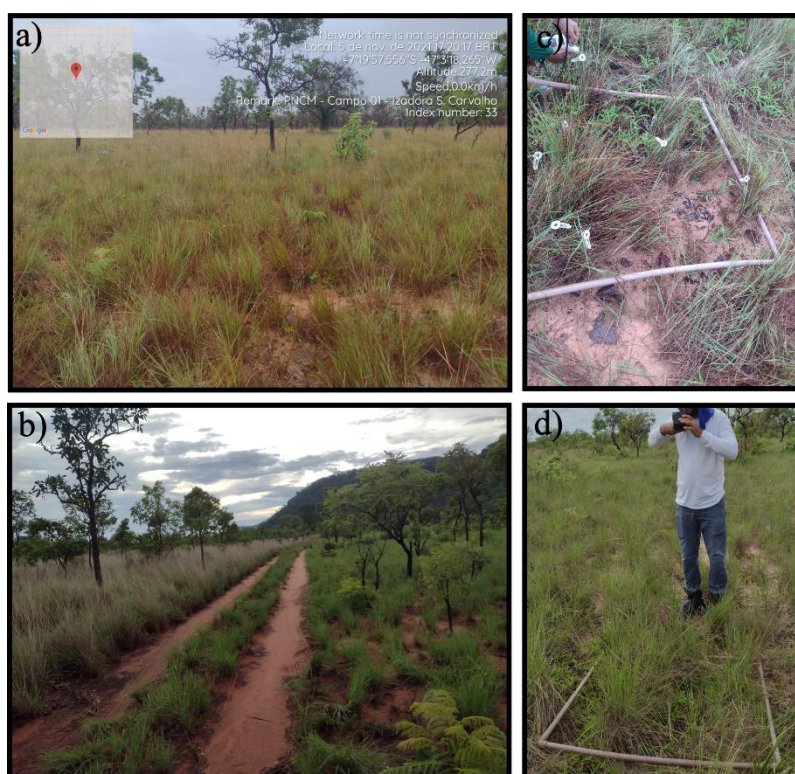


Figura 2. Primeira expedição de campo realizada em novembro de 2021 para reconhecimento das áreas (a e b) e testes de coletas com os equipamentos em campo (c e d).

Através desta pesquisa pretendemos determinar o(s) fator(es) que influenciam os padrões gerais e limiares ecológicos da ocorrência do fogo em área protegida na região norte do Cerrado, zona mais preservada do bioma (Alencar *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021). Além disso, a região encontra-se na área de maior expansão do desmatamento do bioma, denominada MATOPIBA (Silva *et al.*, 2020, 2021). Portanto, nosso estudo busca considerar fatores como os diferentes tipos de vegetação, a estrutura e diversidade arbórea, as condições da biomassa combustível (vegetação herbácea-arbustiva) e as variações microclimáticas, analisando as mudanças espacial-temporais ao longo dos anos, destacando os fatores determinantes desses processos característicos dos ecossistemas savânicos, com contribuições para o manejo desses ambientes frente as dinâmicas das alterações nas fitofisionomias e em seus processos ecológicos.

1.4 Mapeamento do regime de fogo e tipos de vegetação

O mapeamento do histórico de fogo realizado compreende um período de 39 anos (1984-2022). O primeiro mapeamento e estudo dos padrões de regime de fogo para a área do PNCM foi realizado por Carvalho *et al.* (2023), para o período de 1990 até 2017. Portanto, utilizamos a mesma metodologia para completar o histórico de fogo para os anos de 1984-1989 e de 2018-2022 (Figura 3). A base de dados de 1990-2017 pode ser encontrada em <https://zenodo.org/records/10289082> (De Carvalho; Alvarado; Ferraz, 2023).

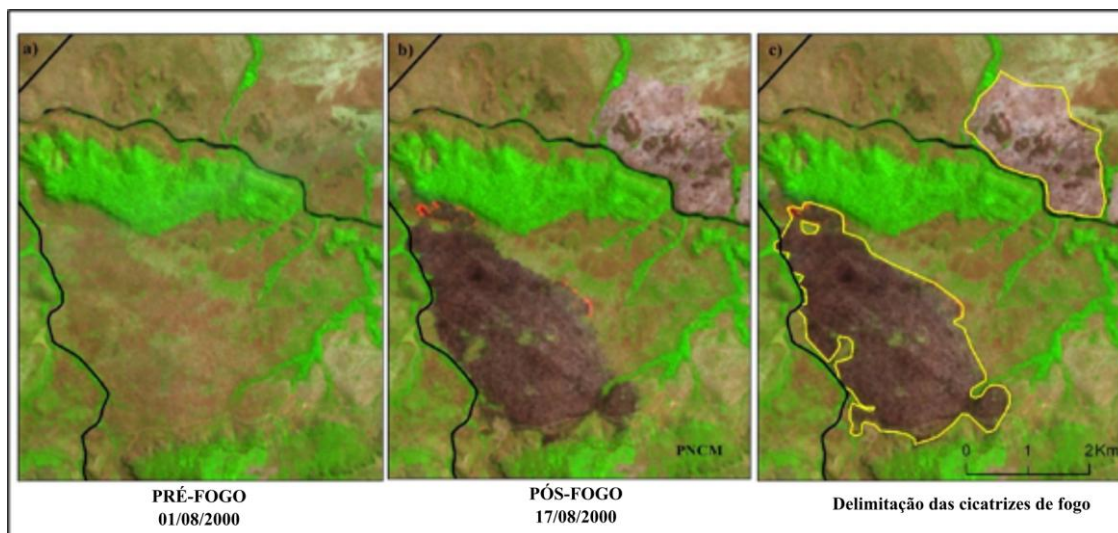


Figura 3. Ilustração do mapeamento manual de cicatriz de área queimada no PNCM. Fonte: De Carvalho *et al.*, 2024.

Para o mapeamento da cobertura vegetal, diferente da classificação realizada por De Carvalho et al. (2024), que utilizou imagens *PlanetScope* com 3,5 metros de resolução espacial e classificou as fisionomias do PNCM para o ano de 2018 (Figura 4), utilizamos uma série temporal de imagens Landsat para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015, 2020 e 2022. O processo de classificação das imagens foi baseado em Machine Learning (Clewley *et al.*, 2014; Shepherd; Bunting; Dymond, 2019) por meio de análise orientada ao objeto utilizando as funções da biblioteca RSGISLib versão 5.0.13 (Bunting *et al.*, 2014; Clewley *et al.*, 2014; Shepherd; Bunting; Dymond, 2019). As classes de vegetação foram definidas segundo Ribeiro e Walter (2008), que descrevem detalhadamente as diversas formações vegetais presentes no bioma Cerrado. Assim, as classes foram definidas em: cerrado aberto, cerrado denso, cerrado rupestre, cerradão terras baixas, cerradão terras altas, mata de galeria e mosaico agricultura e pastagem.

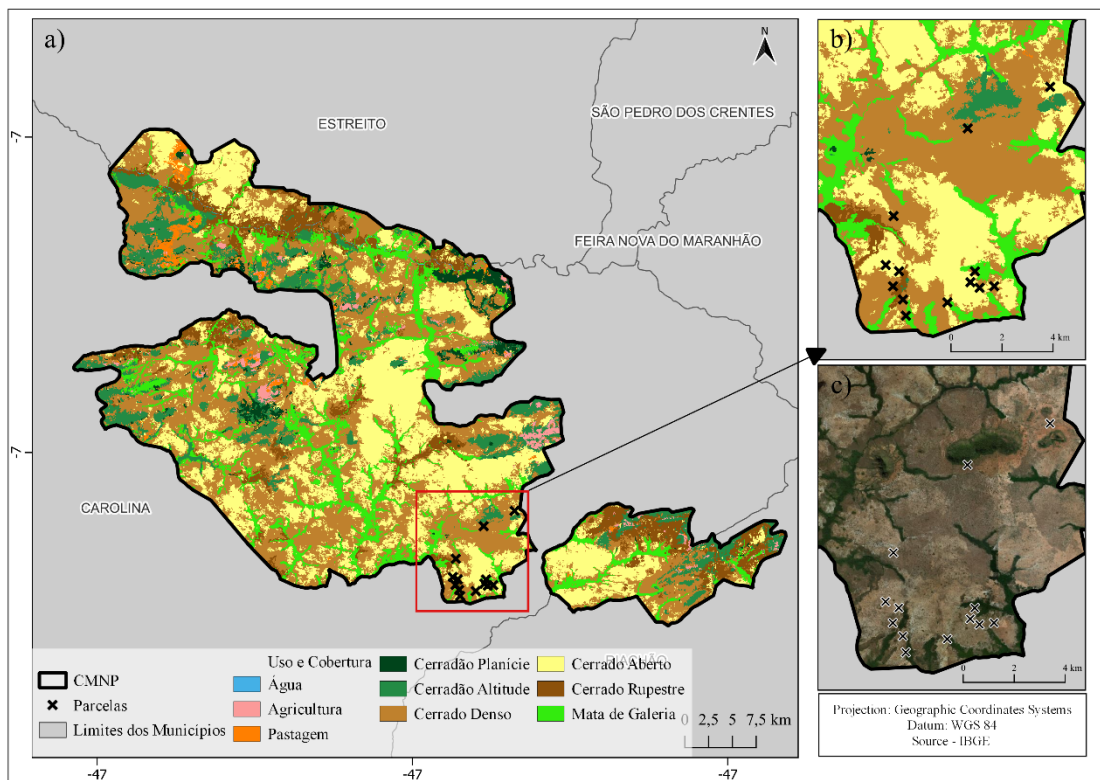


Figura 4. (a) Mapa de fitofisionomias de vegetação do PNCM (De Carvalho *et al.*, 2024). Em destaque as vegetações de cerrado aberto e cerrado denso e locais das parcelas de campo (b e c).

Os produtos classificados para cada ano foram relacionados com diferentes históricos de fogo permitindo investigar a influência do fogo nas fitofisionomias do PNCM ao longo do tempo. Portanto, foram estabelecidas quatro classes de ocorrência de fogo com base em limiares

definidos a partir das ocorrências de fogo durante o período de estudo (Figura 5): frequência baixa – áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada – queimaram de 6-18; frequência alta – áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima. Os resultados fazem parte do Capítulo III (artigo 1) “The influence of fire on the spatial distribution of vegetation types in Amazon-Cerrado transition zone, in northern Brazilian cerrado”.

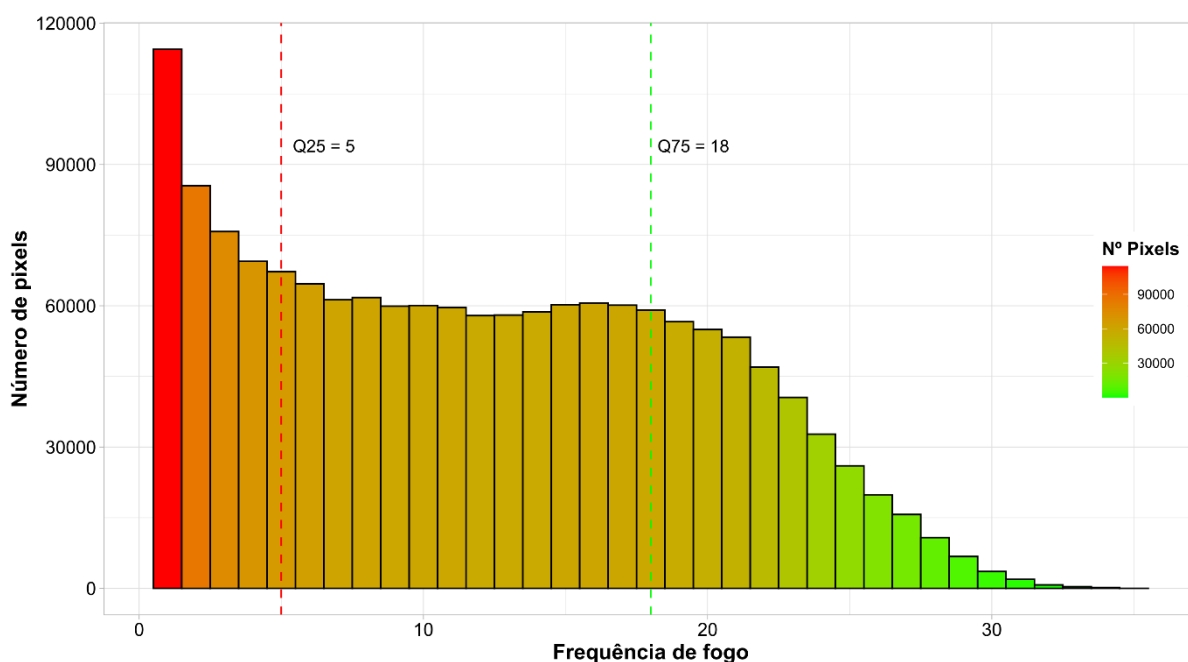


Figura 5. Limiares para determinação das classes de frequência de ocorrência de queimada na área do PNCM a partir do regime de fogo de 1984-2022.

1.5 Dados da vegetação arbórea e métricas biofísicas da vegetação combustível

Os dados de campo foram obtidos por meio de duas expedições que ocorreram em julho de 2022, entre os dias 2 e 4, e em outubro de 2022, entre os dias 20 e 22. As coletas foram realizadas em parcelas estabelecidas na área de estudo, Parque Nacional da Chapada das Mesas, com diferentes históricos de ocorrência de fogo (Tabela 1, Figura 6). As amostras foram distribuídas entre os dois tipos de vegetação onde o fogo é mais frequente: cerrado denso - CD (*woodland savanna* - WS); e cerrado aberto - CA (*open savanna* - OS). As coletas ocorreram no final da estação chuvosa e início da estação seca, compreendendo a dinâmica da biomassa combustível no período de ocorrência de fogo na área do parque. Para a realização das expedições de campo contamos com a autorização do SISBIO/ICMBio (n.º 80449-1) para atividades com finalidade científica, com apoio de guia, gestão do PNCM e equipe de campo.

Tabela 1 - Descrição das classes de históricos de fogo utilizadas no estudo.

Classe	Abreviatura	Descrição
Histórico de Fogo 1	HF1	1 - 2 anos desde a última queima
Histórico de Fogo 2	HF2	3 - 4 anos desde a última queima
Histórico de Fogo 3	HF3	6 - 7 anos desde a última queima
Histórico de Fogo 4	HF4	mais de 10 anos desde a última queima

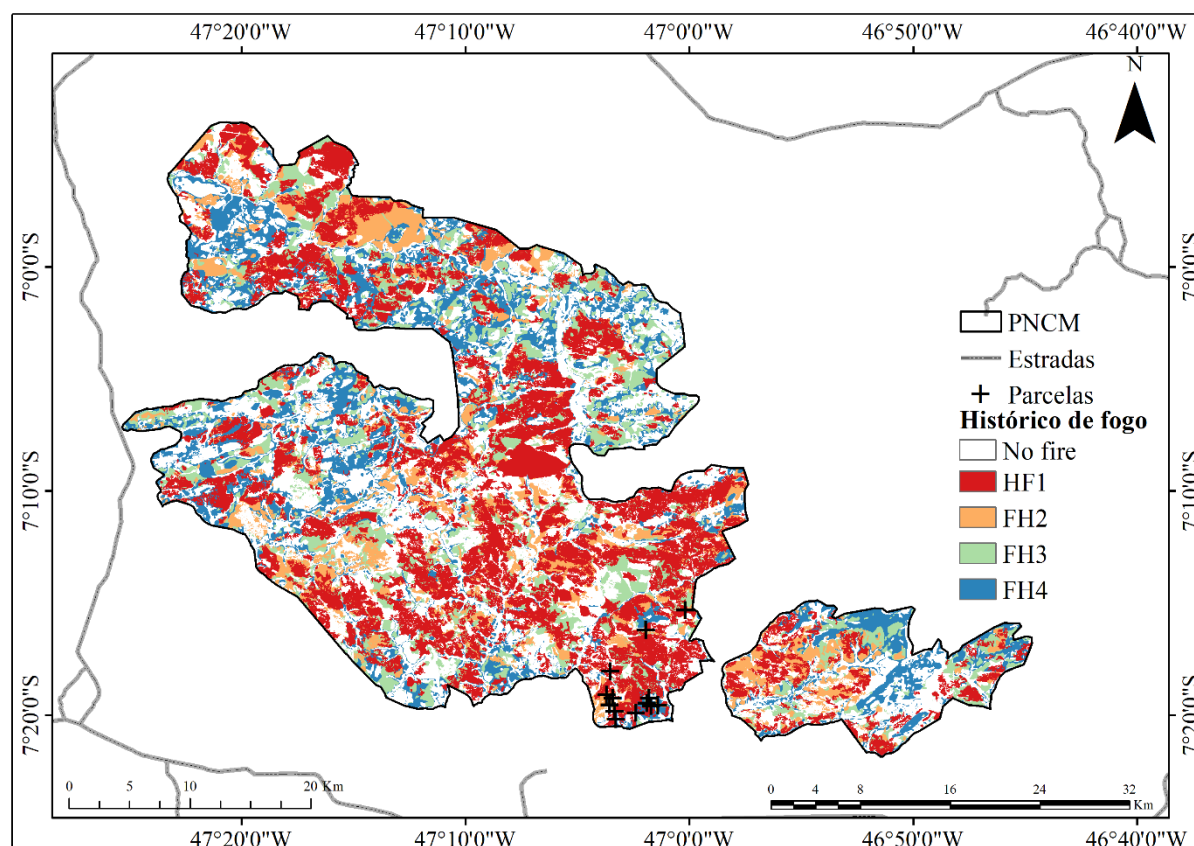


Figura 6. Mapa de classes de histórico de ocorrência de fogo.

Após a identificação dos pontos de coleta a partir da reclassificação do histórico de fogo, com auxílio de GPSMAP 64S (Garmin) em campo, foram instaladas 13 parcelas de inventário de 30x30 metros (900m²) para a coleta de dados de diâmetro, com o auxílio de fita diamétrica, e altura com auxílio do hipsômetro TP 200B MN (Laser Tech), de todas as espécies arbóreas com DAP \geq 5 cm (Figura 4, 7). Os indivíduos foram mensurados e identificados pelo nome popular e posteriormente a nível científico.

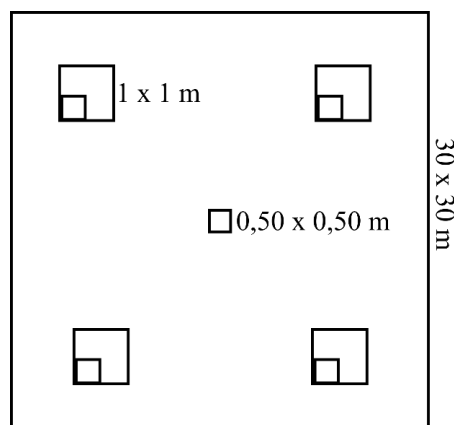


Figura 7. Distribuição e dimensão das parcelas para coleta de dados biométricos dos indivíduos arbóreos (30x30m), dados biofísicos (1x1m) e coleta de biomassa e serrapilheira (0,50x0,50m).

No interior das parcelas de inventário das espécies arbóreas foram instaladas aleatoriamente 4 parcelas de 1x1 metro (1m²) para medição dos dados biofísicos e de temperatura (Figura 7, 8). As avaliações foram realizadas entre 7h:00 - 17h:00 horas. Os parâmetros biofísicos mensurados em campo foram: o rendimento quântico máximo do FSII (Fv/Fm) e o índice fotossintético (PI), medidos com o fluorímetro Pocket PEA (Plant Efficiency Analyser); a intensidade de verde (índice SPAD), coletada com o medidor portátil de clorofila (MPC) SPAD-502 (Minolta, Japão); a temperatura, obtida através de imagens térmicas da parcela registradas com o auxílio da câmera termográfica FLIR E8 Wifi (Teledin Flir); e altura da biomassa, medida com fita métrica. Todos esses dados foram medidos por métodos não destrutivos.

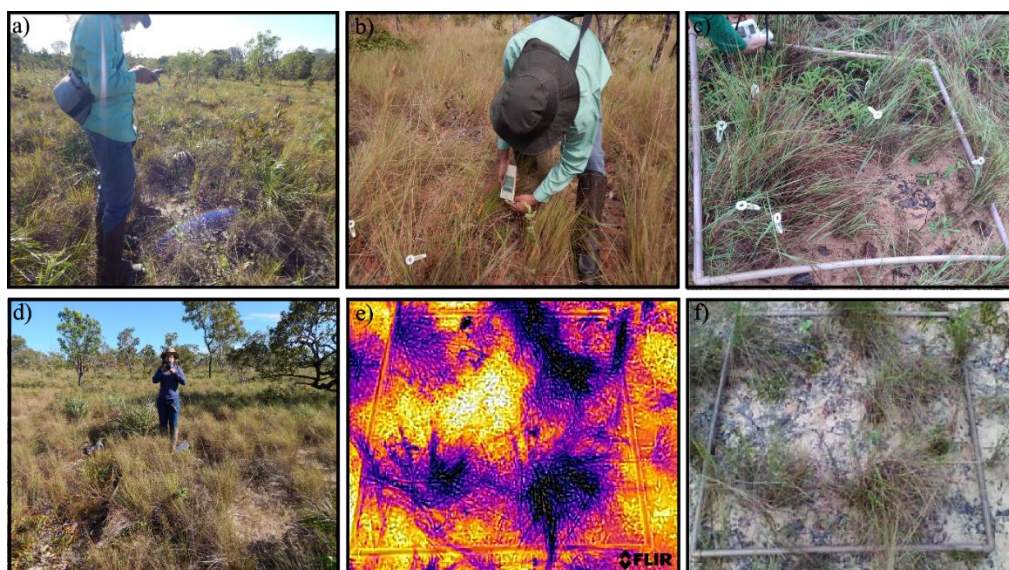


Figura 8. Coletas de dados em campo, com (a) coleta de coordenadas da área das parcelas, (b, c) coleta dados biofísicos com fluorímetro (d) e SPAD (c), (d, e, f) registro de imagens termográficas.

O material combustível de maior inflamabilidade são as espécies do grupo das gramíneas (Simpson *et al.*, 2016), por isso esse grupo foi utilizado para coletar as métricas biofísicas: altura da biomassa, temperatura e atividade fotossintética. Além disso, a biomassa combustível e serrapilheira foram coletadas em parcelas de 0,5x0,5 metros (0.25m²) (Figura 7, 9), baseando-se em metodologia de Cardoso *et al.* (2000). As amostras foram levadas para laboratório onde ocorreu a separação da biomassa (gramínea/herbácea) verde e seca, e após a separação o material foi levado para estufa digital com renovação de ar a 70°C durante 72 horas e depois foi realizado a pesagem (Figura 9).



Figura 9 - Processo de coleta de biomassa em campo, com (a) seleção (aleatória) da área das parcelas, (b, c) coleta de biomassa (gramíneas, herbáceas e serrapilheira), (d, e, f) e separação, pesagem e secagem em laboratório.

1.6 Mapeamento das regiões microclimáticas

Para o mapeamento das regiões microclimáticas do PNCM foi utilizada a base de dados do *TerraClimate* (Abatzoglou *et al.*, 2018), que disponibiliza dados de precipitação acumulada, umidade do solo, temperatura, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento, disponíveis a partir de 1958 com resolução espacial de 4638,3 metros e resolução temporal mensal. A partir da classificação foi realizada uma análise de correlação entre o produto de fogo e de vegetação, buscando analisar os efeitos das condições climáticas na dinâmica espaço-temporal da ocorrência de fogo e distribuição da vegetação.

O objetivo (3) que contempla o capítulo V “Classificação de Regiões Microclimáticas e Caracterização com base no Regime de Fogo e Tipos de Vegetação no Parque Nacional da Chapada das Mesas”.

Além disso, com base nos trabalhos de mapeamento de fogo realizados desde 2017 e em continuidade nesta tese, está em construção o “Manual de Mapeamento de Fogo: uma aplicação na gestão de áreas protegidas no cerrado maranhense” (<https://izadorasc.github.io/Manual-GeMFogo.github.io/>).

A seguir, fluxograma com a estrutura e organização desta tese (Figura 10).

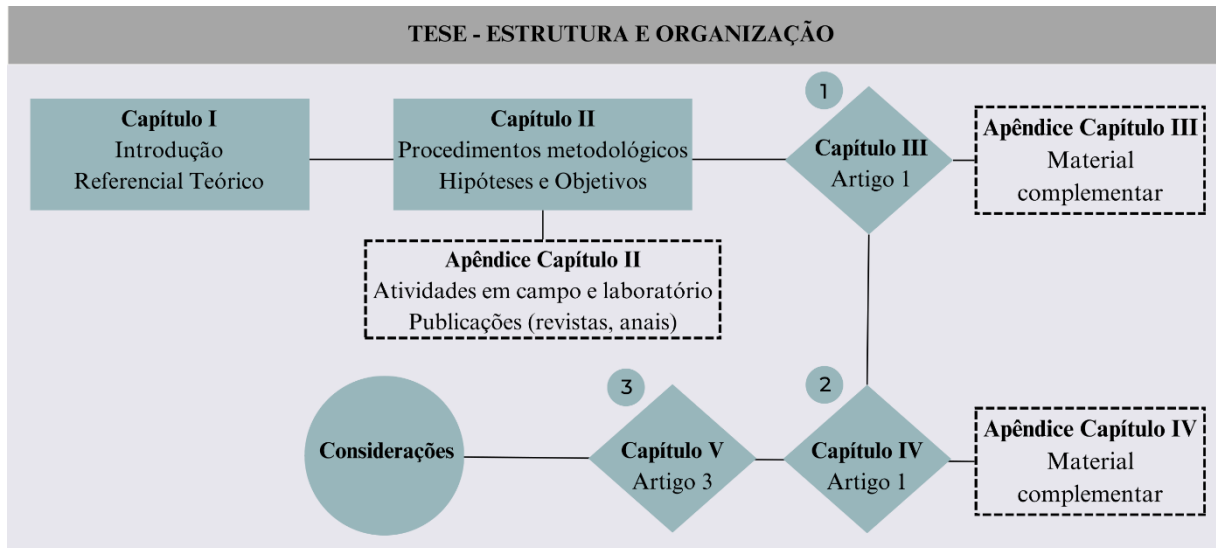


Figura 10 - Fluxograma com a estrutura e organização da tese.

CAPÍTULO III: THE INFLUENCE OF FIRE ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF VEGETATION PHYSIOGNOMIES IN AMAZON-CERRADO TRANSITION ZONE, NORTHERN BRAZILIAN CERRADO

Izadora S. de Carvalho; Swanni T. Alvarado; Paulo Henrique A. Leão; Patrick Costa Silva; Tiago Massi Ferraz.

Artigo a ser submetido na revista: [Landscape and Ecological Engineering](#).

RESUMO

Os ecossistemas de savana são áreas de grande importância ecológica e biodiversidade, caracterizados por uma interação complexa entre clima, fogo e vegetação. Este estudo investiga a relação entre os regimes de fogo e a fitofisionomia dos ecossistemas de savana, com foco específico no Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM), Brasil. A pesquisa analisou 39 anos de dados de fogo, com o uso de imagens de satélite Landsat. Para o mapeamento das fitofisionomias, utilizamos imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat 5 Thematic Mapper (TM) e Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), abrangendo os anos de 1985, 1995, 2005, 2015, 2020 e 2022. Utilizamos a classificação do tipo orientada ao objeto com a biblioteca RSGISLib, envolvendo etapas de obtenção de imagens, segmentação, classificação e validação. Foram consideradas bandas espectrais nas regiões do vermelho, verde, azul, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas, além de índices de vegetação e dados de elevação. Os resultados mostram que áreas com frequência moderada de incêndios são mais comuns e que este regime de fogo tende a favorecer formações de cerrado aberto e cerrado denso. A pesquisa também revelou que a frequência de incêndios afeta significativamente a distribuição das diferentes fitofisionomias. A análise dos produtos de classificação das fisionomias vegetais evidencia uma mudança na distribuição de diferentes tipos de vegetação ao longo do tempo, com implicações para o manejo do fogo e conservação da biodiversidade.

Palavras-chave: Frequência de fogo, Classificação orientada ao objeto, Fisionomias de Savana, Ecossistemas de Savana.

ABSTRACT

Savanna ecosystems are areas of significant ecological importance and biodiversity, characterized by a complex interaction between climate, fire, and vegetation. This study investigates the relationship between fire regimes and the vegetation physiognomy of savanna ecosystems, mainly focusing on the Chapada das Mesas National Park (CMNP), Brazil. The research analyzes 39 years of fire data, using Landsat satellite images. To map the vegetation physiognomies, we used surface reflectance images from the Landsat 5 Thematic Mapper (TM) and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) satellites, covering the years 1985, 1995, 2005, 2015, 2020, and 2022. We used object-oriented classification with the RSGISLib library, involving the steps of image acquisition, segmentation, classification, and validation. Spectral

bands in the red, green, blue, near-infrared, and shortwave infrared regions were considered, as well as vegetation indices and elevation data. The results show that areas with moderate fire frequency are more common, and this fire regime tends to favor open savanna and dense savanna formations. The research also revealed that the frequency of fires significantly affects the distribution of the different vegetation physiognomies. Analysis of vegetation classification products shows a change in the distribution of different vegetation types over time, with implications for fire management and biodiversity conservation.

Keywords: Fire Frequency, Object-oriented classification, Savanna physiognomies, Savanna ecosystems.

1 INTRODUCTION

The vegetation physiognomies of savanna ecosystems developed with fire over a million years ago (Pivello, 2011). Research on the evolution of species in response to fire highlights various adaptation mechanisms, such as roots with high regrowth capacity, post-fire flowering, thick tree bark for protection, and seed dormancy mechanisms, among others (Ribeiro; Walter, 2008). These adaptations are crucial for the survival and maintenance of these ecosystems (Pivello *et al.*, 2021). Globally, savanna ecosystems occupy approximately 20% of the global territory, occurring to a greater extent on the continents of Africa, South America, and Oceania (Australia) (Archibald *et al.*, 2013; Lehmann *et al.*, 2014; Scholes & Archer, 1997). These ecosystems rely on fire to maintain their ecological processes and have other names, such as Cerrado and Caatinga in Brazil and Miombo in Angola (Eamus; Huete; Yu, 2016).

Savannas are characterized by extreme edaphoclimatic conditions, such as high temperatures, low rainfall, and soils with low natural fertility. These conditions may influence the fire regime as well as the structure and composition of the vegetation (Archibald *et al.*, 2018; Ribeiro & Walter, 2008). Despite these adverse conditions, savanna regions stand out for their high biodiversity and heterogeneity of vegetation type.

Savanna ecosystems, such as the Brazilian cerrado, have great plant physiognomic heterogeneity, alternating between forest (forest formation - *cerradão* and gallery forests), savanna (woodland savanna, open savanna, and rupestrian savanna), and grassland (Ribeiro; Walter, 2008). According to 2017 mapping data, approximately 11% of the Cerrado area comprises grassland physiognomies, 19% forest physiognomies, and 26% savanna physiognomies (Alencar *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2020). The origin of these formations is explored through various theories, highlighting key factors such as climate, anthropogenic

actions, particularly the use of fire, which also occurs naturally, and the influence of topographical characteristics (Ribeiro; Walter, 2008).

Changes in the characteristics of fire regimes, such as frequency, seasonality, and intensity, significantly influence the distribution, structure, and dynamics of vegetation (Bond & Keeley, 2005). Our research aims to understand whether changes in fire dynamics over time could determine the type of existing vegetation through the effects of different fire frequencies. Specifically, we investigate two main hypotheses: (i) high fire frequencies promote the presence of open formations over forested formations, and (ii) whether the absence of fire events may lead to the growing density of open physiognomies.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Study Area

The Chapada das Mesas National Park (CMNP) is the designated study area for this research. It is situated in the transition zone between the Amazon and the Brazilian Cerrado, encompassing 160,048 hectares (Figure 1). The region is characterized by a tropical humid climate with two distinct seasons: a dry season from May to October and a wet season from November to April (Lima *et al.*, 2007). The CMNP presents a highly heterogeneous landscape due to its diverse topography, various vegetation types, and richness of its water resources. This results in a mosaic of high biodiversity and different fire histories, making it an ideal location to study the effects of fire regimes on vegetation structure and dynamics (Ferraz *et al.*, 2020; De Carvalho *et al.*, 2023).

2.2 Mapping the Fire Regime History

The CMNP has a documented history of fire regimes for its internal area and surroundings, covering the years 1990 to 2017, totaling 28 years (De Carvalho *et al.*, 2023). The 1990-2017 database could be found at <https://zenodo.org/records/10289082> (De Carvalho; Alvarado; Ferraz, 2023). For the present study, fire regime mapping was extended to cover a 39-year period (1984–2022). To complete this historical series, we followed the methodology outlined by De Carvalho *et al.* (2023). This approach utilized satellite images from the Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI), each providing a spatial resolution of 30 meters. Image access

and fire mapping were conducted using the Google Earth Engine platform (<https://code.earthengine.google.com>) (Gorelick *et al.*, 2017) and QGIS software version 3.22.14 (QGIS Development Team, 2023). The study area is located within the scenes of orbits/paths 222–65 and 221–65, Datum WGS84. This large dataset provides an in-depth analysis of changes in the fire regime and their impact on the park's vegetation over an extensive period.

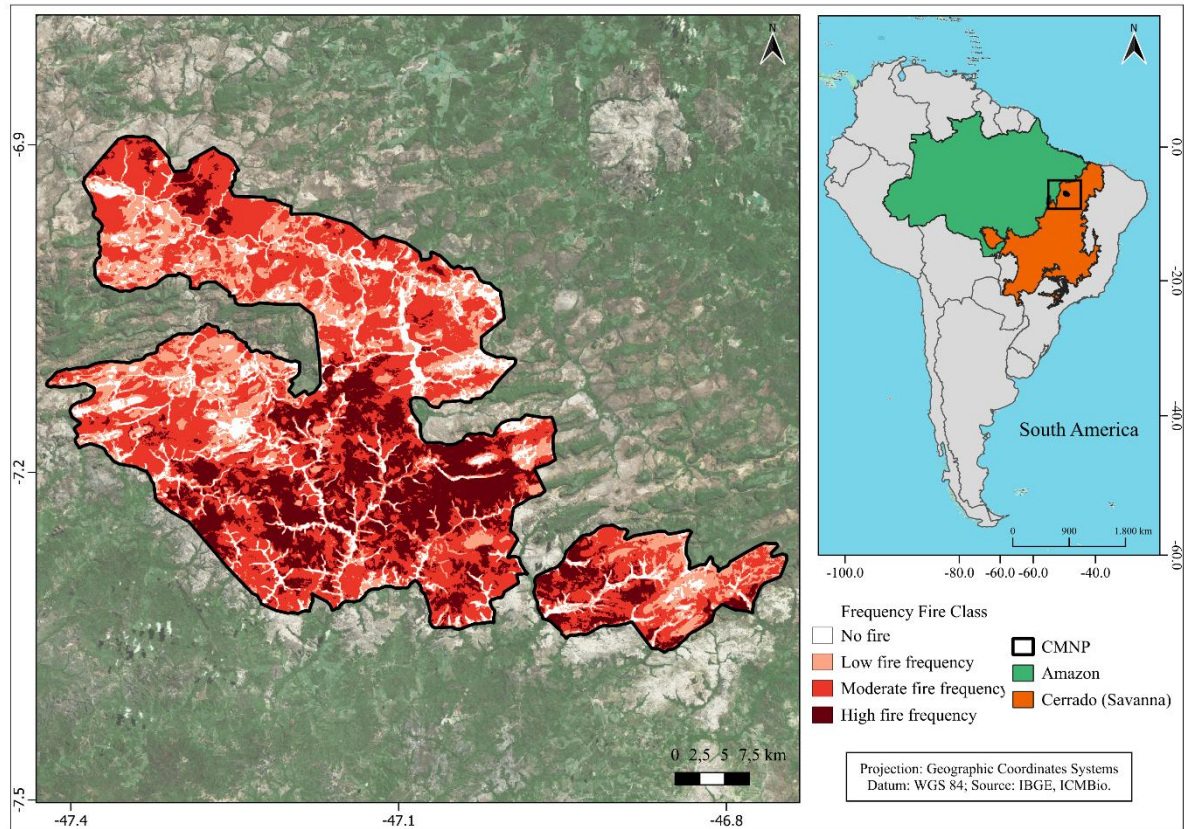


Figure 1 - Location of the study area, the Chapada das Mesas National Park - CMNP, transition zone between the Cerrado (savanna) and the Amazon. Fire frequency regime considering the historical series 1984 – 2022: Low fire frequency (LF): 1-5 fire events; Moderate fire frequency (MF): 6-18 fire events; High fire frequency (HF): more than 18 fire events over the 39-year; and No fire (NF): without event fire.

2.3 Spatio-temporal Assessment of Vegetation Cover

We used surface reflectance images from the Landsat 5 Thematic Mapper (TM) and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) satellites. The temporal series covers the years 1985, 1995, 2005, 2015, 2020, and 2022. The spectral bands utilized were from the red, green, blue, and shortwave infrared regions. The classification process was based on object-oriented

analysis using the RSGISLib – Remote sensing and GIS software library version 5.0.13 (Bunting *et al.*, 2014; Clewley *et al.*, 2014; Shepherd; Bunting; Dymond, 2019).

The classification process was divided into four general steps: image acquisition, segmentation, classification, and validation. For each year, the data cube generated consisted of 15 bands: six bands (blue, green, red, NIR, SWIR1, SWIR2) were generated from the median of images during the wet season, six bands for the dry season, two bands corresponding to the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the two seasons (NDVI-wet, NDVI-dry), and one band from the digital elevation model (DEM) – Alos World 3D (AW3D30) with a resolution of 30 meters (Tadono *et al.*, 2016).

Our mapping and classification of the CMNP physiognomies were based on the vegetation classes defined by Ribeiro and Walter (2008), which include the following classes: open savanna, woodland savanna, rupestrian savanna, highland forest formation, lowland forest formation, gallery forest, and agricultural and pasture mosaic (Table 1). In the CMNP area, there is only one major watercourse visible in satellite imagery, which requires the use of a mask, as the other watercourses are covered by vegetation (gallery forest). Due to the CMNP topographical characteristics, the forest formation class was further divided into "lowland forest formation" and "highland forest formation".

Table 1 – Vegetation types classes used for mapping land cover in the Chapada das Mesas National Park, Brazilian Cerrado, between 1985 and 2022, using Landsat historical data, NDVI, and digital elevation model.

Vegetation types class	Description
Open Savanna	Areas with open shrub and sub-shrub vegetation, predominantly herbaceous-shrub, with a canopy varying from 20 to 50%, average vegetation height of 3 to 6 meters. In portuguese: cerrado aberto.
Woodland Savanna	Areas with open shrub and sub-shrub vegetation, predominantly tree-shrub, with a canopy varying from 50 to 70% and an average vegetation height of 5 to 8 meters. In portuguese: cerrado denso.
Rupestrian Savanna	Tree-shrub vegetation, occurring in rocky environments, with tree cover varying between 5% and 20% and an average height of 2 to 4 meters. In portuguese: cerrado rupestre.
Highland Forest Formation	Areas with species from both the forest, with tree cover of 50 to 90% and trees with an average height of 8 to 15 meters, located on mountain tops or areas with higher altitude and elevation. In portuguese: cerradão terra altas.
Lowland Forest Formation	Areas with species from both the forest, with tree cover of 50 to 90% and trees with an average height of 8 to 15 meters, located in areas with lower altitude and elevation. In portuguese: cerradão terras baixas.

Gallery Forest	An area with vegetation associated with watercourses, with 70 to 95% tree cover and average tree heights ranging from 20 to 30 meters. In portuguese: mata de galeria, mata riparia.
Agriculture and Pasture Mosaic	Areas used for agriculture, pasture and/or crops.

Considering the seasonal period of vegetation in the mapping of Cerrado physiognomies allows for better classification results, especially when considering the heterogeneity of the study area (Hansen *et al.*, 2014). The seasonal periods considered were January–June (the wet season) and July–October (the dry season). For the most recent classification (2022), field samples were collected using a GPSMAP 64S (Garmin) to serve as reference data for interpreting and validating the results.

The code for producing the object-oriented classification results of this study includes all steps from data acquisition (Google Earth Engine Python API), segmentation, classification, and validation of the products. This code is available at https://github.com/IzadoraSC/obia_classification_vegetation, enabling reproducibility for other areas of interest where existing land use and cover classification products at different scales do not meet the study's needs.

2.3.1 Image Segmentation

For the image segmentation process, we utilized only the spectral bands, totalling 12 bands (dry season = 6 bands, and wet season = 6 bands) per image for each year (Figure 2). The algorithm employed in this step was the Shepherd segmentation, implemented in the RSGISLib (Bunting *et al.*, 2014; Shepherd; Bunting; Dymond, 2019). The two main parameters required by the segmenter were set: a minimum segment size of 40 pixels and an initial number of clusters of 900. These parameter values were determined through extensive segmentation testing, taking into account the characteristics of the Landsat satellite imagery used (spatial and spectral resolution). This approach ensured a balance between segmentation accuracy and computational complexity, specifically adapted for the savanna ecosystems studied.

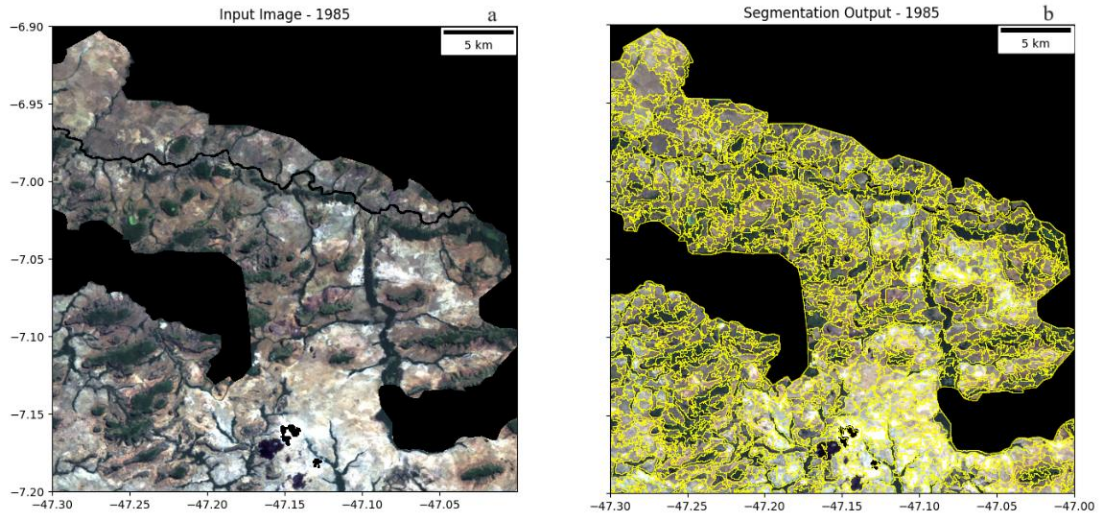


Figure 2 - Input data (a) and segmentation results for 1985 (b). The input data includes spectral images with bands: blue, green, red, NIR, SWIR1, and SWIR2 for two seasonal periods within the year. Figure (b) shows the results of the segmentation process in yellow.

2.3.2 Image Classification

In the classification process, we utilized the raster image with 15 bands. The data were normalized using a linear min-max normalization process to harmonize the scales of the spectral bands, NDVI and elevation bands. Samples were collected from points on the image and subsequently used to extract the segments produced in the segmentation step. We divided the total samples into proportions of 70% for classification and 30% for validation to ensure independent sample sets; where around 300 points were for classification and 130 for validation, covering the entire extent of the classified area, considering each mapped class and each year. The Random Forest classifier, chosen for its robustness and accuracy, was employed from the Scikit-learn library, in conjunction with the RSGISLib library (Clewley *et al.*, 2014).

2.3.3 Validation of Classification

The classification validation was performed using algorithms from the Scikit-learn library, generating several evaluation metrics to assess classification accuracy. These metrics included global accuracy, Cohen's Kappa coefficient, F1-score, and producer and user's accuracy. The producer's accuracy and user accuracy give insights into the accuracy from the perspectives of the map classification and the omission and commission error, respectively (Olofsson *et al.*, 2014). These metrics were chosen to provide a comprehensive assessment of the classification performance, ensuring robust and accurate results.

The validation process also made use of existing products as a point of reference, such as the dataset from the RADAMBRASIL project (Programa RADAM BRASIL, 1973) and the land user and land cover products from the MAPBIOMAS project, available from 1985 onwards (Souza *et al.*, 2020). By utilizing these datasets, it was possible to establish a reliable basis for comparing the classified results and ensuring their precision.

2.4 Relationship Between Fire Frequency and Vegetation Types

Determining the frequency thresholds for the CMNP regime between 1984-2022, 4 levels of fire frequency were defined: Low Frequency (LF) - from 1 to 5 occurrences of fire; Moderate Frequency (MF) - from 6 to 18 occurrences; High Frequency (HF) - above 18 occurrences; and No Fire (NF) - no record of burning. These thresholds were established based on observed fire patterns within the study area. Using the reclassified fire frequency raster and the rasters of the vegetation cover rasters generated from the classification, we analyzed the relationships between the different frequencies within each mapped physiognomy class. The fire frequency raster was interpolated with the vegetation cover raster to enable this analysis.

The software used to analyze the relationships between the fire and vegetation was: QGIS version 3.22.14 and the R program version 4.2.2 (R Core Team, 2023). The R packages employed were OpenLand version 1.0.2 (Exavier & Zeilhofer, 2021), terra version 1.7-65 (Hijmans, 2023), dplyr version 1.1.4 (Wickham *et al.*, 2023), stringr version 1.5.1 (Wickham, 2023) and ggplot2 version 3.4.4 (Wickham, 2016).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Mapping the Fire Regime History

The mapping of fire history resulted in products that make it possible to describe the spatio-temporal patterns of fire occurrence. Through the analysis of burned areas from 1984 to 2022 (Figure 3), it was observed that 1428.29 km² (89%) of the study area experienced at least one fire event. This finding is greater than that of De Carvalho *et al.* (2023), who noticed that 1377.24 km² (86%) of the area burned at least once during 1990-2017. Our result shows that the time period of historical fire mapping can detect different amounts of fire. Thus, extending the temporal record of mapped fire history provides more comprehensive information about the patterns of burning dynamics (Chuvieco *et al.*, 2019; Schmidt *et al.*, 2018).

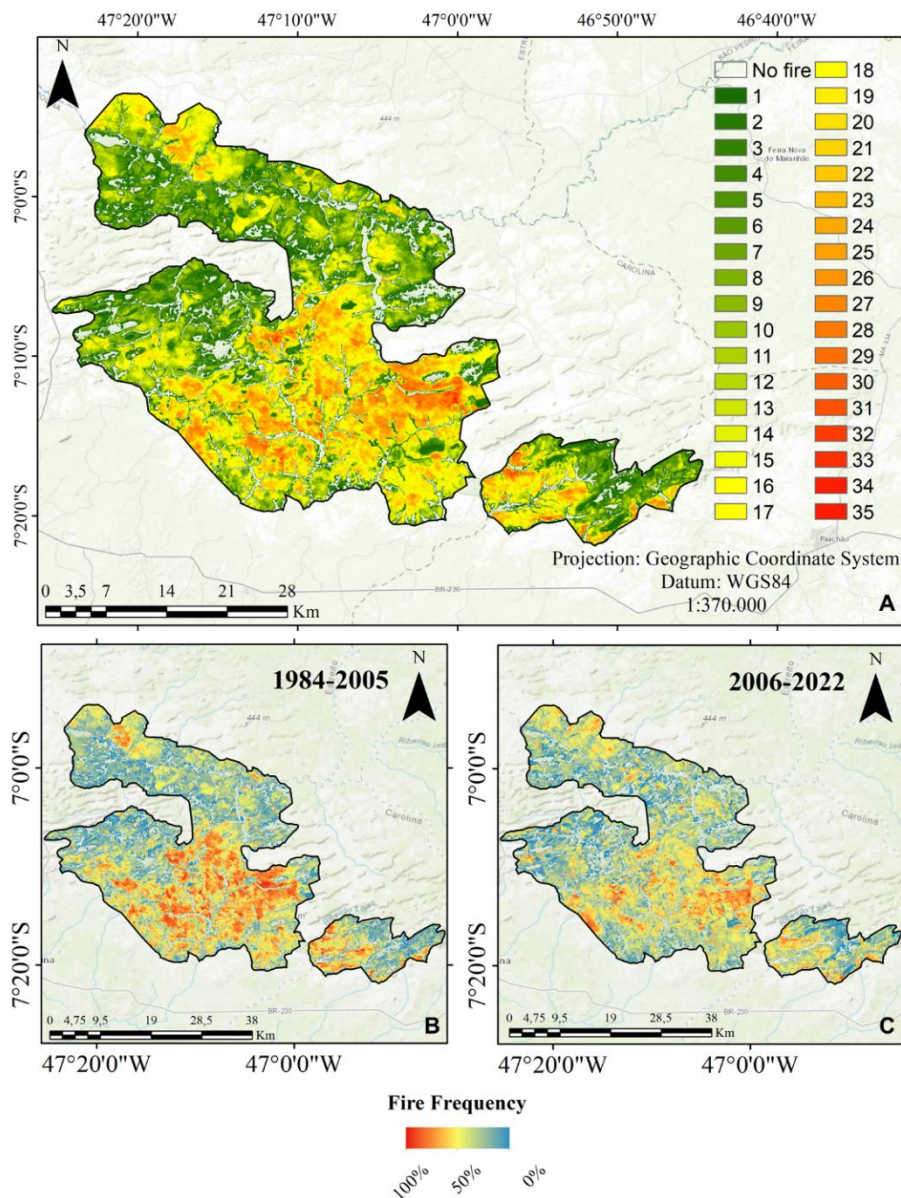


Figure 3 - Recurrence map of fires for the period 1984 to 2022 (39 years) in Chapada das Mesas National Park (A). Frequency of fires before the creation of the CMNP for the period 1984-2005 (22 years) (B), and after creation for the period 2006-2022 (17 years) (C). Raster dataset of the 1990 to 2017 by Carvalho et al. (2023), available at <https://zenodo.org/records/10289082>.

When analyzing the frequency patterns for the defined classes (Figure 1), considering the total period of 39 years, we found that approximately 24% (377 km²) of the study area had a LF (1 to 5 fire events), 45% (713 km²) had a MF (6 to 18 fire events), 21% (338 km²) had a HF (over 18 fire events), and 11% (172 km²) of the area had NF events. In general, we observed that the largest percentage of the area had a moderate frequency. When we compare this with the study carried out by Silva et al. (2021), in which they analyzed fire patterns for the ecoregions of the Cerrado and categorized the parameters analyzed into low, moderate and high

classes, we see that the ecoregion in which our study area is located had a moderate classification for the parameters of burned area and fire intensity and a high classification for the size of fire scars. The heterogeneity of the distribution of fire occurrence patterns could be observed at different scales (Alvarado *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2021), which demonstrates the importance of considering not only regional but also local aspects due to the more effective implications of local aspects in management actions and conservation policies.

3.2 Spatio-temporal Assessment of Vegetation Cover

Currently, there are various products for land use and land cover products accessible at both global and regional scales (Brown *et al.*, 2022; Buchhorn *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021). Nevertheless, when applied locally, these products can fail to capture some information about the existing cover classes. In order to obtain a more accurate classification of the vegetation physiognomies present in the study area, we mapped them using object-oriented classification, based on Landsat satellite images, vegetation index, and digital elevation model, for the years 1985, 1995, 2005, 2015, 2020 and 2022. The resulting vegetation type mappings demonstrated overall accuracy values of 0.61, 0.62, 0.71, 0.78, 0.69 and 0.76, respectively (Table 2). Notably, the images from the OLI sensor exhibited superior quality metrics, likely due to the differences between the Landsat 8/OLI and Landsat 5/TM sensors (Vermote *et al.*, 2016).

Table 2 - Validation metrics for vegetation cover mapping. Producer's and user's accuracy metrics for the different mapped classes and general product metrics classified as overall accuracy and Cohen's Kappa.

Classes / Year	Producer's Accuracy (%)						User's Accuracy (%)					
	1985	1995	2005	2015	2020	2022	1985	1995	2005	2015	2020	2022
Open Savanna	81,3	80,0	86,7	82,4	90,0	80,0	76,5	70,59	92,9	100,0	85,7	94,1
Woodland Savanna	53,3	33,3	80,0	86,7	46,7	93,3	44,4	33,33	70,6	56,5	58,3	63,6
Rupestrian Savanna	60,0	83,3	53,3	60,0	60,0	93,3	69,2	76,92	57,1	75,0	81,8	82,4
Highland Forest Formation	66,7	61,9	57,1	52,4	57,1	59,1	50,0	59,09	63,2	78,6	52,2	65,0
Lowland Forest Formation	26,7	60,0	46,7	80,0	37,5	52,9	23,5	42,86	46,7	52,2	28,6	47,4
Gallery Forest	80,0	71,9	84,8	90,9	93,9	87,9	82,4	79,31	82,4	96,8	93,9	96,7
Agriculture and Pasture	28,6	33,3	76,9	84,6	66,7	60,0	80,0	80,00	71,4	91,7	71,4	75,0
Mosaic												
Classes /Year	Overall Accuracy						Cohen's Kappa					
	1985	1995	2005	2015	2020	2022	1985	1995	2005	2015	2020	2022
Geral	0,61	0,62	0,71	0,78	0,69	0,76	0,53	0,55	0,65	0,73	0,63	0,72

The open savanna and gallery forest classes demonstrated the highest f1-score, producer's accuracy and user's accuracy, indicating the lowest errors (Tables 2 and 3). Conversely, the highland forest formation and lowland forest formation classes showed the lowest values for these metrics, with higher omission and commission errors and considerable confusion between them. We utilized the digital elevation model band to identify differences between the occurrence areas of forest formations in regions with significant elevation variations. Despite the similarity in the spectral response between these classes, we believe that the use of this band contributed to the separation of the forest classes in our classified products.

Table 3 - F1-score metrics for the different mapped classes.

Class / Year	f1-score					
	1985	1995	2005	2015	2020	2022
Open Savanna	0,79	0,75	0,90	0,90	0,88	0,86
Woodland Savanna	0,48	0,33	0,75	0,68	0,52	0,76
Rupestrian Savanna	0,64	0,80	0,55	0,67	0,69	0,87
Highland Forest Formation	0,57	0,60	0,60	0,63	0,55	0,62
Lowland Forest Formation	0,25	0,50	0,47	0,63	0,32	0,50
Gallery Forest	0,81	0,75	0,84	0,94	0,94	0,92
Agriculture and Pasture Mosaic	0,42	0,47	0,74	0,88	0,69	0,67

The spatio-temporal distribution analysis of the mapped physiognomies reveals a higher prevalence of open savanna and woodland savanna formations within the study area (Figure 4). Throughout the time series, the open savanna class occupies between 31% and 34% (498 km² and 543 km²) of the total area, while the woodland savanna class covers between 25% and 30% (411 km² and 488 km²) of the mapped territory. Combined, the highland forest and lowland forest formations occupy between 14% and 18% (212 km² and 274 km²), and the gallery forest covers 10% to 11% (159 km² and 178 km²).

Therefore, our results highlighted that the savanna formations (Open savanna, Woodland savanna, and rupestrian savanna) occupy most of the territory to the detriment of the forested formations (gallery forest, highland forest formation, and lowland forest formation), in addition to highlighting the mosaic of different types of vegetation present in the study area, this is a typical feature in Savanna protected areas (Ribeiro & Walter, 2008; Souza *et al.*, 2020). The study region is an important stronghold of native Cerrado vegetation that still remains, contributing to the coverage of natural areas, being a refuge for species of animals and plants, archaeological site, and many springs of rivers (Ferraz *et al.*, 2020; Silva; Araujo; Da

Conceição, 2019). This demonstrates the importance of protected areas for preservation and conservation of socio-environmental biodiversity.

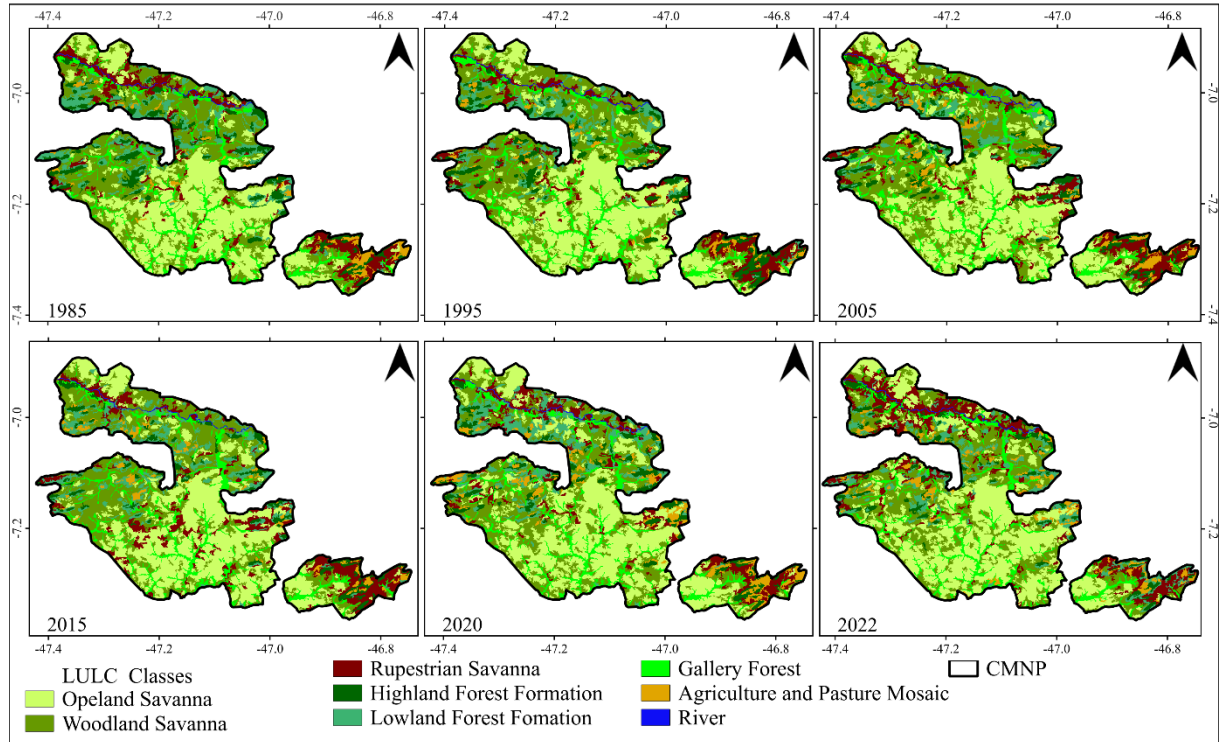


Figure 4 - Land use and cover mapping of the CMNP between the years 1985-2022, showing the classes of existing vegetation physiognomies and agriculture and pasture areas.

From 1985 to 2022, there was an increase from 498.2 km² to 543.0 km² (8%) in the extent of the open savanna class and a decrease in the woodland savanna class from 487.6 km² to 418.0 km² (14.3%), the majority of which changed to the open savanna class (Figure 5 - Appendix). The areas of highland forest formation and lowland forest formation showed a decrease from 124.5 km² to 71.0 km² (43.0%) and 147.3 km² to 141.0 km² (4.3%), respectively, where the areas moved to other classes, mainly for the agriculture and pasture mosaic class. This pattern may be related to the quality of the soils in these areas, which have greater availability of nutrients and organic matter when compared to the soils in areas of less dense and open vegetation. They are therefore used by the traditional community to form crops (Silva; Araújo; Conceição, 2019).

The gallery forest class was the least affected by conversions to other types of physiognomies, from 165.1 km² to 164.0 km², a 0.7% decrease, and it also showed good metrics for validating the classification. Gallery forest is an extremely important physiognomy closely associated with water resources and is generally considered within the general class of forest

formation in other mapped classification products (Ribeiro & Walter, 2008; Souza et al., 2020).(Ribeiro & Walter, 2008; Souza *et al.*, 2020).

3.3 Relationship Between Fire Frequency and Vegetation Types

The Brazilian cerrado was characterized into 19 ecoregions by Sano et al. (2019) based on biophysical characteristics (soil, climate, and topography). However, Silva et al. (2021) incorporated more information about the ecoregions, inserting fire regime data for the period 2001-2019 for each ecoregion, such as burned area, scar size, fire intensity, and evolution of the burned area. This demonstrates the importance of considering the fire factor to improve the classification and mapping of Cerrado ecoregions. However, the authors themselves point out that ecoregional mapping can hide fire patterns within each ecoregion.

By analyzing the fire frequency classes and their relationship with the different types of plant physiognomies, we could demonstrate the distribution of fire patterns according to the spatiotemporal characteristics worked on in this study. Thus, our results show that in areas with low fire frequency (LF), fire occurs predominantly in the woodland savanna physiognomy (Figure 5A). The pattern of moderate frequency (MF) of fire events, with both open savanna and woodland savanna physiognomies, stands out from the rest (Figure 5B). In general, they occur in 45% of the study area. However, for the high fire frequency (HF) regions, the open savanna physiognomies are where this fire regime pattern occurs the strongest (Figure 5C).

The fire regime pattern with LF is more common in denser physiognomies, such as woodland savanna. After 2015, there was a decrease in the area burned with LF and also in MF scenarios. In areas of woodland savanna where no fire events occurred (NF), there was constancy during the historical series, just like the other vegetation classes (Figure 5D).

The physiognomies of highland forest formation, lowland forest formation, gallery forest, rupestrian savanna, and agriculture and pasture mosaic had a greater contribution to occurrence in the LF or NF regime. In these scenarios, some factors might contribute to the results found, such as the regeneration dynamics and type of vegetation, the low availability of combustible biomass, and a predominance of tree cover, which means they are less susceptible to fires. However, fire, mainly of anthropogenic origin, occurs in forest formations because they are areas used for agricultural activities, and the way in which areas are cleared for cultivation is generally through the use of fire (Lima *et al.*, 2007; Silva; Araújo; Conceição, 2019).

In the CMNP, since the creation of the protected area in 2005, or earlier, the region has not had zero fire policies, which can result in the loss of biodiversity and the heterogeneity of vegetation physiognomies typical of the Cerrado. In 2014, the CMNP was one of the first to start implementing integrated fire management in protected areas of the Cerrado biome (Durigan, 2020; Schmidt *et al.*, 2018). This may be one of the reasons why, based on our results, we didn't observe a strong trend of change in physiognomies from savanna (Open and Woodland) to forest (lowland forest formation and highland forest formation), for the unburned scenarios of the period analyzed (Figure 5D). However, approximately 3.3% (1 km²) of the total open savanna areas that were unburned in 1985 (33.3 km²) changed to forest physiognomies, while approximately 11% (3.2 km²) of the total woodland savanna areas that were unburned in 1985 (30.17 km²) changed to forest physiognomies (Figure 5D).

Finally, the open savanna physiognomies had less oscillation between the years within each fire frequency class, with great highlights in the HF scenario, as well as in the MF regions, along with the dense savanna and rupestrian savanna formations. However, they tend to exhibit greater stability in burned areas over time for each fire class. Our results highlight the importance of analyzing fire patterns at finer mapping scales, considering local spatial characteristics and the diverse plant physiognomies that form the biodiversity mosaic of the Cerrado ecoregions.

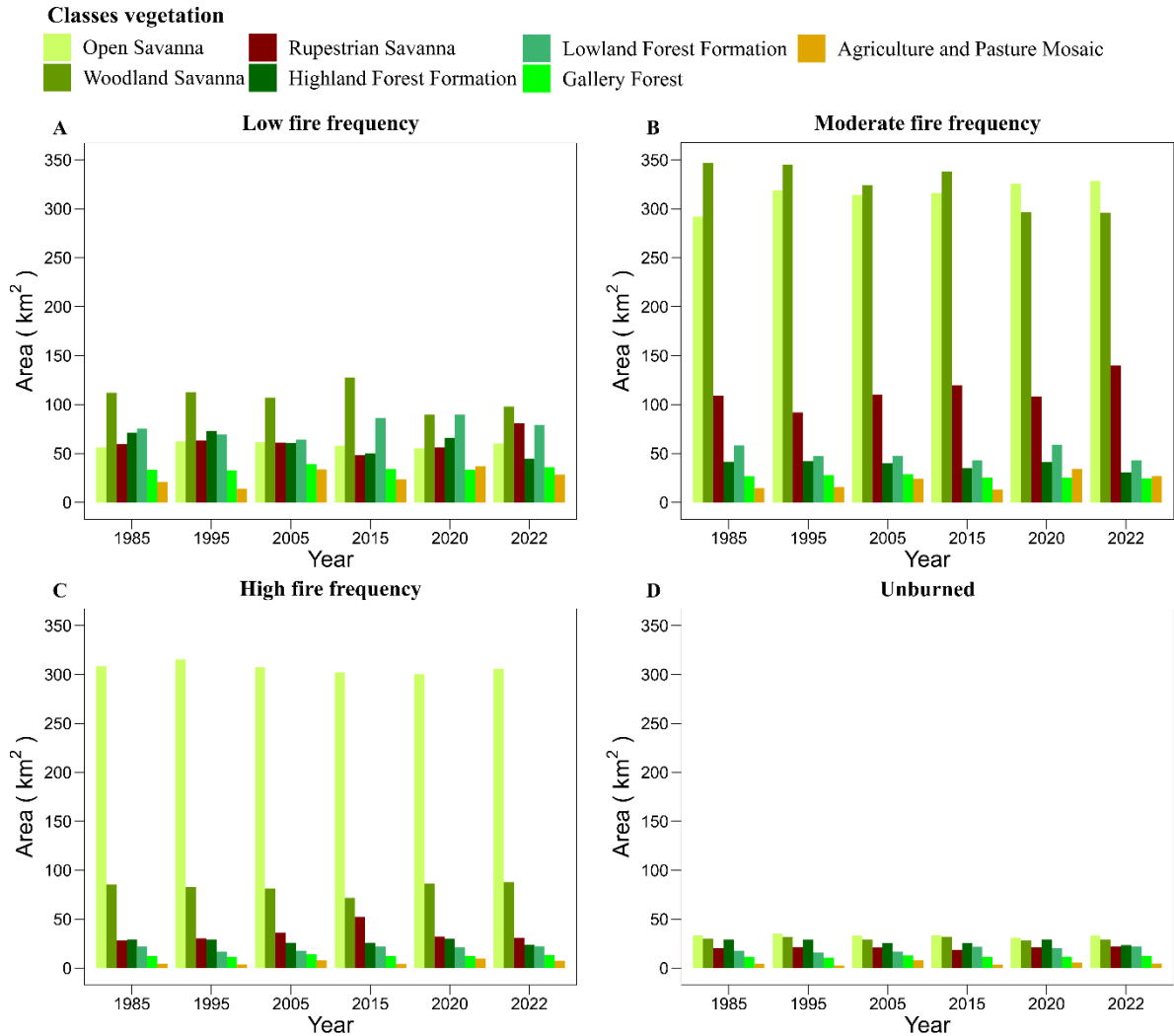


Figure 5 - Total area of land use and cover mapped over the historical series (1985-2022) for the CMNP for each fire frequency regime class.

4. CONCLUSION

The aim of understanding more about the role of fire in Cerrado ecoregions is essential for conservation and management programs, as well as supporting programs to mitigate climate change. In our research, we looked at the characterization of the vegetation physiognomies of a protected area in an Amazon-Cerrado transition region using image classification and noticed the importance of trying to obtain the greatest possible description of the area, so that we could then obtain the results that made it possible to understand the fire dynamics and its influence on determining the distribution of vegetation. By determining the fire frequencies, we were able to identify with fire events above 18, high frequency, occur mainly in open savanna, dense savanna, and rupestrian savanna physiognomies, but with greater weight in open savanna areas,

proving our first hypothesis. Regarding the second hypothesis, we observed a slight tendency that the absence of fire events may lead to an increase in the density of open physiognomies in our study area. Finally, we want to emphasize that the results we found may contribute to fire management activities in the study area and in other protected areas with similar characteristics.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the research grant (PDPG-FAP N°18/2020), the Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) for the research grant (N°BD-01136/20). We also thanks the Graduate Program in Agroecology – PPGA (UEMA/São Luís).

CAPÍTULO IV: COMO OS DIFERENTES HISTÓRICOS DE FOGO E A SAZONALIDADE INFLUENCIAM A DINÂMICA DA BIOMASSA COMBUSTÍVEL EM DIFERENTES TIPOS DE VEGETAÇÃO SAVÂNICA

HOW DOES THE DIFFERENT FIRE HISTORIES AND SEASONALITY INFLUENCE FUEL BIOMASS DYNAMICS IN DIFFERENT SAVANNA VEGETATION TYPES

Izadora S. de Carvalho; Patrick Costa Silva; Leo Vieira Leonel; Alinne da Silva; Tiago Massi Ferraz; Swanni T. Alvarado.

Artigo a ser submetido na revista: [Environmental Monitoring and Assessment](#).

RESUMO

A vegetação do cerrado apresenta características que contribuem para a sua resiliência mesmo após distúrbios como o fogo, porém as mudanças na frequência e recorrências desses eventos têm causado perdas e fragmentação dos habitats, além de influenciar a dinâmica da vegetação. Este trabalho teve por objetivo analisar os efeitos do tipo de vegetação, histórico de fogo e sazonalidade na estrutura da vegetação lenhosa e nas condições da biomassa combustível, analisando se os parâmetros biofísicos da biomassa combustível se correlacionam com índices espectrais obtidos por sensoriamento remoto. Para isso, foi coletada a biomassa combustível, no início e final do ciclo de queima do ano de 2022, juntamente com dados da vegetação lenhosa através de inventário, considerando áreas com diferentes históricos de fogo (HF1=1-2 anos, HF2=3-4 anos, HF3=6-7 anos e HF4=mais de 10 anos desde o último evento de fogo), em duas fisionomias de savana (cerrado aberto e cerrado denso). Identificamos que as principais respostas na quantidade de biomassa combustível foram influenciadas pelos efeitos da interação do histórico de fogo e sazonalidade ($F_{3,74}=2,867$, $p=0,0422$), com tendências de diferença na recuperação da biomassa após eventos de fogo quando comparado aos tipos de vegetação, e com destaque para a diferença entre as classes de HF1 e HF2 ($p=0,032$). Os resultados demonstraram que o acúmulo de biomassa foi maior ao final da estação seca em áreas de cerrado aberto com histórico recente de fogo (HF1 e HF2), enquanto para os históricos com ocorrência de fogo mais tardio (HF3 e HF4) o comportamento foi contrário, com maior acúmulo no início da estação seca, tanto em cerrado aberto quanto em cerrado denso. Isto indica respostas diferentes da dinâmica de acumulação de biomassa combustível. Além disso, encontramos relações importantes entre os dados biofísicos da biomassa combustível mensurados em campo com os índices espectrais e temperatura de superfície (LST), que pode colaborar para futuros trabalhos de predição e monitoramento em ações de manejo de fogo e conservação da vegetação nativa em ecossistemas de savana.

Palavras-chave: Regime de fogo, Acumulação de combustível, Tipos de vegetação, Cerrado.

ABSTRACT

Savanna vegetation has characteristics that contribute to its resilience even after disturbances such as fire, however, the increase in fire frequency and recurrence have caused habitat loss and fragmentation, affecting the vegetation dynamics. Therefore, we aimed to analyze the effects of vegetation type, fire history and seasonality on the structure of woody vegetation and fuel biomass condition, and to analyze whether the biophysical parameters of fuel biomass correlate with spectral indices obtained by remote sensing. To carry out this analysis, we collected fuel biomass and woody vegetation data at the start and end of the dry season in 2022, through an inventory of areas with different fire histories (FH1=1-2 years, FH2=3-4 years, FH3=6-7 years, and FH4=more than 10 years since the last fire event), in two different savanna physiognomies (open savanna, and woodland savanna). We identified that the main responses in fuel biomass amount were influenced by the interaction between fire history and seasonality ($F_{3,74}=2.867$, $p=0.0422$), with differences in biomass recovery after fire events when comparing vegetation types and with the difference between the FH1 and FH2 classes ($p=0.032$). Our results showed that biomass accumulation was greater at the end of the dry season in open savanna areas with a recent history of fire (FH1 and FH2), while for those with a later fire history (FH3 and FH4), the behavior was the opposite, being greater at the beginning of the dry season, both in open and woodland savanna. This suggests different responses in fuel load dynamics. In addition, we found important relationships between the biophysical data of fuel biomass measured in the field with spectral indices and surface temperature (LST), which could contribute to future prediction and monitoring studies for fire management actions and the conservation of native vegetation in savanna ecosystems.

Keywords: Fire Regime, Fuel accumulation, Types vegetation, Cerrado.

1 INTRODUÇÃO

Compreender os fatores que determinam o regime de fogo nos biomas brasileiros envolve a análise de dados ambientais e sociais ao longo do tempo, o que encoraja a realização de estudos destas variáveis para o entendimento do comportamento do fogo como parte do processo de evolução dos ecossistemas (Sano *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). Ainda mais com a influência das mudanças climáticas que tem sido percebida em várias regiões do planeta, resultando no prolongamento da estação seca e no aumento da frequência de secas extremas, assim como a redução da precipitação ao longo das décadas (Aragão *et al.*, 2018; Hofmann *et al.*, 2023; Marengo *et al.*, 2022), o que impacta no regime natural de fogo até mesmo nos ecossistemas dependentes e adaptados ao fogo (Kelly *et al.*, 2020).

Ainda que a vegetação do Cerrado brasileiro tenha adaptações que possibilitam uma maior resiliência após a ocorrência de fogo, a frequência e recorrência com que as queimadas acontecem atualmente conduzem a intensificação de problemas como a perda e fragmentação de habitats (Ferreira; Ely; Beal-Neves, 2021; Le Stradic *et al.*, 2015; Pilon *et al.*, 2021). Com o auxílio do mapeamento do regime de fogo é possível identificar os padrões de ocorrência (frequência, sazonalidade, intensidade, área), que compreendem os processos ecológicos desses ambientes dependentes do fogo e como estão respondendo ao cenário atual de mudanças climáticas (Keeley; Syphard, 2016). Desse modo, compreender as características e condições da vegetação em fisionomias onde há a maior ocorrência desses eventos, como área de cerrado sensu stricto, Cerrado aberto e cerrado denso, permite fornecer informações sobre a dinâmica ecológica e como isso atua na manutenção da biodiversidade, conservação e preservação desses ambientes, além de contribuir para ações de manejo do fogo, prevenção e combate a incêndios (Sano *et al.*, 2019; Ribeiro; Walter, 2008).

O Cerrado é caracterizado por um mosaico de fitofisionomias com formações florestais, savânicas e campestres (Sano *et al.*, 2019; Ribeiro; Walter, 2008). Consequentemente, com um regime de fogo que difere entre os tipos de fisionomias, principalmente entre florestais e savana-campestre, devido à inflamabilidade, quantidade e composição do material combustível (Cardoso *et al.*, 2018, 2000; Gomes *et al.*, 2020a; Scholes; Archer, 1997; Simpson *et al.*, 2016). Dessa forma, as políticas de manejo devem levar em consideração a heterogeneidade de uso e ocupação, biodiversidade fitofisionômica e distintos padrões de regime de fogo (Gomes *et al.*, 2020a; Silva *et al.*, 2021). Como exemplo de ações existentes, podemos citar os programas de manejo integrado do fogo (MIF), que ocorrem em áreas do bioma Cerrado e nas savanas Amazônicas e do Pantanal, em áreas protegidas como as Unidades de Conservação (UC) e Territórios Indígenas (TI) (Eloy *et al.*, 2019; Schmidt *et al.*, 2016, 2018).

Os índices espectrais obtidos por imagens de satélite oferecem uma poderosa ferramenta para o monitoramento da vegetação (Sano *et al.*, 2019; Zanotta; Zortea; Ferreira, 2019). Esses índices podem ser relacionados com dados coletados em campo, como o índice SPAD, que fornece informações sobre a concentração dos pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas (clorofilas) (Gitelson; Gritz; Merzlyak, 2003). Além disso, outros parâmetros como o rendimento quântico máximo do FSII (F_v/F_m) e o índice fotossintético (PI), podem ser utilizados para avaliar a eficiência fotossintética

das plantas, possibilitando inferir sobre as condições da vegetação, como a identificação de estresse hídrico (Bolhar-Nordenkamp *et al.*, 1989; Silva *et al.*, 2006), e relacioná-los com índices gerados a partir de dados de sensoriamento remoto.

Portanto, buscamos entender se as condições de biomassa combustível e a diversidade de espécies arbóreas em áreas de savana com diferentes densidades do estrato lenhoso (cerrado aberto e cerrado denso) são influenciadas pelo histórico de fogo (tempo desde a última queima) e pela sazonalidade (início e final da estação seca). Assim, analisamos o efeito de diferentes históricos de fogo e da sazonalidade para entender (i) se diferentes históricos de fogo influenciam na diversidade de espécies arbóreas; (ii) se diferentes históricos de fogo e densidade de vegetação influenciam na quantidade e condições da biomassa combustível; (iii) e se características da atividade fotossintética e temperatura da biomassa combustível em campo possui boa correlação com índices vegetais obtidos por imagens de satélite.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM – área de 1600,46 km²) está localizado na região norte do bioma Cerrado (Figura 1). O PNCM (7°14'17" S e 47°06'41") está sob a gestão do Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade (ICMBio) (Lima *et al.*, 2007; ICMBio, 2019). A região onde o parque está localizado possui características climáticas do tipo tropical úmido, com sazonalidade bem definida: uma estação seca entre os meses de maio a outubro e outra chuvosa entre novembro e abril (De Carvalho *et al.*, 2023; De Souza; Koerner; Chlad, 2015). Os dados de campo foram obtidos por meio de duas expedições que ocorreram nos meses de julho e outubro de 2022, no início e no final da estação seca.

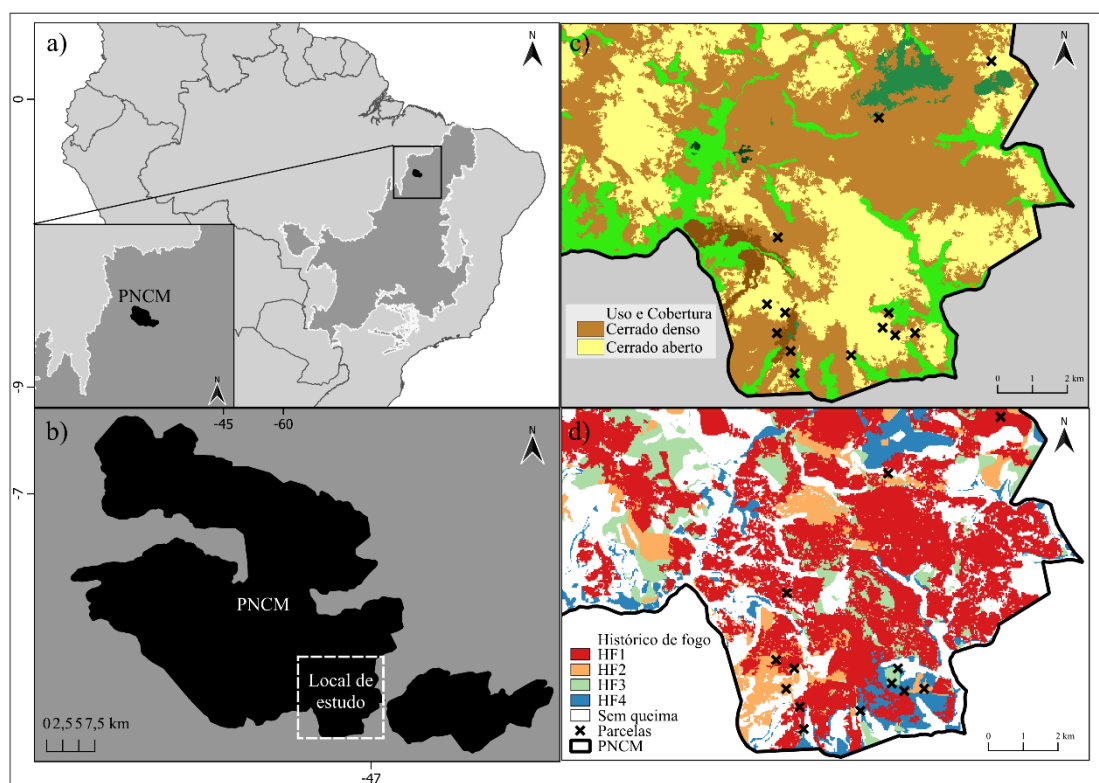


Figura 1 - Mapa de localização do (a) Parque Nacional da Chapada das Mesas, no Cerrado brasileiro, (b) o local de estudo dentro do parque, (c) tipos de vegetação de cerrado denso e cerrado aberto no parque (De Carvalho *et al.*, 2024), (d) classes de histórico de fogo usadas no estudo: HF1 - 1 a 2 anos desde o último fogo; HF2 - 3 a 4 anos desde o último fogo; HF3 - 6 a 7 anos desde o último fogo; e HF4 - mais de 10 anos desde o último fogo.

As coletas ocorreram no início da estação seca (02 a 04 de julho) e final da estação seca (20 a 22 de outubro), que compreende a dinâmica da biomassa combustível no período de ocorrência de fogo na área de estudo para o ciclo de 2022 (Figura 2). Em decorrência das atividades de queima prescrita (Manejo Integrado do Fogo - MIF) realizadas no PNCM, geralmente nos dois primeiros meses do início da estação seca (maio e junho), a primeira expedição de campo foi realizada no início do mês de julho, para evitar que as parcelas fossem instaladas em áreas de queimadas prescritas. Para a realização das expedições de campo, contamos com a autorização do SISBIO/ICMBio (nº 80449-1) para atividades com finalidade científica.

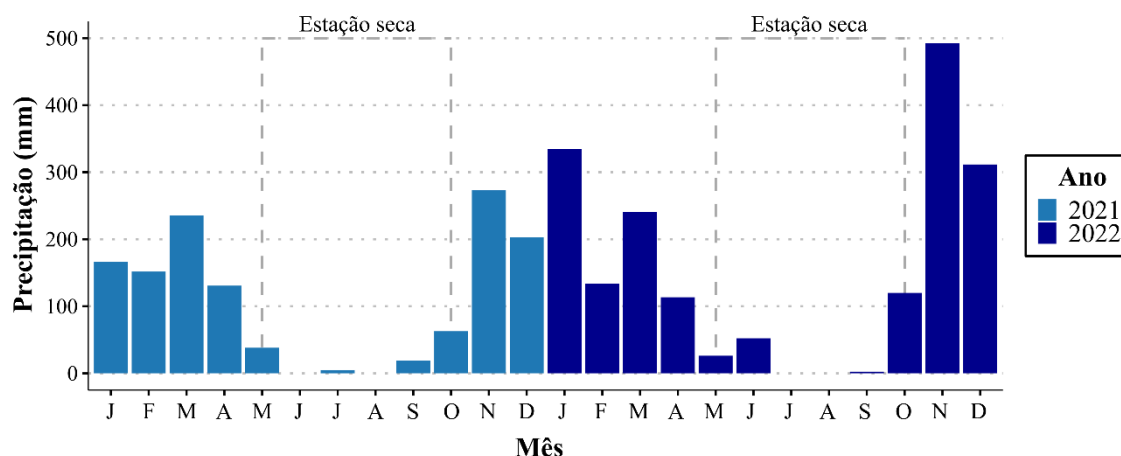


Figura 2 - Precipitação total mensal para 2021 e 2022 na região do PNCM. Dados obtidos da estação 747000 (7° 19' 23,14" S e 47° 27' 51,83" W), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA.

As coletas dos dados de campo foram realizadas em parcelas estabelecidas na área de estudo (PNCM) com diferentes históricos de ocorrência de fogo (Tabela 1). O estabelecimento das classes de histórico de queima foi realizado com base no mapeamento de áreas queimadas entre 1984 e 2021, onde obtivemos os dados de áreas queimadas entre 1990 – 2017 do estudo realizado por De Carvalho et al. (2023), disponível em <https://zenodo.org/records/10289082> (De Carvalho; Alvarado; Ferraz, 2023), e o mapeamento foi ampliado até 2021 utilizando a mesma metodologia. A distribuição das amostras foi realizada entre os dois tipos de vegetação onde o fogo é mais frequente: cerrado denso - Cd e cerrado aberto - Ca.

Tabela 1 – Descrição das classes de histórico de fogo usadas no estudo.

Classe	Abreviação	Descrição
Histórico de Fogo 1	HF1	1 a 2 anos desde o último fogo
Histórico de Fogo 2	HF2	3 a 4 anos desde o último fogo
Histórico de Fogo 3	HF3	6 a 7 anos desde o último fogo
Histórico de Fogo 4	HF4	Mais de 10 anos desde o último fogo

2.2 Amostragem da vegetação lenhosa

Após a identificação dos pontos de coleta a partir da reclassificação do histórico de fogo nas quatro categorias, foram instaladas 13 parcelas de inventário de 30x30 metros (900 m²), com auxílio de GPSMAP 64S (Garmin) em campo, totalizando uma área amostrada de 1,17 hectares. Com o auxílio de uma fita diamétrica e hipsômetro modelo TP 200B MN (Laser Tech) foram mensurados o diâmetro de todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP - 130 cm) ≥ 5 cm e a altura, respectivamente.

A configuração da distribuição de parcelas segundo as classes de histórico de fogo para as áreas de cerrado aberto foi: a) HF1(3), b) HF2(1), c) HF3(1) e d) HF4(1), totalizando 6 parcelas. Para as áreas de cerrado denso foi: a) HF1(2), b) HF2(1), c) HF3(2) e d) HF4(2), totalizando 7 parcelas. Realizamos a identificação das espécies comparando-as com dados disponíveis da Lista de Espécies da Flora Brasileira (<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/>), consulta em literatura especializada e na base de dados *SpeciesLink* (splink.cria.org.br). O *SpeciesLink* contém dados de coleções científicas coletadas na área de estudo em outras pesquisas, como a de Ferraz et al. (2020). Para analisar os dados de inventário da vegetação arbórea e gerar os dados fitossociológicos para as espécies e famílias, utilizamos o pacote *florestal* versão 0.1.3 (Ferreira, 2020).

2.3 Biomassa combustível

As espécies do grupo gramíneas/herbáceas, sendo características de fisionomias de savana, possuem grande inflamabilidade no período de seca, o que as torna mais susceptíveis à ocorrência de fogo (Cardoso *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2023; Gomes *et al.*, 2020; Simpson *et al.*, 2016). Por essa razão, esse grupo foi utilizado para as coletas das métricas biofísicas: altura da biomassa, cobertura, temperatura e atividade fotossintética. Foram instaladas aleatoriamente no interior das parcelas de inventário de lenhosas, 4 parcelas de 1x1 metro (1m²) e com avaliações realizadas entre 7h:00 - 17h:00 horas. Os parâmetros de atividade fotossintética medidos em campo foram: o rendimento quântico máximo do FSII (Fv/Fm) e o índice fotossintético (PI), medidos com o fluorímetro Pocket PEA - Plant Efficiency Analyser (Hansatech, Norfolk, UK); a intensidade de verde (índice SPAD), coletada com o medidor portátil de clorofila (MPC) SPAD-502 (Minolta, Japão). Também mensuramos a temperatura superficial das parcelas, obtida a partir de imagens térmicas registradas com o auxílio da câmera termográfica por infravermelho FLIR E8 Wifi (Flir Systems, EUA) e a altura da biomassa foi medida com fita métrica. A cobertura da parcela foi mensurada por meio do processamento das imagens térmicas utilizando os pacotes Thermimage versão 4.1.3 e ThermImageJ versão 1.0 (Tattersall, 2021; Tattersall, 2019), e depois as imagens foram segmentadas utilizando o pacote Pliman versão 2.1.0 (Olivoto, 2022), permitindo mensurar, em porcentagem, a área com cobertura de vegetação.

As parcelas amostrais foram distribuídas entre as áreas de cerrado aberto e cerrado denso, totalizando 36 parcelas. Nas áreas de cerrado aberto, foram estabelecidas 8

parcelas da classe HF1 e 4 parcelas para as classes HF2, HF3 e HF4, totalizando 20 parcelas. Nas áreas de cerrado denso, foram estabelecidas 4 parcelas para cada classe (HF1, HF2, HF3 e HF4), totalizando 16 parcelas.

A biomassa combustível e a serrapilheira foram coletadas em parcelas de 0,5x0,5 m (0,25m²), seguindo a metodologia de Cardoso et al. (2000). Para as áreas de cerrado aberto, a distribuição das amostras foi a seguinte: a classe HF1 recebeu 10 parcelas, HF2 recebeu 5 parcelas, HF3 recebeu 5 parcelas e HF4 recebeu 5 parcelas, totalizando 25 parcelas. Nas áreas de cerrado denso, cada uma das classes HF1, HF2, HF3 e HF4 recebeu 5 parcelas, totalizando 20 parcelas. Ao todo, foram coletadas 45 parcelas de biomassa amostral. As amostras foram levadas ao laboratório, onde ocorreu a separação da biomassa (gramínea/herbácea) viva e morta. Após a separação, o material foi levado para uma estufa digital com renovação de ar a 70 °C durante 72 horas, e posteriormente, foi realizada a pesagem.

2.4 Relação entre dados de campo e índices de vegetação

Buscamos investigar a correlação dos dados ecofisiológicos obtidos em campo, (Índice SPAD, Fv/Fm e PI) e os índices espectrais gerados por meio de imagens de satélite (Tabela 2). Para isso, os valores dos índices das imagens de satélite foram extraídos com base nas coordenadas dos pontos das parcelas de campo, utilizando imagens capturadas nas mesmas datas das coletas de campo ou em datas próximas, conforme a passagem do satélite pela área de estudo. Os cálculos dos índices foram realizados com o pacote *spyndex* versão 0.6.0 da lista *Awesome Spectral Indices* (Montero et al., 2023).

Tabela 2 – Índices de vegetação testados neste estudo.

Índice	Descrição	Referência	Bandas	Equação
MCARI1	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 1	Haboudane <i>et al.</i> (2004)	green, red, nir	$1.2 * (2.5 * (nir - red) - 1.3 * (nir - green))$
MNDWI	Modified Normalised Difference Water Index	Xu <i>et al.</i> (2007)	green, swir2	$(green - swir1) / (green + swir1)$
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Rouse <i>et al.</i> 1974	red, nir	$(nir - red) / (nir + red)$
NDMI	Normalized Difference Moisture Index	Wilson & Sader (2002)	nir, swir1	$(nir - swir1) / (nir + swir1)$
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Huete (1988)	red, nir	$(1.0 + 0.5) * (nir - red) / (nir + red + 0.5)$
SLAVI	Specific Leaf Area Vegetation Index	Lymburger <i>et al.</i> (2000)	red, nir, swir2	$nir / (red + swir2)$

As imagens utilizadas foram captadas pelos satélites Landsat 8 e 9, equipados com sensor OLI (*Operation Land Imager*), com correção atmosférica de refletância da superfície (Tabela 3). Foram utilizadas cenas da órbita/ponto 222/065, de 05 de julho de 2022 (Landsat 9, 0,31% de cobertura de nuvens), próxima da data de coleta em campo (02 a 04 de julho), e de 17 de outubro de 2022 (Landsat 8, 40,15% de cobertura de nuvens), também próxima das datas de coleta em campo (20 a 22 de outubro). As imagens foram obtidas através da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017), utilizando API Python. O código utilizado, com todas as etapas de obtenção das imagens, cálculos dos índices e extração dos dados está disponível em https://github.com/IzadoraSC/spectral_index/tree/main. A visualização das imagens e a construção dos mapas foram realizadas com o programa QGIS, versão 3.22.14 (QGIS Development Team, 2023).

Tabela 3 - Descrição das bandas de satélite utilizadas.

Banda	Descrição	Comprimento de onda (µm)	Banda do Landsat-8 e 9
<i>vis</i>	visível (azul-blue, verde-green, vermelho-red)	0.452 – 0.673	2, 3, 4
<i>nir</i>	infravermelho próximo	0.851 – 0.879	5
<i>swir1</i>	infravermelho de onda curta 1	1.566 – 1.651	6
<i>swir2</i>	infravermelho de onda curta 2	2.107 – 2.294	7
<i>tir</i>	infravermelho termal	10.60 – 11.19	10

Para relacionar os dados de temperatura obtidos com a câmera FLIR E8 Wifi (Flir Systems, EUA), utilizamos a banda do termal e realizamos o cálculo para obtenção do valor de temperatura da superfície. Para isso, foram calculados a fração da vegetação, emissividade e temperatura da superfície em grau Celsius (°C).

A estimativa da fração (proporção) da vegetação (Carlson; Ripley, 1997) foi feita pela fórmula:

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (1)$$

onde: NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), e NDVI_{min} e NDVI_{max} = valores mínimo e máximo de NDVI da imagem.

A emissividade da Superfície Terrestre (EM) foi calculada com base na equação de Planck (Sobrino; Jiménez-Muñoz; Paolini, 2004), usando a Fração de Vegetação (P_v).

$$EM = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (2)$$

onde: EM = emissividade da superfície terrestre, o valor 0.0986 = representa a base de emissividade para a vegetação, o valor 0.004 = é o coeficiente que representa a variação de emissividade para outras superfícies (solo), e P_v = fração da vegetação.

Por fim, estimamos a temperatura de superfície (LST - *Land Surface Temperature*) com base na lei de Planck (Sobrino; Jiménez-Muñoz; Paolini, 2004):

$$LST = \frac{TIR}{\left(1 + \left(\lambda * \frac{TIR}{1.438}\right)\right) * \log(EM)} - 273.15 \quad (3)$$

onde: LST = temperatura da superfície (*Land Surface Temperature*) em °C, TIR = *thermal infrared* - banda termal (banda 10), e λ = valor 0.00115.

2.5 Análises estatísticas

Para avaliar o efeito do tipo de vegetação, das diferentes classes de histórico de fogo, da sazonalidade, e de suas interações sob as variáveis de biomassa combustível (gramínea seca, gramínea viva, herbácea viva, serrapilheira, total gramínea-herbácea, total gramínea-herbácea-serrapilheira), foi aplicado um teste de ANOVA fatorial seguido do teste post-hoc de Tukey HSD (*Honest Significant Difference*) para testar as diferenças significativas entre as médias ao nível de significância de 5%. A homogeneidade de variância foi testada pelo método de Levene e a normalidade dos dados com o teste *Shapiro-Wilk*. Já para os parâmetros de atividade fotossintética (índice SPAD, Fv/Fm e PI) e temperatura, foi realizado teste de ANOVA de *Welch* considerando a interação dos três fatores (tipo de vegetação, histórico de fogo e sazonalidade), pois o pressuposto de homogeneidade de variância não foi atendido (Welch, 1951). Os fatores analisados foram o tipo de vegetação (cerrado aberto e cerrado denso), o histórico de fogo (FH1, FH2, FH3 e FH4) e a sazonalidade (início e final da estação seca). Para analisar a relação entre os dados ambientais e biofísicos obtidos em campo e os dados obtidos por índices de vegetação gerados a partir de imagens de satélite, foi utilizada a correlação de Pearson com nível de significância de $p < 0,05$. Todas as análises foram realizadas utilizando o *software R* versão 4.2.2 (R Core Team, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Vegetação arbórea

Analisando o número de indivíduos entre as duas fisionomias vegetais amostradas, observamos que de fato as áreas de cerrado denso (Cd) apresentaram mais indivíduos em comparação com áreas de cerrado aberto (Ca), no total foram 330 indivíduos mensurados, 223 em áreas de Cd (7 parcelas) e 107 em área de Ca (6 parcelas) (Figura 3). Foram identificadas 33 espécies distribuídas entre 18 famílias, 29 espécies em áreas de cerrado denso e 18 em áreas de cerrado aberto.

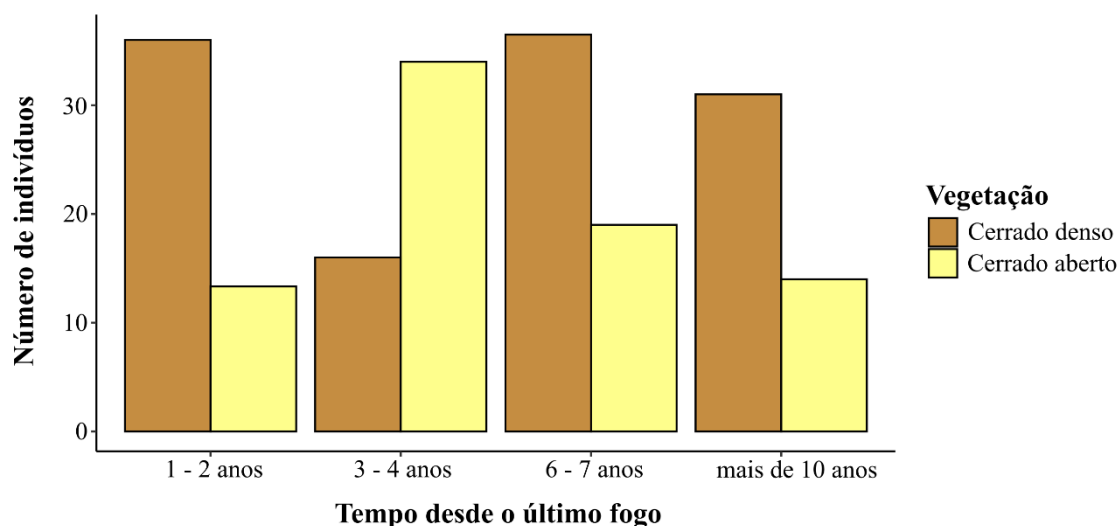


Figura 3 – Número de indivíduos lenhosos por parcela (900 m²). Classes de histórico de fogo: HF1: 1 a 2 anos desde o último fogo; HF2: 3 a 4 anos desde o último fogo; HF3: 6 a 7 anos desde o último fogo; e HF4: mais de 10 anos desde o último fogo.

Analisando o número médio de indivíduos por parcela para cada classe de histórico de ocorrência de fogo, observamos que áreas de Cd mantiveram um maior número de indivíduos, exceto para a classe de histórico HF2 (Figura 3). Contrário ao observado em muitas regiões de savana do mundo, onde a ausência de fogo produz um adensamento do estrato lenhoso conhecido como woody encroachment (Stevens *et al.*, 2017), nosso trabalho observou tendências contrastantes, onde a savana aberta teve uma diminuição da densidade de espécies lenhosas com o aumento do tempo desde o último fogo (Figura 3), enquanto para as savanas lenhosas a tendência foi menos clara, com aumentos e diminuições segundo alguns históricos. Um número maior de espécies pode ser encontrado nas áreas com histórico de fogo mais recente (1-2 anos e 3-4 anos) nas áreas de cerrado aberto, enquanto nas áreas de cerrado denso esse padrão é observado em áreas que estão a mais tempo sem ocorrência de fogo (6-7 anos e mais de 10 anos). Pesquisas desenvolvidas na região central do cerrado em Goiás observaram que em áreas de vegetação menos densa, quanto mais tempo sem ocorrência de fogo, maior a tendência de encontrar um número maior de indivíduos (Lopes; Vale; Schiavini, 2009).

Embora o fogo seja considerado um componente importante para o crescimento de espécies no Cerrado (Neri *et al.*, 2023), destacamos ainda que nossa região de estudo apresenta um padrão de frequência de fogo de moderado a alta, com ocorrências variando entre 6-18 vezes e mais de 18 vezes, respectivamente, considerando um período de 39 anos de histórico de fogo mapeado (De Carvalho *et al.*, 2023). Essas tendências por acima das frequências encontradas em outros estudos (Alvarado; Silva; Archibald, 2018; Eloy *et al.*, 2019), e os resultados observados nos parâmetros estruturais, como densidade e número de indivíduos, neste estudo, sugerem que é necessário considerar os diferentes históricos de fogo e as características diferenciadas de cada fisionomia para a construção de melhores estratégias de manejo e conservação (Gomes *et al.*, 2016; Silva; Batalha, 2010).

Ao analisar os dados de composição florística, observamos que a espécie *Tapirira obtusa* (Benth.) J.D.Mitch obteve o maior Valor de Importância (VI) na área de Cd, ocorrendo apenas nesse tipo de vegetação, seguida por *Qualea parviflora* Mart. e *Salvertia convallariodora* A.St.-Hil (Figura 4, Figura 5 Apêndice). Vale destacar que o parâmetro de dominância relativa foi o que mais contribuiu para as posições dessas últimas espécies e que, juntamente com a densidade relativa, destacou *T. obtusa* como a espécie mais importante. Observamos que *T. obtusa*, assim como *Q. parviflora*, *Euplassa inaequalis* (Pohl) Engl., *Stryphnodendron coriaceum* Benth., apresentaram maiores frequências em áreas com históricos de fogo mais recente (Figura 4). Nas áreas de Ca, o maior VI foi da espécie *Stryphnodendron coriaceum* Beth., que ocorreu em todas as classes de histórico de fogo, assim como em área de Cd, seguida pela *Euplassa inaequalis* (Pohl) Engl., com o mesmo comportamento, e *Qualea parviflora* Mart. Estes resultados possibilitam observar quais as espécies que podem ser mais sensíveis ou mais resistentes a distúrbios como o fogo.

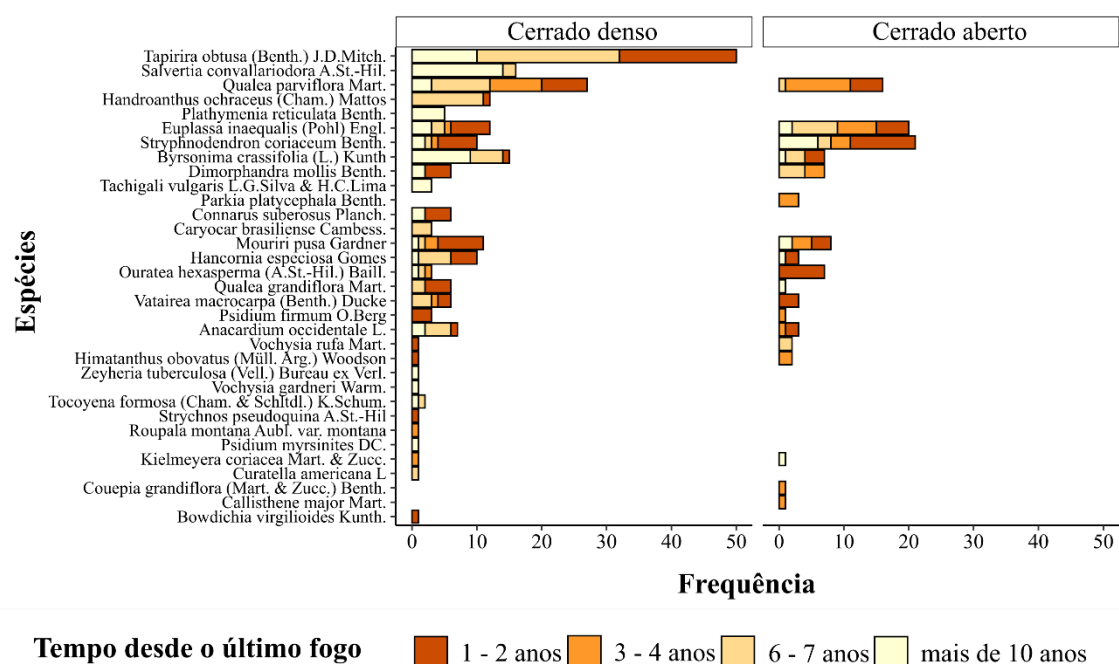


Figura 4 - Parâmetros de análise fitossociológica (frequência) para espécies considerando os tipos de vegetação (cerrado denso e cerrado aberto) e tempo desde o último fogo.

Ao analisar a vegetação arbórea de fisionomias de cerrado típico e cerrado rupestre, 1 e 4 anos após a ocorrência de eventos de fogo, Gomes *et al.* (2016) observaram um aumento na riqueza de espécies, densidade de indivíduos e área basal, em ambas as áreas, mesmo com as diferenças das composições de solos entre as áreas e o aumento do número de espécies ser maior no cerrado típico, destacando que a recuperação das áreas pode ser em até 3 anos após a ocorrência de fogo. Do mesmo modo, os nossos resultados ressaltam a importância de analisar separadamente os tipos de vegetação de savana considerando as características de histórico de fogo, pois, de acordo com Silva e Batalha, (2010), podemos encontrar diferentes padrões da dinâmica da vegetação. Um número maior de espécies pode ser encontrado nas áreas com histórico de fogo mais recente (1-2 anos e 3-4 anos) nas áreas de cerrado aberto, enquanto nas áreas de cerrado denso esse padrão é observado em áreas que estão a mais tempo sem ocorrência de fogo (6-7 anos e mais de 10 anos).

Indivíduos pertencentes às famílias Vochysiaceae, Fabaceae e Proteaceae ocorreram tanto nas fisionomias de Cd quanto nas de Ca, e em todas as classes de histórico de fogo (Figura 5). No entanto, nas áreas de Cd a família Anacardiaceae apresentou maior frequência, enquanto nas áreas de Ca destacou-se a família Fabaceae. Assim como no estudo de Lopes *et al.* (2009), realizado em áreas de cerrado *sensu stricto* com diferentes

históricos de fogo, as famílias com maior valor de importância foram Fabaceae e Vochysiaceae, sendo que na área com queimada mais recente, destacaram-se as famílias Fabaceae e Bignoniaceae, enquanto na área sem queimada no ano considerado no estudo, as famílias Vochysiaceae e Bignoniaceae foram predominantes.

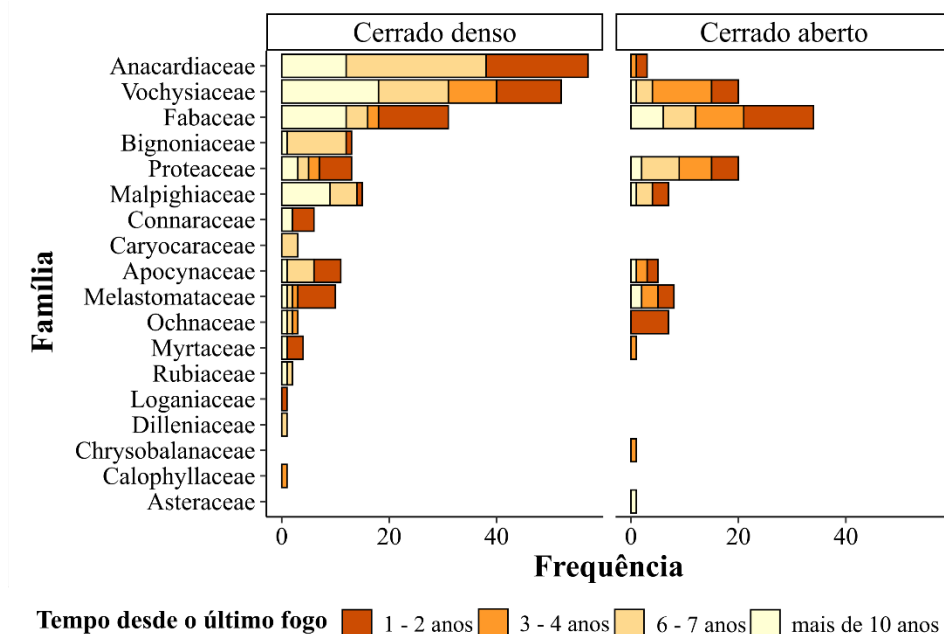


Figura 5 - Parâmetros de análise fitossociológica (frequência) das famílias para os tipos de vegetação (cerrado denso e cerrado aberto) e tempo desde o último fogo.

3.2 Biomassa combustível

Para aprofundar a compreensão das relações entre vegetação e fogo nos ecossistemas de savana, é crucial estudar não apenas a dinâmica da vegetação lenhosa, mas também a biomassa combustível, um componente importante para a ocorrência de fogo nessas fisionomias. Para isso, analisamos o material combustível formado por espécies de gramíneas, que têm alta inflamabilidade (Cardoso *et al.*, 2018; Simpson *et al.*, 2016), espécies herbáceas e serrapilheira, em áreas de cerrado denso (Cd) e cerrado aberto (Ca) com diferentes históricos de fogo, em duas épocas do ano, que abrangem o ciclo de ocorrência de fogo na área de estudo.

Analisando os efeitos do tipo de vegetação, histórico de fogo e sazonalidade, bem como suas interações nas respostas da biomassa combustível, observamos uma maior biomassa morta de gramíneas em área de Cd em comparação com Ca ($F_{1,74}=4,102$, $p=0,046$) (Figura 6a). Não foi observada diferença significativa para os demais fatores isolados de histórico de fogo ($F_{3,74}=1,100$, $p=0,354$) e sazonalidade ($F_{1,74}=0,020$,

$p=0,888$). Observamos diferença significativa na biomassa seca de gramíneas somente na interação entre vegetação e histórico de fogo ($F_{3,74}=4,432$, $p=0,006$), com destaque às áreas de Cd com HF1 onde a biomassa é significativamente maior que nas áreas de Ca cm HF1 ($p=0,0168$), assim como na classe HF3 ($p=0,0234$). Nossos resultados mostram que o tipo de vegetação e o histórico de fogo influenciam a quantidade de biomassa seca encontrada, e que a resposta da biomassa ao fogo pode ser mediada pelo tipo de vegetação. Em áreas com vegetação lenhosa mais densa (Cd), o acúmulo de biomassa foi mais expressivo em intervalos de tempo mais longos após a ocorrência de fogo, o que pode implicar em maior risco de ocorrência de fogo com maior intensidade (Conciani *et al.*, 2021).

Analisando as respostas da biomassa viva de gramíneas, houve um efeito significativo interação entre histórico do fogo e sazonalidade ($F_{1,74}=4,374$, $p=0,007$). Destaca-se a diminuição significativa da biomassa viva de gramíneas no final da estação seca ($p=0,003$), com diferenças principalmente entre FH1 e FH2 ($p=0,04$), FH4 e FH2 ($p=0,002$) e FH3 ($p=0,006$). Em áreas de cerrado denso, a interação entre vegetação e sazonalidade foi significativa ($p=0,019$) (Figura 6b). Dessa forma, o histórico de fogo e a sazonalidade foram os fatores que mais contribuíram para a variação na quantidade de biomassa viva de gramíneas. Para a vegetação herbácea viva, não encontramos efeitos significativos de nenhum dos fatores analisados nem de suas interações (Figura 6c).

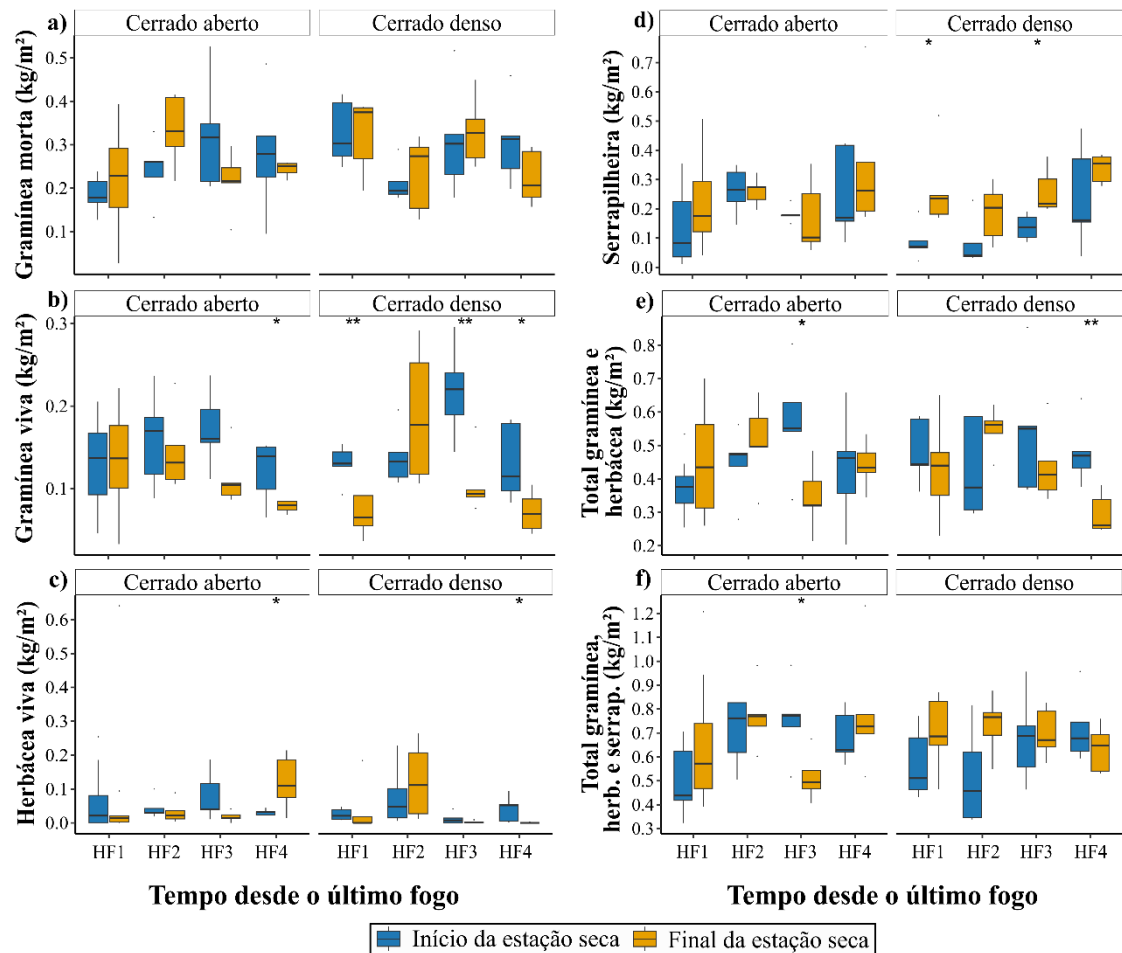


Figura 6 - Biomassa em diferentes tipos de vegetação (cerrado aberto e cerrado denso) com diferentes históricos de incêndio (HF1=1-2 anos, HF2=3-4 anos, HF3=6-7 anos e HF4=mais de 10 anos desde o último fogo) no Parque Nacional da Chapada das Mesas, Brasil. Onde temos a biomassa de (a) gramínea morta (kg/m²), (b) gramínea viva (kg/m²), (c) serrapilheira (kg/m²), (d) herbácea viva (kg/m²), (e) total de gramínea e herbácea (kg/m²), e (f) total de gramínea (kg/m²), herbácea e serrapilheira (kg/m²). (**p<0,01, *p<0,05).

Os resultados para a biomassa total, considerando gramíneas e herbáceas, apresentaram respostas significativas apenas à interação entre histórico de fogo e sazonalidade ($F_{3,74}=4,163$, $p=0,009$), com uma redução da biomassa no final da estação seca para cada classe de histórico de fogo (Figura 6d). Nas áreas com histórico HF1 e HF2 em fisionomias de cerrado aberto, a quantidade de material combustível é maior no final da estação seca em comparação com o início. Já nas áreas com HF3 e HF4, a biomassa combustível é maior no início da estação seca tanto em fisionomias de cerrado aberto quanto de cerrado denso.

O crescimento da biomassa ocorre geralmente durante a estação de chuva, sendo o quantitativo de biomassa do início da estação seca o resultado do crescimento ocorrido durante a última estação chuvosa (Krawchuk; Moritz, 2011; Van Der Werf *et al.*, 2008;

Van Wilgen *et al.*, 2004). Nas áreas de fisionomias mais densas em termos de lenhosas, a biomassa combustível pode estar sujeita a uma maior competição por nutrientes e luminosidade devido ao maior número de espécies arbóreas, o que pode criar um microclima diferenciado, promovendo uma estabilização ou redução (processo de decomposição) da biomassa ao longo do tempo (Dantas; Batalha; Pausas, 2013; Scholes; Archer, 1997). Em áreas de cerrado aberto, foi observado um maior potencial de crescimento da biomassa combustível, indicando uma dinâmica diferente. As fisionomias de savana são compostas por uma diversidade de espécies de gramíneas, árvores e arbustos que se relacionam no espaço e tempo (Scholes; Archer, 1997).

Destaca-se que nossos resultados podem ter sido influenciados pelo manejo integrado do fogo (MIF) que ocorre na área do PNCM. Queimadas prescritas são promovidas sempre no início da estação seca, e são geralmente de menor intensidade, possibilitando o contínuo desenvolvimento da biomassa combustível nos primeiros anos após a queima, mesmo durante a estação seca (Batista *et al.*, 2018; Schmidt *et al.*, 2018; Schmidt; Eloy, 2020). Alguns exemplos de áreas de proteção localizadas na região norte do bioma Cerrado que tem o MIF implementado, além do PNCM com gestão do ICMBio, são o Território Indígena (TI) Krikati, TI Governado, TI Araribóia e TI Porquinhos, sob a gestão do PREVFOGO/IBAMA (Eloy *et al.*, 2019; Schmidt *et al.*, 2018).

Analizamos também a serrapilheira, e os resultados mostraram um efeito significativo do histórico de fogo ($F_{3,74}=4,163$, $p=0,009$) e da sazonalidade ($F_{1,74}=10,891$, $p=0,002$), sem efeito de interação. A serrapilheira apresentou uma tendência a aumentar significativamente ao longo do tempo desde o último evento de fogo (Figura 6e). Na classe HF4 foi observada uma quantidade significativamente maior em comparação com intervalos mais curtos, como HF1 ($p=0,004$) e FH3 ($p=0,034$). Essa tendência pode ser devido ao acúmulo de serrapilheira ao longo tempo na ausência de eventos de fogo (Fidelis; Pivello, 2011). Embora o tipo de vegetação não tenha sido um efeito significativo determinante da quantidade de serrapilheira, como esperado, a partir das comparações múltiplas, houve diferença em fisionomias de cerrado denso no final da estação seca em comparação com o início ($p=0,008$). No geral, a serrapilheira tende a ser maior ($p=0,0015$) no final da estação seca em comparação com o início, possivelmente devido à acumulação de material foliar, galhos e outros materiais vegetais ao longo da estação.

Por fim, os resultados para a biomassa total, considerando gramíneas, herbáceas e serrapilheira, também apresentaram respostas significativas apenas à interação entre

histórico de fogo e sazonalidade ($F_{3,74}=2,867$, $p=0,0422$), com destaque para a diferença entre as classes de HF1 e HF2 ($p=0,032$) (Figura 6e). Dessa forma, ressalta-se a importância de considerar tanto o histórico de fogo quanto a sazonalidade no manejo da biomassa combustível em fisionomias de savana.

A partir das medições da biomassa combustível no início e no final da estação seca, observa-se que a biomassa viva de gramíneas apresentou valores mais baixos ao final da estação (Figura 6b). Durante esse período, as gramíneas estavam sob estresse mais intenso depois do processo de senescência, apresentando maior biomassa seca (Figura 6a), o que indica uma maior susceptibilidade à ocorrência de queima no final do período seco. Outras características, como condições microclimáticas - temperatura, umidade do solo e precipitação - também podem estar relacionadas com as diferenças encontradas entre as condições da vegetação no início e no final da estação seca (Gomes *et al.*, 2020b).

Visando compreender melhor as condições da biomassa combustível, foi mensurado alguns parâmetros biofísicos relacionados à atividade fotossintética das espécies de gramíneas, que possuem uma maior representatividade na quantificação de biomassa combustível em áreas de savana (Gomes *et al.*, 2020b). Mensuramos o índice SPAD, que representa o conteúdo relativo de clorofila presente na folha e oferece várias vantagens em relação a outros métodos de análise nutricional do tecido vegetal. É um método não destrutivo, e as amostras não precisam ser enviadas para análise em laboratório, poupando tempo e recursos financeiros. Por isso, é considerado uma medida indireta de clorofila (Bolhar-Nordenkamp *et al.*, 1989; Steele; Gitelson; Rundquist, 2008).

Considerando os parâmetros biofísicos, os resultados mostram um efeito significativo do tipo de vegetação, do histórico de fogo e da sazonalidade no índice SPAD ($F_{15,145,1}=36,803$, $p<2,2\times 10^{-16}$), na temperatura média da biomassa combustível ($F_{15,148,18}=582,66$, $p<2,2\times 10^{-16}$), no F_v/F_m ($F_{15,146,48}=30,582$, $p<2,2\times 10^{-16}$) e PI ($F_{15,146,48}=30,582$, $p<2,2\times 10^{-16}$) (Figura 7a, b, c, d). As medições ao final da estação seca, especialmente nos intervalos de tempo mais longos (FH2, FH3 e FH4), apresentaram menores valores de índice SPAD (Figura 7a). Este efeito é mais destacado em áreas de fisionomias de Cd, onde a biomassa pode ter uma recuperação mais lenta após eventos de fogo, em comparação às fisionomias de Ca (Baudena *et al.*, 2015; Gomes *et al.*, 2020b).

Ao observar os resultados da temperatura média da biomassa combustível em ambos os tipos de vegetação, foi encontrado um padrão de aumento da temperatura ao final da estação. No entanto, contrário ao esperado, a fisionomia de Cd apresentou temperaturas ligeiramente mais elevadas. Isso nos ajuda a entender porque o fogo ao final da estação tende a ser mais intenso e severo. Também observamos que as temperaturas são mais altas nas classes de histórico de fogo mais recente (HF1 e HF2) e diminuem nas classes onde o fogo ocorreu há mais tempo (HF3 e HF4), o que pode estar relacionado à menor cobertura de biomassa combustível (Figura 7, apêndice).

A fluorescência da clorofila pode ser utilizada para obter informações sobre a inibição ou danos na transferência de elétrons. A emissão da fluorescência em nosso estudo teve o objetivo de avaliar o funcionamento do fotossistema II (Fv/Fm e PI), indicando possíveis níveis de estresses abióticos sobre a biomassa combustível (Figura 7). Segundo Bolhar-Nordenkamp et al. (1989), o rendimento quântico máximo do fotossistema II (Fv/Fm) pode variar entre 0,75 a 0,85 em plantas não submetidas a estresses, sendo altamente correlacionado com o rendimento fotossintético das folhas. A diminuição da relação Fv/Fm é um excelente indicador de efeito fotoinibitório quando as plantas estão submetidas a qualquer tipo de estresse (Yang *et al.*, 1996). Assim, ao analisarmos os parâmetros Fv/Fm e PI, foi possível identificar diferenças na condição da vegetação, influenciada pela sazonalidade, com valores que sugerem que o estado de estresse da biomassa combustível se encontra ao final da estação seca, com o início.

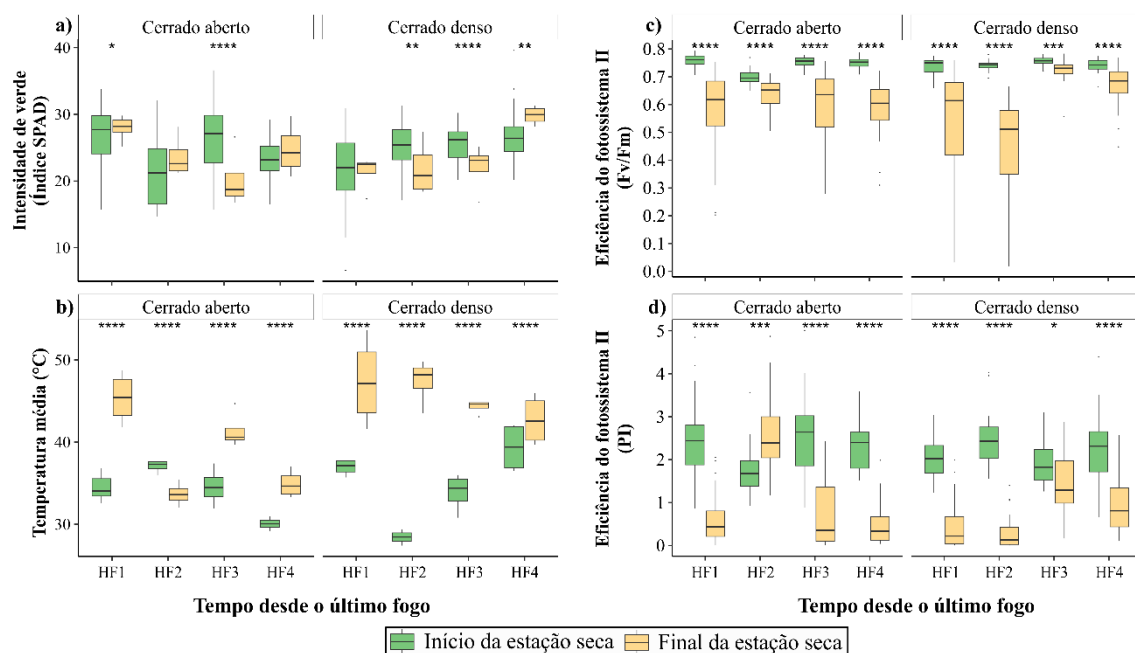


Figura 7 – (a) Intensidade de verde (Índice SPAD), (b) Temperatura média da parcela medida com a câmera FLIR, (c) Eficiência do fotossistema II (Fv/Fm) e (d) Eficiência do fotossistema II (PI) para o início e final da estação seca e o tempo desde o último fogo (HF1=1-2 anos, HF2=3-4 anos, HF3=6-7 anos e HF4=mais de 10 anos desde o último fogo). (****p<0.0001, ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05).

3.3 Relação entre dados de campo e índices de vegetação.

Analizamos as relações entre as variáveis biofísicas da biomassa combustível (altura da biomassa combustível, índice SPAD, Fv/Fm, PI, quantidade de biomassa combustível, temperatura e cobertura), os índices espectrais (MCARI1, MNDWI, NDMI, NDVI, SAVI, SLAVI) e a temperatura de superfície (LST). Para isso, utilizamos a análise de correlação de Pearson (Figura 8). Os resultados mostraram que os índices espectrais que se relacionaram positivamente com a altura da biomassa combustível (NDVI, SLAVI e SAVI), com o índice SPAD (MCARI1, SAVI), com o Fv/Fm e PI (MCARI1, NDVI, SAVI e SLAVI), com a quantidade de biomassa combustível (NDVI e SLAVI), com a temperatura da biomassa combustível medida com a câmera FLIR (MNDWI, NDMI e LST), e com a cobertura da parcela de biomassa combustível (MCARI1, NDMI, NDVI, SAVI, SLAVI).

Foi observado também os índices espectrais que se relacionaram negativamente com as variáveis da biomassa combustível mensuradas. Especificamente, o MNDWI e a temperatura de superfície (LST) obtida a partir da banda termal do satélite landsat,

mostraram uma relação negativa significativa com a altura da biomassa combustível ($R=-0,47$, $P=1,4\times 10^{-24}$; $R=-0,20$, $P=2,7\times 10^{-05}$), o Fv/Fm ($R=-0,45$, $P=5,3\times 10^{-23}$; $R=-0,57$, $P=4,6\times 10^{-38}$), o PI ($R=-0,35$, $P=7,6\times 10^{-14}$; $R=-0,53$, $P=5,8\times 10^{-32}$), a quantidade de biomassa combustível ($R=-0,14$, $P=0,005$; $R=-0,20$, $P=2,7\times 10^{-05}$), a cobertura da parcela de biomassa combustível ($R=-0,25$, $P=1,8\times 10^{-07}$; $R=-0,31$, $P=2,6\times 10^{-11}$), e o índice SPAD ($R=-0,14$, $P=0,005$) somente com MNDWI (Figura 8). Além disso, o NDVI e o SLAVI apresentaram uma correlação negativa com a temperatura da biomassa combustível medida com a câmera FLIR ($R=-0,27$, $P=1,1\times 10^{-08}$; $R=-0,18$, $P=1,6\times 10^{-04}$).

Dentre os índices estudados, o NDVI é amplamente utilizado em diversos estudos que envolvem a componente vegetação (Storey; Stow; O’Leary, 2016; Trancoso; Sano; Meneses, 2015; Vescovo; Gianelle, 2008). Após a análise da correlação do NDVI com a temperatura (LST), observou-se uma correlação negativa significativa ($R=-0,83$, $P=2,9\times 10^{-109}$). Portanto, quanto maior o valor de NDVI, menor é o valor de temperatura, indicando uma vegetação (biomassa combustível) sob menor ou ausência de estresse. O contrário pode indicar uma vegetação sobre estresse ou uma superfície não fotossintetizante (solo exposto) (Santos *et al.*, 2020; Vlassova; Pérez-Cabello, 2016). O NDVI possui uma correlação positiva com o índice SPAD, embora não significativa como esperado. Contudo, as variáveis Fv/Fm e PI, diretamente relacionadas à atividade fotossintética da vegetação, demonstraram correlação positiva significativa, colaborando com a literatura que considera o NDVI um índice capaz de inferir sobre as condições da cobertura vegetal da superfície (Rouse *et al.*, 1974; Wang *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2022). Portanto, destaca-se a possibilidade do uso de outros índices (MCARI1, MNDWI, NDMI, NDVI, SAVI, SLAVI), além do NDVI, para caracterizar a vegetação combustível em fisionomias de savana.

As relações entre índices de vegetação obtidos por imagens de satélite e dados biofísicos da atividade fotossintética coletados em campo são amplamente estudados para culturas agrícolas, com uso de imagens obtidas por drones ou por sensores espectrais (Gitelson *et al.*, 2022; Gong *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2006). O presente estudo traz uma perspectiva voltada para ambientes com formações de savana com vegetação nativa e o uso de imagens de acesso livre. Isso colabora na validação de dados de sensores remotos com base em dados de campo (Wu *et al.*, 2019), além de poder contribuir para estudos futuros que investiguem as relações encontradas, considerando os processos ecológicos e de conservação das áreas de savana. A atividade fotossintética da vegetação lenhosa

contribui para os valores dos índices encontrados, portanto, sugere-se a incorporação desses dados, somados aos dados da vegetação composta na biomassa combustível apresentados neste estudo.

A relação entre os parâmetros biofísicos e os fatores ambientais pode fornecer respostas importantes sobre as condições do material combustível e sua influência na ocorrência de fogo. O histórico de fogo e a sazonalidade afetaram todas as variáveis biofísicas mensuradas no nosso estudo, destacando a importância desses fatores para pesquisas sobre as interações entre fogo, vegetação e clima, fundamentais para o planejamento de programas de manejo de fogo e conservação dos ecossistemas de savana. Além disso, a combinação de informações provenientes de imagens de satélite e dados de campo pode possibilitar uma compreensão mais abrangente e precisa do estado da vegetação, a uma escala regional, contribuindo para estudos sobre as condições da vegetação combustível em fisionomias de savana e para a avaliação de processos ecológicos. Dessa forma, destaca-se a importância de considerar a influência do tipo de vegetação, do histórico de fogo e da sazonalidade para entender a dinâmica da vegetação combustível durante a estação seca, período de maior ocorrência de fogo nas regiões do bioma Cerrado e das savanas no mundo (Cardoso *et al.*, 2018; Gomes *et al.*, 2020a, 2020b; Sano *et al.*, 2019; Scholes; Archer, 1997; Silva *et al.*, 2021).

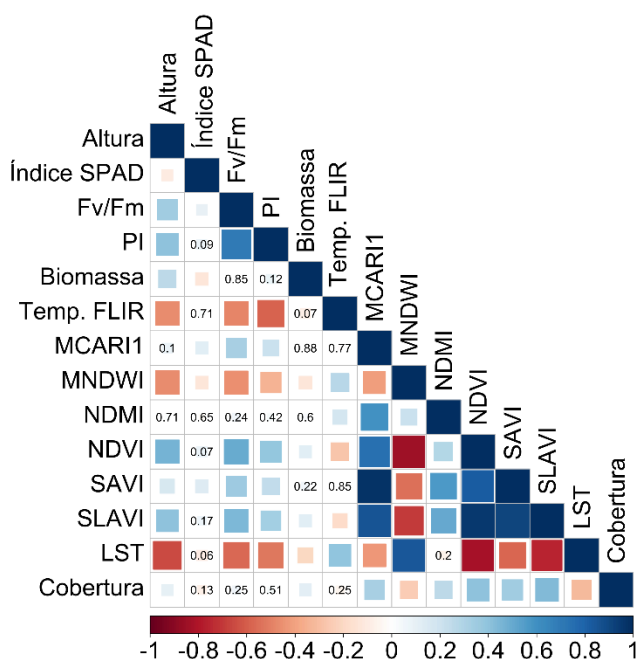


Figura 8 – Matriz de correlação entre dados de campo (altura da biomassa combustível, índice SPAD, Fv/Fm, PI, quantidade de biomassa (kg/m²), Temp. FLIR, cobertura da parcela de biomassa), índices espectrais (MCARI1, MNDWI, NDMI, NDVI, SAVI, SLAVI) e LST (*Land Surface Temperature*). Onde: Temp. FLIR = temperatura da biomassa combustível medida com

a câmera térmica FLIR. As correlações significativas são indicadas por caixas preenchidas, vermelhas para correlações negativas e azuis para correlações positivas, variando de -1 a 1. As correlações não significativas são destacadas com valor de p.

4. CONCLUSÃO

Os resultados das análises da vegetação lenhosa demonstraram a heterogeneidade das fisionomias de savana e a importância de se considerar as diferenças de estrutura da vegetação lenhosa, composição e histórico de fogo nas análises sobre a dinâmica vegetal e de regime de fogo, o que revela a complexa interação entre vegetação, histórico de fogo e sazonalidade e como estes fatores influenciam na biomassa combustível e vegetação lenhosa. O principal fator que influenciou nas respostas encontradas da biomassa combustível foi a interação entre o histórico de fogo e a sazonalidade. O potencial de crescimento da biomassa combustível durante toda a estação seca, nas áreas com queima mais recente (HF1 e HF2), pode estar associado às adaptações da vegetação ao fogo e ao manejo integrado do fogo que ocorre na área de estudo, que promove queimadas menos intensas. A resposta da biomassa combustível aos estresses abióticos, mensurados a partir da atividade fotossintética, ao final da estação seca foi mais amena em áreas onde eventos de fogo ocorreram a mais tempo (HF3 e HF4) e a vegetação lenhosa é mais densa (cerrado denso).

Os recursos para os estudos que colaboram para o avanço da ciência não são sempre abundantes, portanto, validar os produtos de sensoriamento remoto que permitem a realização de pesquisas em diferentes escalas (temporal, espacial, global, regional e local) pode possibilitar sua utilização trazendo respostas cada vez mais efetivas e próximas da realidade de campo, incorporando maiores informações com qualidade e rigor.

No futuro, a avaliação das relações vegetação arbórea, biomassa combustível e sazonalidade considerando também as características edáficas e microclimáticas em uma escala de tempo maior, além de considerar os efeitos do fogo e sua origem (natural, antrópica, queima prescrita), poderá trazer novas considerações além de contribuir no desenvolvimento de políticas de manejo do fogo possibilitando maior efetividade de suas aplicações, além de fornecer insights para a conservação da biodiversidade dos ecossistemas de savana.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (PDPG-FAP N°. 18/2020), e a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA (N°. CACD 02989/20; N°. BD-01136/20), pelo fomento da bolsa de pesquisa ao longo do desenvolvimento do trabalho. Ao Programa de pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA/São Luís). Ao Projeto MAP-Fire Maranhão (FAPESP N° 2020/16457-3), e ao CNPq (processo N°409531/2021-9).

CAPÍTULO V: CLASSIFICAÇÃO DE REGIÕES MICROCLIMATICAS E CARACTERIZAÇÃO COM BASE NO REGIME DE FOGO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO - BRASIL

Izadora S. de Carvalho; Swanni T. Alvarado; Patrick Costa Silva; Tiago Massi Ferraz.

Artigo a ser submetido na revista: [Revista Brasileira de Geografia Física](#).

RESUMO

As ecorregiões são áreas geograficamente delimitadas e definidas por similaridades ambientais, vegetais e animais. No bioma Cerrado, foram delimitadas 19 ecorregiões. Entretanto a heterogeneidade das regiões savânicas também deve ser estudada em escala local. A influência do clima na atividade do fogo indica que o aumento da temperatura e as variações na precipitação podem impactar diretamente a distribuição de ocorrência de fogo em ecossistemas dependentes desse distúrbio, como o Cerrado. Este estudo investiga como as variáveis climáticas afetam os padrões de regime de fogo no Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM), uma unidade de conservação no norte do Cerrado brasileiro. Utilizando imagens de satélite, mapeamos o histórico de fogo ao longo de 39 anos (1984-2022) e a classificação da vegetação para o ano de 2022. Estabelecemos quatro classes de frequência de fogo (frequência baixa (FB) – áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada (FM) – de 6-18; frequência alta (FA) – áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queimada). As regiões microclimáticas foram mapeadas com dados do *TerraClimate* (evapotranspiração, precipitação acumulada, déficit de pressão de vapor, umidade do solo, temperatura, e velocidade do vento) e modelo digital de elevação (SRTM), utilizando classificação não supervisionada com algoritmo *wekaKMean*. Foram classificadas seis regiões microclimáticas (R1, R2, R3, R4, R5 e R6). Os resultados revelaram diferenças nas características climáticas e na distribuição dos tipos de vegetação entre as regiões, e as influências no regime de fogo observado na área de estudo. As análises demonstraram que a maioria das regiões apresentou FM de ocorrência de fogo, destacando-se as regiões R4 (159,1 km², 52,3%), R3 (132,9 km², 45,4%), R5 (196,32 km², 44,0%) e R1 (111,3 km², 37,3%), sendo regiões com maior cobertura de fisionomias de cerrado aberto e cerrado denso. As regiões R2 e R6 apresentaram principalmente áreas na classe de FB, com 43,4% (55,1 km²) e 39,5% (54,3 km²) de suas áreas, respectivamente, com predomínio de fisionomias com maior densidade lenhosa como o cerradão. O estudo demonstrou a relação entre vegetação-fogo-microclima, em escala local, sugerindo contribuições para ações de manejo do fogo e construção de políticas de conservação do bioma Cerrado frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Frequência de fogo; Microclimas; Cerrado; Manejo; Classificação não supervisionada.

ABSTRACT

Ecoregions are geographically delimited areas defined by environmental, plant and animal similarities. In the Cerrado biome, 19 ecoregions have been delimited. However, the heterogeneity of savanna regions should also be studied at a local level. The influence of climate on fire activity indicates that increases in temperature and variations in

precipitation can directly impact the distribution of fire occurrences in ecosystems dependent on this disturbance, such as the Cerrado. This study investigates how climate variables affect fire regime patterns in the Chapada das Mesas National Park (CMNP), a conservation unit in the northern Brazilian Cerrado. Using satellite images, we mapped fire history over 39 years (1984-2022) and vegetation classification for the year 2022. We established four classes of fire frequency (low frequency (LF) - areas that burned 1-5 times; moderate frequency (MF) - 6-18 times; high frequency (HF) - that burned more than 18 times; and unburned areas). The microclimate regions were mapped using TerraClimate data (evapotranspiration, accumulated precipitation, vapour pressure deficit, soil moisture, temperature and wind speed) and a digital elevation model (SRTM), using unsupervised classification with the wekaKMean algorithm. Six microclimate regions were classified (R1, R2, R3, R4, R5 and R6). The results revealed differences in the climatic characteristics and distribution of vegetation types between the regions, and the influences on the fire regime observed in the study area. The analyses showed that most of the regions presented MF fire occurrence, with R4 (159.1 km², 52.3%), R3 (132.9 km², 45.4%), R5 (196.32 km², 44.0%) and R1 (111.3 km², 37.3%) standing out as regions with greater coverage of open savanna and dense savanna physiognomies. Regions R2 and R6 mainly had areas in the LF class, with 43.4% (55.1 km²) and 39.5% (54.3 km²) of their areas, respectively, with a predominance of physiognomies with greater tree density such as *cerradão*. The study demonstrated the relationship between vegetation-fire-microclimate on a local scale, suggesting contributions to fire management actions and the construction of conservation policies for the Cerrado biome in the face of climate change.

Keywords: Fire frequency; Microclimates; Cerrado; Management; Unsupervised classification.

1. INTRODUÇÃO

As ecorregiões são área geograficamente delimitadas e definidas com base em similaridades ambientais, vegetais e animais. Globalmente, foram mapeadas 200 ecorregiões (Olson; Dinerstein, 1998). No bioma Cerrado, a savana brasileira, inicialmente foram delimitadas 22 ecorregiões (Arruda, 2003; Arruda *et al.*, 2008), porém, estudos mais recentes reduziram esse número para 19 ecorregiões, com base em produtos de sensoriamento remoto mais atuais (Sano *et al.*, 2019). A influência do clima na atividade do fogo, analisada por meio de modelos climáticos, indica que o aumento das temperaturas e as variações nos padrões de precipitação nas próximas décadas poderão impactar diretamente a sazonalidade e a duração da época de ocorrência de fogo (Marengo *et al.*, 2022; Wasserman; Mueller, 2023).

Estudos, em escala regional, têm confirmado a heterogeneidade do bioma Cerrado e a importância de considerar diversos fatores ambientais, bem como a influência de

distúrbios, como o fogo, que contribuem para a diversidade de mecanismos adaptativos das espécies vegetais em regiões de savana (Sano *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021). No entanto, é necessário considerar esses aspectos em uma escala espacial mais refinada (local), destacando os padrões de regime de fogo e as características microclimáticas (Gomes *et al.*, 2020a; Silva *et al.*, 2021). Para entender como as mudanças climáticas podem afetar esses padrões, em escala regional e local, estudos são realizados e já relatam a diminuição das chuvas e consequentemente de recursos hídricos em regiões do Cerrado (Marengo *et al.*, 2022; Rodrigues *et al.*, 2022).

Os principais fatores que influenciam e são utilizados em análises de previsão e avaliação de risco de ocorrência de fogo e mudanças nos padrões de regime de fogo incluem variáveis climáticas, como temperatura, precipitação, umidade relativa e vento (De Souza; Koerner; Chlad, 2015; Silva *et al.*, 2019). Além dessas variáveis, outros elementos como o déficit de pressão de vapor e a velocidade do vento, juntamente com a composição vegetal e biomassa combustível, desempenham um papel importante na compreensão do comportamento do fogo (Gomes *et al.*, 2020a). Nesse contexto, o mapeamento climático, utilizando dados de sensoriamento remoto em diferentes escalas (global, regional, local), permite a incorporação de informações que podem contribuir significativamente para a efetividade das ações de gestão em área protegidas, com o objetivo de preservar a biodiversidade dos ecossistemas e regular os fatores bióticos e abióticos afetados pelas mudanças climáticas.

Portanto, buscamos compreender a distribuição microclimática em uma área protegida no norte do Cerrado brasileiro e suas relações com aspectos do regime de fogo, como a frequência. Para isso, investigamos se (i) diferentes regiões microclimáticas influenciam a distribuição espacial da ocorrência de fogo, e (ii) identificar os padrões de frequência de fogo de cada região. Visando, assim, gerar um mapeamento que possa contribuir para a gestão de atividades essenciais realizadas em áreas protegidas do Cerrado, como o manejo integrado do fogo (MIF) e a conservação de ecossistemas de savana, além de fornecer informações para outras pesquisas.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A área de estudo selecionada foi o Parque Nacional da Chapada das Mesas (PNCM), localizado no Sudoeste do estado do Maranhão (7° 12' 58" S e 47° 07' 40" W).

O PNCM é uma Unidade de Conservação da classe de proteção integral. Sua criação foi em 12 de dezembro de 2005, e sua área abrange os municípios de Estreito, Carolina e Riachão (ICMBio, 2019), (Figura 1). A região é caracterizada por um clima tropical úmido (Aw), com duas estações bem definidas, uma seca, entre os meses de maio a outubro, e outra chuvosa, entre os meses de novembro a abril, com média de temperatura máxima de 32 °C e mínima de 19 °C ao longo do ano. Os solos da região são constituídos em sua maioria de neossolo quartizarênico, variando entre latossolo vermelho-amarelo e plintossolo, sendo a maioria de textura arenosa, segundo classificação dos solos brasileiros do Instituto de Geografia e Estatística (IBGE).

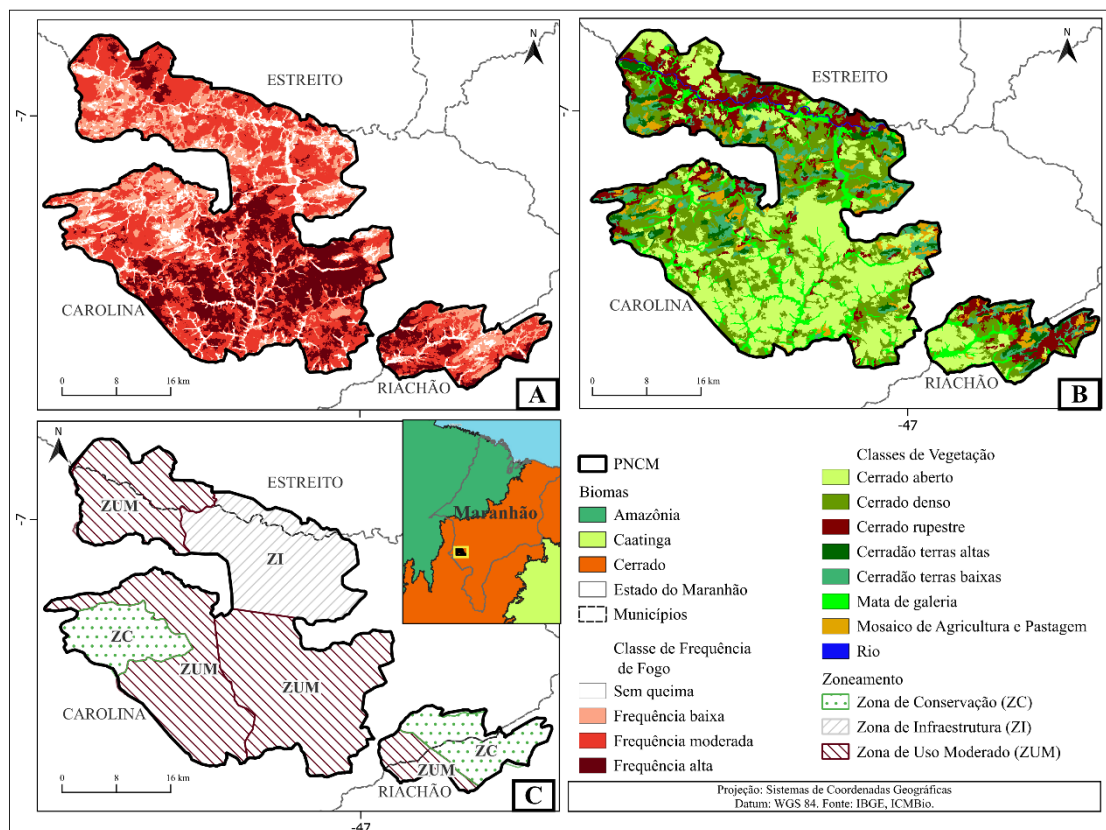


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, o Parque Nacional da Chapada das Mesas. (A) Classe de frequência de fogo com base na reconstrução do histórico de fogo de 1984 até 2022, onde: frequência baixa, são áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada, queimaram de 6-18; frequência alta, áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima. (B) Classe de fisionomias vegetais encontradas na área de estudo (De Carvalho *et al.*, 2024). E (C) Zoneamento com base no plano de manejo do PNCM (ICMBio, 2019).

2.2 Mapeamento das regiões microclimáticas

Para o mapeamento das regiões microclimáticas do PNCM foi utilizada a base de dados do TerraClimate, que disponibiliza diversos dados de variáveis climáticas globais

disponíveis a partir de 1958 com resolução espacial de 4638,3 metros e resolução temporal mensal (Abatzoglou *et al.*, 2018). Dentre as variáveis disponibilizadas foram utilizadas: evapotranspiração real, precipitação anual acumulada, umidade do solo, temperatura (mínima e máxima), déficit de pressão de vapor e velocidade do vento, considerando o período de 1984 até 2022, conforme série de regime de fogo mapeado (Tabela 1). Além disso, utilizamos dados do modelo digital de elevação (MDE) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr *et al.*, 2007). Os produtos foram obtidos através da plataforma *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick *et al.*, 2017), utilizando API Python.

Tabela 1 - Descrição dos dados utilizados no estudo.

Produto	Unidade	Período	Tamanho do Pixel	Fonte
Evapotranspiração real (ER)	mm	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Déficit de pressão de vapor (DPV)	kPa	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Temperatura máxima (Tmax)	°C	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Temperatura mínima (Tmin)	°C	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Precipitação anual (PA)	mm	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Umidade do solo (US)	mm	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Velocidade do vento (Vs)	m/s	1984-2022	4638.3	Abatzoglou <i>et al.</i> , (2018)
Elevação (MDE)	m	2000	30 m	Farr <i>et al.</i> , (2007)
Fisionomias Vegetais	-	2022	30 m	Artigo 1 desta tese
Fogo	-	1984-2022	30 m	De Carvalho <i>et al.</i> (2023)

Para o mapeamento das regiões microclimáticas do PNCM a partir das variáveis climáticas do *TerraClimate* e MDE (Figura 2), utilizamos algoritmo *wekaKMean* de classificação não supervisionado (Arthur; Vassilvitskii, 2007), implementado no GEE e que consiste na formação de agrupamentos (*clusters*) de *pixels* com base na distância Euclidiana. Os parâmetros utilizados no processo de treinamento dos dados foi *numPixels*=5000 e de classificação foi *k* = 6, delimitados após a realização de diversos testes. Para padronizar o tamanho dos pixels dos dados foi realizado processo de reamostragem para 30 m. A visualização das imagens e a construção dos mapas foram realizadas com o programa QGIS, versão 3.22.14 (QGIS Development Team, 2023). O código utilizado, com as etapas de obtenção das imagens, e classificação está disponível em https://github.com/IzadoraSC/regioes_microclimaticas.

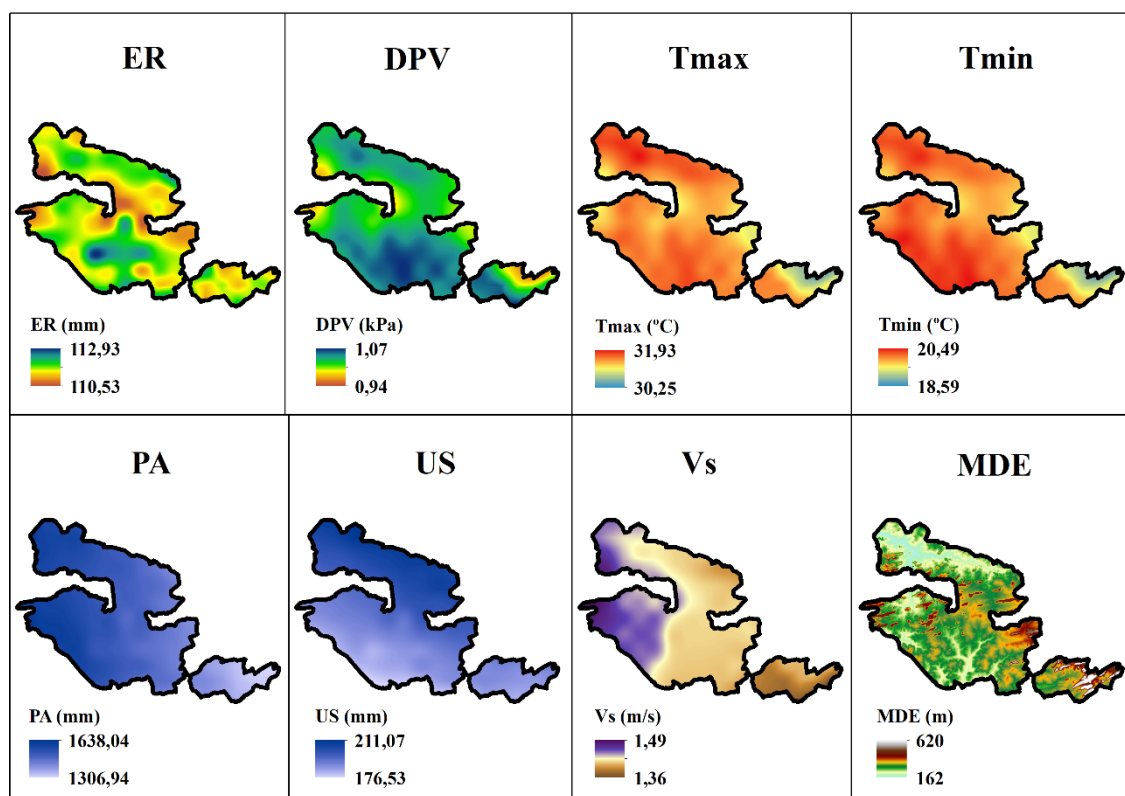


Figura 2 - Variáveis climáticas do *TerraClimate* utilizadas no estudo (evapotranspiração real=ER, déficit de pressão de vapor=DPV, temperatura máxima=Tmax, temperatura mínima=Tmin, precipitação anual=PA, umidade do solo=US, velocidade do vento=Vs e elevação=MDE). Dados reamostrados para 30x30m o tamanho do pixel, exceto MDE.

2.3 Histórico do regime de fogo

O mapeamento do histórico de fogo realizado compreende um período de 39 anos (1984-2022). Foi utilizada a base de dados de áreas queimadas da área de estudo disponível em <https://zenodo.org/records/10289082> (De Carvalho; Alvarado; Ferraz, 2023), para os anos de 1990 até 2017. Para completar a série histórica de 39 anos seguimos a mesma metodologia utilizada para o mapeamento das áreas queimadas, com base nas imagens do satélite Landsat séries 5 Thematic Mapper (TM), 8 Operational Land Imager (OLI) e 9 Operational Land Imager (OLI), com resolução espacial de 30 metros. O mapeamento das cicatrizes de fogo foi realizado de forma manual em escala de 1:25.000.

Após o mapeamento das cicatrizes de fogo, foram estabelecidas quatro classes de ocorrência de fogo com base em limiares (quartis), definindo assim classes de ocorrências de fogo durante o período de estudo em: frequência baixa (FB) – áreas que queimaram de

1-5 vezes; frequência moderada (FM) – queimaram de 6-18; frequência alta (FA) – áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima (SQ) (Figura 1A). A obtenção deste produto está descrita detalhadamente no primeiro artigo desta tese.

2.4 Fisionomias vegetais

O mapeamento dos tipos de fisionomias vegetais foi realizado para o ano de 2022, a partir do uso de imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat 8 com o sensor OLI (*Operation Land Imager*). O processo de classificação da imagem teve início com a segmentação utilizando o algoritmo Shepherd (Bunting *et al.*, 2014; Shepherd; Bunting; Dymond, 2019), seguido da classificação supervisionada com o classificador Random Forest. Posteriormente, foi realizada a validação da classificação através de métricas. Todas as etapas foram realizadas com a biblioteca RSGISLib implementada na linguagem python, obtendo ao final um produto com resolução espacial de 30m com os tipos de fisionomias vegetais presentes na área do PNCM (Figura 1B). A obtenção deste produto está descrita detalhadamente no primeiro artigo desta tese.

2.5 Análise e processamento dos dados

As análises das relações entre as regiões microclimáticas mapeadas, os tipos de vegetação e as classes de frequência de fogo foram realizadas a partir de estatística zonal para gerar métricas como média, mínima, máxima para a compreensão das características de cada região. Essas métricas possibilitam a compreensão da distribuição espacial e a dominância das diversas características analisadas no estudo, assim como, a distribuição das variáveis climáticas utilizadas para cada região microclimática classificada. Então, foram calculadas as áreas (km²) e porcentagens (%) de ocupação de cada região, e a contribuição de cada tipo de vegetação e regime de frequência de fogo.

As análises foram realizadas utilizando o programa R versão 4.2.2 (R Core Team, 2023), e os pacotes *terra* versão 1.7-65 (Hijmans, 2023) e *sf* versão 1.0-15 (Pebesma; Bivand, 2023; Pebesma, 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Regiões microclimáticas: aspectos gerais

A partir da classificação não supervisionada com o algoritmo *wekaKMean* foram delimitadas 6 regiões microclimáticas (R1, R2, R3, R4, R5 e R6) para o PNCM (Figura 3A). O mapeamento sugere que estas regiões possuem características climáticas que se diferenciam entre si, com base nas variáveis climáticas consideradas no estudo, a evapotranspiração real (ER), precipitação anual (PA), umidade do solo (US), temperatura (mínima - Tmax e máxima - Tmin), déficit de pressão de vapor (DPV) e velocidade do vento (Vs), além da elevação (MDE). Em termos de área, a região R1 ocupa 298,1 km² (18,6%), a R2 127,1 km² (7,9%), a R3 292,9 (18,2%), a R4 304,5 km² (19,0%), a R5 446,5 km² (27,8%) e a R6 137,3 km² (8,6%), da área total do PNCM.

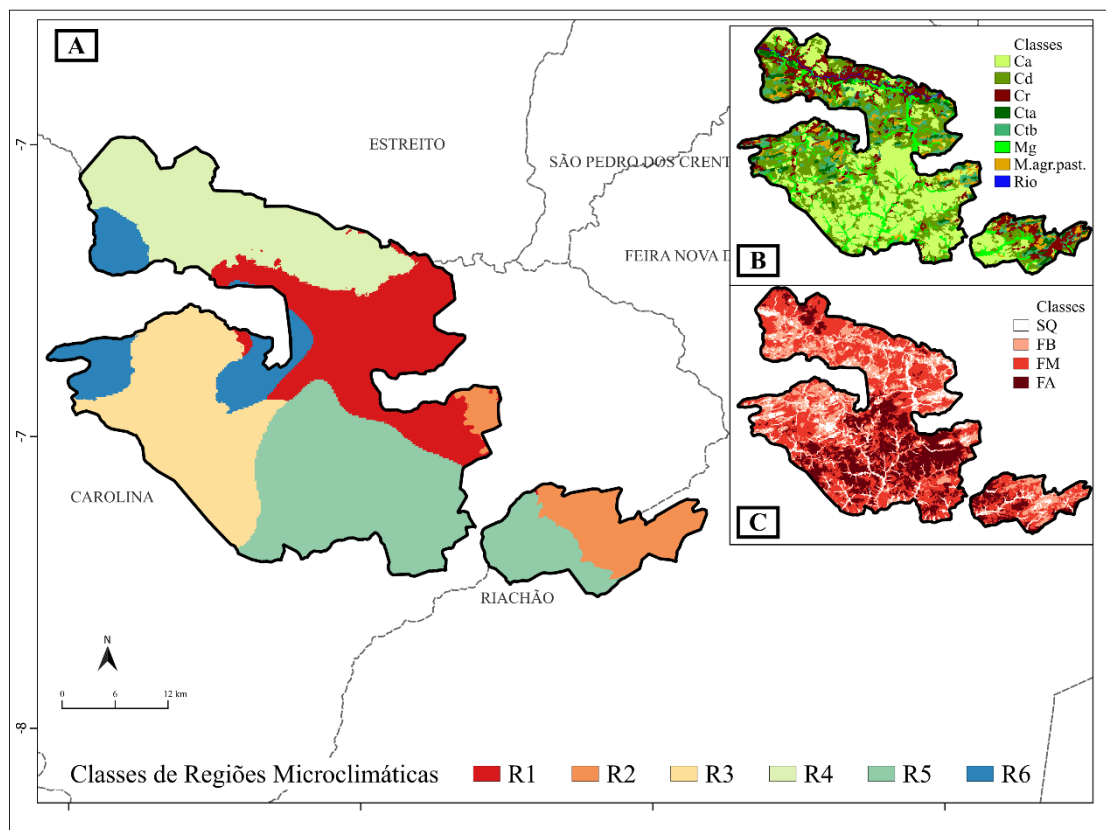


Figura 3 - (A) Classificação das regiões microclimáticas do PNCM, (B) classes de vegetação e uso (cerrado aberto=Ca, cerrado denso=Cd, cerrado rupestre=Cr, cerradão terras altas=Cta, cerradão terras baixas=Ctb, mata de galeria=Mg, e mosaico de agricultura e pastagem=M. agr. past.), e (C) classes de frequência de fogo: frequência baixa=FB, áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada=FM, queimaram de 6-18; frequência alta=FA, áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima=SQ, onde não teve ocorrência de fogo no período mapeado (1984-2022).

Analisando o comportamento das variáveis climáticas trabalhadas neste estudo, observamos que a maior média de ER, foi na região R3 e R5 com valor de 111,8 mm, a região R6 apresentou o menor valor de ER com 111,0 mm, e demais 111,3 mm (R1),

111,4 mm (R2) e 111,7 mm (R4). Para o DPV a região com maior média foi a R5 com valor de 1,05 kPa, e as regiões com menor média foram as R2 e R6 (1,00 kPa), enquanto as demais variaram entre 1,02 kPa (R1) e 1,03kPa (R3 e R4). O DPV foi o principal indicador do comportamento do fogo em estudo realizado por Gomes *et al.* (2020a), em áreas de vegetação campestre, savana florestal, destacando a importância de se considerar os efeitos da vegetação e do microclima nas estratégias de manejo em regiões do Cerrado.

Com relação aos dados de temperatura, as regiões R1, R3, R4, R5 e R6 apresentaram valores de média de temperatura máxima de 32°C, 1 grau a mais que a região R2 que teve uma média de 31°C. Já para a média de temperatura mínima, as regiões R1, R2 e R4 apresentaram 19°C, 1 grau a menos em relação às demais (R3, R5 e R6) que apresentaram 20°C.

A precipitação anual variou de 1.306 mm, valor encontrado na região R2, a 1.638 mm, valor encontrado na região R6, aumentando do leste para o oeste (Figura 2), assim como observado por Sano *et al.* (2019), sendo o sentido das fronteiras entre o biomas Caatinga (leste) e bioma Amazônico (oeste). A precipitação média anual para a região R1 foi de 1.474 mm, para R2 foi de 1.348 mm, para R3 foi de 1.575 mm, para R4 foi de 1.545 mm, para R5 foi de 1.468 mm, e para R6 foi de 1.569 mm. O maior volume de precipitação em regiões com predominância de formação vegetal aberta pode contribuir para o desenvolvimento da vegetação combustível dessas regiões.

A umidade do solo foi menor nas regiões R3 e R5 com 177 mm em comparação às mínimas das demais regiões, que variaram entre 180 mm (R4) a 189 mm (R1). A maior média foi da região R4 (205 mm), que também teve a maior máxima (211 mm). As médias das demais regiões foram R1 (200 mm), R2 (189 mm), R3 (188 mm), R5 (187 mm) e R6 (194 mm). Este resultado pode ter sido obtido, devido à região R4 estar localizado o Rio Farinha (Figura 1B, Figura 3B, Figura 4), um dos principais afluentes do rio Tocantins. A fisionomia de mata de galeria também pode ter contribuído para os resultados de umidade do solo, por serem fisionomias vegetais associadas a cursos d'água (Ribeiro; Walter, 2008).

Considerando os valores médios referentes a Vs, a região R6 foi destaque ao apresentar valor de 1,46 m/s, seguida pela região R3 (1,45 m/s), R4 (1,43 m/s), R1 (1,42 m/s), R5 (1,41 m/s) e R2 (1,40 m/s). As maiores médias de elevação são da região R2 com 445 m, e R1 e R6, ambas com 336 m, seguidas por R5 com 302 m, R3 com 290 m e

R4 com 244 m. A máxima elevação foi encontrada na região R2 (619 m) e a mínima na região R4 (160 m).

A região do PNCM encontra-se na área de maior expansão do desmatamento do bioma Cerrado, denominada MATOPIBA (Silva *et al.*, 2020, 2021). Segundo Marengo *et al.* (2022) a região do MATOPIBA apresenta tendências ao agravamento das condições climáticas extremas como secas severas, com aumento de temperatura, déficit de pressão de vapor e de frequência de dias secos, além da diminuição de precipitação, umidade e evaporação, apresentando atraso no início do período chuvoso colaborando para um maior risco de ocorrência de fogo durante o final da estação seca. Os autores sugerem que tais tendências podem impactar na vegetação, devido à intensificação das condições de estresse, principalmente o estresse hídrico.

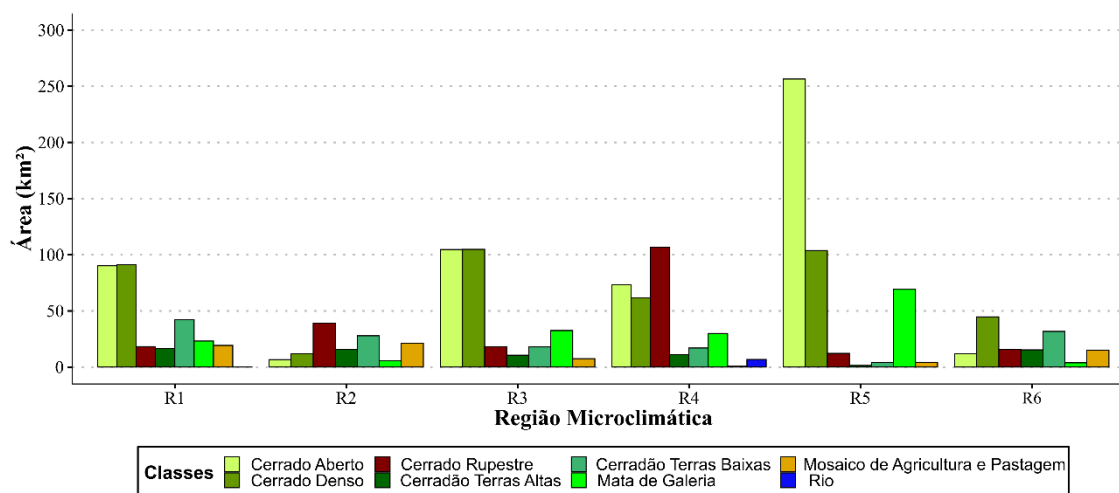


Figura 4 - Tipos de vegetação e uso do solo por região microclimática no PNCM.

Analizamos a distribuição dos tipos de vegetação em cada região microclimática (Figura 4). Observamos que a região microclimática R1 é dominada por fisionomias (91,1 km², 30,6%) de cerrado denso e cerrado aberto (90,2 km², 30,3%), porém, há também presença relevante de cerradão terras baixas (42,3 km², 14,2%). Na região R2 prevalecem fisionomias de cerrado rupestre (39,1 km², 30,7%), seguida por cerradão terras baixas (27,9 km², 22,0%) e mosaico de agricultura e pastagem (21,2 km², 16,7%). A menor precipitação anual e maior elevação média encontradas na região R2, sugerem condições específicas para os tipos de coberturas e uso do solo encontrados, uma vez que, na área do PNCM, as áreas de maior elevação são geralmente utilizadas pela comunidade tradicional, que desenvolvem atividades voltadas a agricultura de subsistência (Lima *et al.*, 2007; Silva; Araújo; Conceição, 2019).

Na região R3 duas fisionomias possuem valores próximos de ocupação, a área de cerrado aberto (104,7 km², 35,7%) e cerrado denso (104,8 km², 35,8%), seguidas pela fisionomia de mata de galeria (32,5 km², 11,1%). Na região R4, observamos o predomínio de fisionomias de cerrado rupestre (106,5 km², 35,0%), seguida por cerrado aberto (73,2 km², 24,0%) e cerrado denso (61,6 km², 20,2%). A região R5 mostra uma grande predominância de cerrado aberto (256,5 km², 57,5%), seguida por cerrado denso (103,8 km², 23,3%) e mata de galeria (69,2 km², 15,5%). Na região R6 observamos uma proporção mais semelhantes da distribuição de cada classe de vegetação e uso do solo, em primeiro as áreas de cerrado denso (44,8 km², 32,6%), seguido por cerradão terras baixas (31,7 km², 23,1%), cerrado rupestre (15,6 km², 11,4%), cerradão terras altas (15,3 km², 11,2%), mosaico de agricultura e pastagem (15, 2 km², 11,0%).

Analizando a distribuição das classes de frequência de fogo para cada região (Figura 3C, Figura 5), os resultados mostraram que a maioria das regiões possui FM de ocorrência de fogo, com a região R4 em destaque, do total de sua área 52,3% (159,1 km²) queimaram ente 6 e 18 vezes, seguida por R3 (132,9 km², 45,4%), R5 (196,32 km², 44,0%) e R1 (111,3 km², 37,3%). A região R5, por ser a que possui a maior área e características como uma maior ocorrência de fisionomia de cerrado aberto, maiores médias de ER e US, sugere condições mais secas, pode favorecer a ocorrência de fogo, sendo, portanto, a região com maior área (151,6 km², 34%) na classe de FA.

As regiões com áreas, em sua maioria, na classe de FB foram a R2 (55,1 km², 43,4%) e R6 (54,3 km², 39,5%), ou seja, queimaram entre 1 e 5 vezes durante os 39 anos de regime de fogo mapeados. A região R2 apresentou a menor precipitação anual e maior elevação média, além de baixo DPV e Vs, quando comparada com as demais regiões, o que pode oferecer menores condições para a propagação do fogo, favorecendo formações vegetais mais densas. As regiões R2 e R6 também tiveram as maiores médias de elevação, sugerindo a contribuição do efeito da topografia na distribuição de ocorrência de fogo.

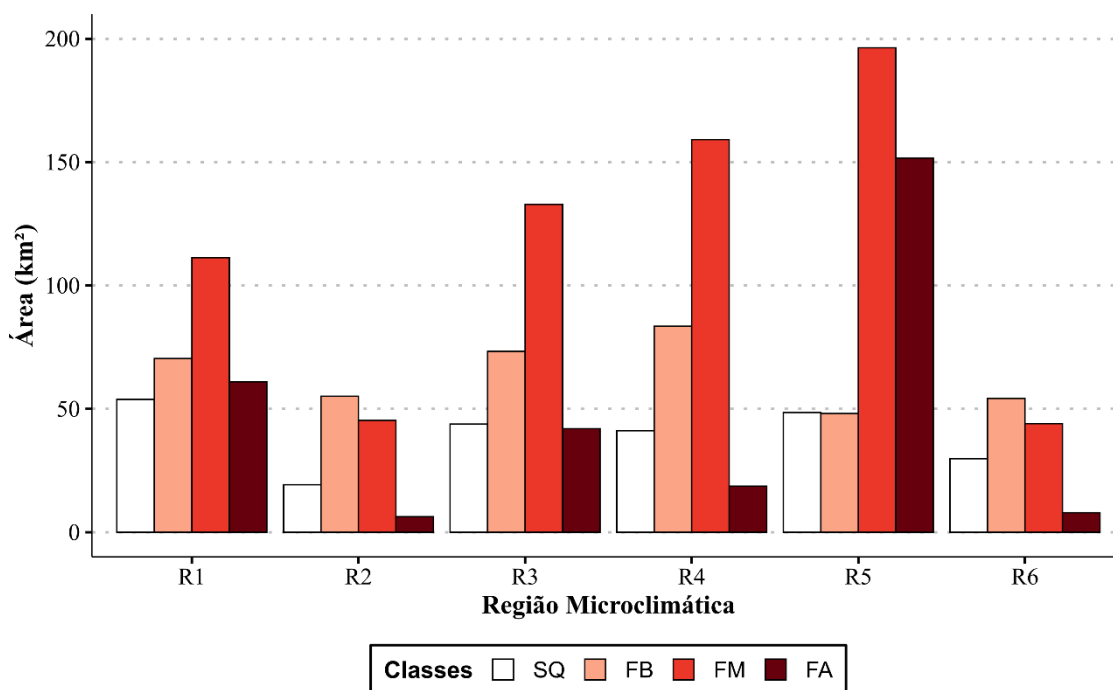


Figura 1 - Classes de frequência de fogo por região microclimática no PNCM. Frequência baixa=FB, áreas que queimaram de 1-5 vezes; frequência moderada=FM, queimaram de 6-18; frequência alta=FA, áreas que queimaram acima de 18 vezes; e áreas sem queima=SQ, que não houve ocorrência de fogo no período mapeado (1984-2022).

Considerar informações do regime de fogo (área queimada, tamanho médio de cicatriz, severidade, sazonalidade, frequência) torna-se essencial para a classificação de ecorregiões do bioma Cerrado, por isso, Silva *et al.* (2021) agregaram estas informações no mapeamento das ecorregiões do Cerrado realizado por Sano *et al.* (2019). Entretanto, a heterogeneidade do regime de fogo pode ser diferente conforme a escala espacial que se está trabalhando. Por isso, assim como destacado por Silva *et al.* (2021), propomos a classificação e mapeamento das regiões microclimáticas do PNCM, relacionando as características de frequência de fogo e fisionomias vegetais, demonstrando assim, as relações entre fogo-vegetação-clima, e como essa interação pode contribuir para a distribuição espaço-temporal do fogo em ecossistemas de savana, como encontrado na área de estudo (Alvarado *et al.*, 2020; Archibald *et al.*, 2013).

Destacamos, portanto, a importância de estudos regionais de delimitação de regiões com similaridades geográficas, biofísicas e ecológicas. Entretanto, estudos realizados em escalas locais, como o nosso, possibilitam uma compreensão dos impactos que as mudanças climáticas podem causar a níveis locais. Assim, buscamos maiores entendimentos sobre a complexa relação vegetação-fogo-clima nos ecossistemas savânicos, contribuindo para o manejo e conservação desses ambientes frente às

dinâmicas das alterações ambientais que influenciam seus processos ecológicos (Keeley; Syphard, 2016).

4. CONCLUSÕES

A delimitação de regiões microclimáticas possibilitou a análise sobre a distribuição dos tipos de vegetação, padrões de regime de fogo ao longo da extensão territorial do PNCM e sua relação com as variáveis climáticas que podem influenciar a ocorrência de fogo e distribuição de espécies. Os resultados mostraram que a área do PNCM possui 6 regiões com similaridades entre variáveis climáticas. Foi possível observar as características fitofisionomias e de frequência de fogo de cada região classificada. As regiões R3, R4 e R5, apresentaram características climáticas com maiores tendências de secas, maiores médias de temperatura, DPV, ER, e menor US, sendo ocupadas predominantemente por fisionomias de cerrado aberto e cerrado denso, o que sugere uma relação direta entre o microclima e a dinâmica de fogo encontrado nas regiões.

Reforçamos a importância de analisar não apenas a frequência dos incêndios, mas também outras métricas de regime de fogo, como a área queimada e a severidade. A região de estudo, assim como outras áreas protegidas do Cerrado, é caracterizada por um mosaico de fitofisionomias, onde os tipos de vegetação de savana prevalecem e são responsáveis por conter grande parte da biomassa combustível. O PNCM, assim como outras unidades de conservação e terras indígenas do Cerrado, tem implementado o manejo integrado do fogo (MIF) que colabora para a existência de um mosaico de classes de frequência de fogo. Portanto, torna-se relevante considerar as características como de regime de fogo e vegetação, juntamente com o mapeamento de regiões microclimáticas, contribuindo, assim, para a construção de zoneamentos e manejos adaptativos em áreas prioritárias para a conservação dos recursos ambientais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (PDPG-FAP N°. 18/2020) e à Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão – FAPEMA (N°. BD-01136/20), pelo fomento da bolsa de pesquisa ao longo do desenvolvimento do trabalho,

bem como, ao Programa de Pós-graduação em Agroecologia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA/São Luís).

CONSIDERAÇÕES

A constante evolução dos estudos sobre a dinâmica do fogo no Cerrado melhora a compreensão frente aos avanços das mudanças climáticas que influênciam o regime natural do fogo, assim como os distúrbios antrópicos. A caracterização das fisionomias vegetais de áreas protegidas no ecótono Amazonia-Cerrado torna-se essencial para a compreensão das dinâmicas ecológicas, assim como, considerar as relações vegetação-fogo-clima para a conservação dessas ecorregiões savânicas e na formulação de programas e políticas de manejo integrado do fogo.

Recentemente, foi instituída a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo (Lei nº 14.944 de 31 de julho de 2024), e destaca, entre outras coisas, que o manejo integrado do fogo em áreas protegidas deve considerar “o manejo conservacionista da vegetação nativa e da sua biodiversidade e a manutenção da cultura das populações residentes”. Nesse contexto, as informações sobre o regime de fogo e suas métricas (frequência, época, tamanho da área queimada, intensidade, severidade e tipo de queima) são fundamentais no manejo da biomassa combustível, além de outras características como condições ambientais, topográficas, climáticas, e sua origem (natural, antrópica, queima prescrita).

A heterogeneidade dos ecossistemas Savânicos demonstram a importância dos estudos em diferentes escalas espaciais (global, regional e local). Uma vez que a nível local pode-se obter informações com maior precisão e detalhamento colaborando assim para a elaboração de programas de manejo integrado do fogo mais efetivos, considerando os principais fatores na relação vegetação-fogo-clima.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. *et al.* TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 170191, 2018.
- ALENCAR, A. *et al.* Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 924, 2020.
- ALVARADO, S. T. *et al.* Thresholds of fire response to moisture and fuel load differ between tropical savannas and grasslands across continents. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 331–344, 2020.
- ALVARADO, S. T.; SILVA, T. S. F.; ARCHIBALD, S. Management impacts on fire occurrence: A comparison of fire regimes of African and South American tropical savannas in different protected areas. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 218, p. 79–87, 2018.
- ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 536, 2018.
- ARCHIBALD, S. *et al.* Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 033003, 2018.
- ARCHIBALD, S. *et al.* Defining pyromes and global syndromes of fire regimes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 110, n. 16, p. 6442–6447, 2013.
- ARTHUR, D.; VASSILVITSKII, S. k-means++: the advantages of careful seeding. In: **Proceedings of the Eighteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms**. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, p. 1027–1035, 2007.
- ARRUDA, M.B. **Representatividade ecológica com base na biogeografia de biomas e ecorregiões continentais do Brasil: O caso do bioma Cerrado**. Tese. Universidade de Brasília, Brasília. 2003.
- ARRUDA, M.B.; PROENÇA, C.E.B.; RODRIGUES, S.; MARTINS, E.S.; MARTINS, R.C.; CAMPOS, R.N. Ecorregiões, unidades de conservação e representatividade ecológica do bioma Cerrado. In: SANO, M.S.; ALMEIDA, S.M.; RIBEIRO, J.F. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. 1. Planaltina: Embrapa Cerrados, Cap. 8, p. 230-272, 2008.
- BATISTA, E. K. L. *et al.* An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: Outcomes of fire suppression policies. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 205, p. 40–49, 2018.
- BAUDENA, M. *et al.* Forests, savannas, and grasslands: bridging the knowledge gap between ecology and Dynamic Global Vegetation Models. **Biogeosciences**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1833–1848, 2015.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R. et al. Chlorophyll Fluorescence as a Probe of the Photosynthetic Competence of Leaves in the Field: A Review of Current Instrumentation. **Functional Ecology**, v. 3, n. 4, p. 497–514, 1989.

BOND, W.; KEELEY, J. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology & Evolution**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 387–394, 2005.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Experimental comparison of four remote sensing techniques to map tropical savanna fire-scars using Landsat-TM imagery. **International Journal of Wildland Fire**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 341, 2003.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Vegetation fires in the Anthropocene. **Nature Reviews Earth & Environment**, [s. l.], v. 1, n. 10, p. 500–515, 2020.

BROWN, C. F. et al. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. **Scientific Data**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 251, 2022.

BUCHHORN, M. et al. Copernicus Global Land Cover Layers—Collection 2. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1044, 2020.

BUNTING, P. et al. The Remote Sensing and GIS Software Library (RSGISLib). **Computers & Geosciences**, [s. l.], v. 62, p. 216–226, 2014.

CARDOSO, E. L. et al. Biomassa aérea e produção primária do estrato herbáceo em campo de *Elyonurus muticus* submetido à queima anual, no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 35, n. 8, p. 1501–1507, 2000.

CARDOSO, A. W. et al. Grass Species Flammability, Not Biomass, Drives Changes in Fire Behavior at Tropical Forest-Savanna Transitions. **Frontiers in Forests and Global Change**, [s. l.], v. 1, p. 6, 2018.

CHUVIECO, E. et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 225, p. 45–64, 2019.

CHUVIECO, E. et al. Human and climate drivers of global biomass burning variability. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 779, p. 146361, 2021.

CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. Mapping and inventory of forest fires from digital processing of tm data. **Geocarto International**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 41–53, 1988.

CLEWLEY, D. et al. A Python-Based Open Source System for Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) Utilizing Raster Attribute Tables. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 6, n. 7, p. 6111–6135, 2014.

CONCIANI, D. E. et al. Human-climate interactions shape fire regimes in the Cerrado of São Paulo state, Brazil. **Journal for Nature Conservation**, [s. l.], v. 61, p. 126006, 2021.

COUTINHO, L. M. Biomas brasileiros. Oficina de Textos, 2016.

DANTAS, V. D. L.; BATALHA, M. A.; PAUSAS, J. G. Fire drives functional thresholds on the savanna–forest transition. **Ecology**, [s. l.], v. 94, n. 11, p. 2454–2463, 2013.

DE CARVALHO, I. S. *et al.* How does the fire regime change after creating a protected area in the Brazilian Cerrado?. **Journal for Nature Conservation**, [s. l.], v. 71, p. 126318, 2023.

DE CARVALHO, I. S.; ALVARADO, S. T.; FERRAZ, T. M. **Burned Area Chapada das Mesas National Park**. (v.01) [Data set]. Zenodo. DOI: 10.5281/zenodo.10289082. 2023.

DE CARVALHO, I. S. *et al.* Relações entre incidência de queimadas e a dinâmica da vegetação no Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão, Brasil: uma abordagem a partir de métricas fenológicas derivadas de sensoriamento remoto. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 18, n. 2, p. 19–41, 2024.

DE SOUZA, F. T.; KOERNER, T. C.; CHLAD, R. A data-based model for predicting wildfires in Chapada das Mesas National Park in the State of Maranhão. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 3603–3611, 2015.

DURIGAN, G. Zero-fire: Not possible nor desirable in the Cerrado of Brazil. **Flora**, [s. l.], v. 268, p. 151612, 2020.

EAMUS, D.; HUETE, A.; YU, Q. **Vegetation Dynamics: A Synthesis of Plant Ecophysiology, Remote Sensing and Modelling**. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2016. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781107286221/type/book>. Acesso em: 16 jan. 2024.

ELOY, L. *et al.* Seasonal fire management by traditional cattle ranchers prevents the spread of wildfire in the Brazilian Cerrado. **Ambio**, [s. l.], v. 48, n. 8, p. 890–899, 2019.

EXAVIER, R; ZEILHOFER, P. **OpenLand: Quantitative Analysis and Visualization of LUCC**. R package version 1.0.2, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=OpenLand>>. 2021.

FARR, T. G. *et al.* The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 2005RG000183, 2007.

FERRAZ, T. M. *et al.* Cerrado physiognomies in Chapada das Mesas National Park (Maranhão, Brazil) revealed by patterns of floristic similarity and relationships in a transition zone. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 92, n. 2, p. e20181109, 2020.

FERREIRA, B. H. S. *et al.* Flowering and fruiting show phenological complementarity in both trees and non-trees in mosaic-burnt floodable savanna. **Journal of Environmental Management**, v. 337, p. 117665, jul. 2023.

FERREIRA, I. C. **florestal: Results for Forest Inventories**. R package version 0.1.3. Brasília, Brazil. <https://cran.r-project.org/package=florestal>, 2020.

- FERREIRA, P. M. A.; ELY, C. V.; BEAL-NEVES, M. Different post-fire stages encompass different plant community compositions in fire-prone grasslands from Southern Brazil. **Flora**, [s. l.], v. 285, p. 151937, 2021.
- FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? **Biodiversidade Brasileira**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 12–25, 2011.
- FRANKE, J. et al. Fuel load mapping in the Brazilian Cerrado in support of integrated fire management. **Remote Sensing of Environment**, v. 217, p. 221–232, nov. 2018.
- GEARY, W. L. *et al.* A guide to ecosystem models and their environmental applications. **Nature Ecology & Evolution**, [s. l.], v. 4, n. 11, p. 1459–1471, 2020.
- GIGLIO, L. *et al.* An Enhanced Contextual Fire Detection Algorithm for MODIS. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 87, n. 2–3, p. 273–282, 2003.
- GITELSON, A. *et al.* Uncertainty in the evaluation of photosynthetic canopy traits using the green leaf area index. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 320, p. 108955, 2022.
- GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 160, n. 3, p. 271–282, 2003.
- GOMES, L. *et al.* Dynamics of the woody vegetation of two areas of Cerrado sensu stricto located on different substrates. **Rodriguésia**, [s. l.], v. 67, n. 4, p. 859–870, 2016.
- GOMES, L. *et al.* Effects and behaviour of experimental fires in grasslands, savannas, and forests of the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 458, p. 117804, 2020a.
- GOMES, L. *et al.* Responses of Plant Biomass in the Brazilian Savanna to Frequent Fires. **Frontiers in Forests and Global Change**, [s. l.], v. 3, p. 507710, 2020b.
- GONG, Y. et al. Remote estimation of leaf area index (LAI) with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging for different rice cultivars throughout the entire growing season. **Plant Methods**, v. 17, n. 1, p. 88, 10 ago. 2021.
- GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 202, p. 18–27, 2017.
- HANSEN, M. C. *et al.* Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD). **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 140, p. 466–484, 2014.
- HARDESTY, J.; MYERS, R.; FULKS, W. Fire, Ecosystems and People: A Preliminary Assessment of Fire as a Global Conservation Issue. **The George Wright Forum**, [s. l.], v. 22, n. 4, 2005.

HIJMANS, R. **terra: Spatial Data Analysis**. R package version 1.7-65, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=terra>>. 2023.

HOFMANN, G. S. *et al.* Changes in atmospheric circulation and evapotranspiration are reducing rainfall in the Brazilian Cerrado. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 11236, 2023.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295–309, ago. 1988.

ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de manejo do Parque Nacional da Chapada das Mesas**. 36p, 2019.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (EDS.). **IPCC/TEAP special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons**. Cambridge; New York: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change [by] Cambridge University Press, 2005.

KEELEY, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. **International Journal of Wildland Fire**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 116, 2009.

KEELEY, J.; SYPHARD, A. Climate Change and Future Fire Regimes: Examples from California. **Geosciences**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 37, 2016.

KELLY, L. T. *et al.* Fire and biodiversity in the Anthropocene. **Science**, [s. l.], v. 370, n. 6519, p. eabb0355, 2020.

KRAWCHUK, M. A.; MORITZ, M. A. Constraints on global fire activity vary across a resource gradient. **Ecology**, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 121–132, 2011.

LASSLOP, G. *et al.* Global ecosystems and fire: Multi-model assessment of fire-induced tree-cover and carbon storage reduction. **Global Change Biology**, v. 26, n. 9, p. 5027–5041, set. 2020.

LE STRADIC, S. *et al.* Diversity of germination strategies and seed dormancy in herbaceous species of *campo rupestre* grasslands. **Austral Ecology**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 537–546, 2015.

LEHMANN, C. E. R. *et al.* Savanna Vegetation-Fire-Climate Relationships Differ Among Continents. **Science**, [s. l.], v. 343, n. 6170, p. 548–552, 2014.

LEUTNER, B. *et al.* **RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis**. R package version 0.3.0, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=RStoolbox>>, 2022.

LIBONATI, R. *et al.* Sensoriamento remoto de áreas queimadas no Brasil: processos, incertezas, desafios e perspectivas futuras. In: **Queimadas e Incêndios Florestais: mediante monitoramento orbital** (A.W. Setzer, N.J. Ferreira, org.). Oficina de Textos, São Paulo, 2021.

LIMA, L. P. et al. **Plano Operativo de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais do Parque Nacional da Chapada das Mesas**. Ministério do Meio Ambiente-MMA. 18p. 2007.

LOPES, S. D. F.; VALE, V. S. D.; SCHIAVINI, I. Efeito de queimadas sobre a estrutura e composição da comunidade vegetal lenhosa do cerrado sentido restrito em Caldas Novas, GO. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 695–704, 2009.

MARENGO, J. A. *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 457, 2022.

MARQUES, A. R.; AMORIN, M. C. de C. T. Saberes geográficos integrados aos estudos territoriais sob a ótica da implantação do Parque Nacional Da Chapada Das Mesas, sertão de Carolina/Ma. **Geografia em Questão**, [s. l.], v. 07, n. 02, p. 100–117, 2014.

MONTERO, D. *et al.* A standardized catalogue of spectral indices to advance the use of remote sensing in Earth system research. **Scientific Data**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 197, 2023.

NERI, S. C. *et al.* Decadal Fire Effects on the Structure, Composition, Diversity, and Aboveground Carbon Stocks of a Neotropical Savanna. **Forests**, v. 14, n. 12, p. 2294, 23 nov. 2023.

OLIVOTO T. Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 13. n. 4, p. 789-798, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13803>, 2022.

OLOFSSON, P. *et al.* Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 148, p. 42–57, 2014.

OLSON, D. M.; DINERSTEIN, E. The Global 200: A Representation Approach to Conserving the Earth's Most Biologically Valuable Ecoregions. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 502–515, 1998.

PAIS, C. *et al.* Global scale coupling of pyromes and fire regimes. **Communications Earth & Environment**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 267, 2023.

PÃOZINHO, F. C.; PONCIANO, L. C. M. D. O. Caminhos para a geoconservação no Parque Nacional da Chapada das Mesas: estratégias para a inclusão participativa comunitária no Geoturismo. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, [s. l.], v. 4, n. 15, p. 58, 2018.

PEBESMA, E. Simple features for r: standardized support for spatial vector data. **The R Journal**, v. 10, n. 1, p. 439. <https://doi.org/10.32614/rj-2018-009>, 2018.

PEBESMA, E.; BIVAND, R. **Spatial Data Science: With Applications in R**. 1. ed. New York: Chapman and Hall/CRC, 2023.

PILON, N. A. L. et al. The diversity of post-fire regeneration strategies in the cerrado ground layer. **Journal of Ecology**, v. 109, n. 1, p. 154–166, 2021.

PIVELLO, V. R. The Use of Fire in the Cerrado and Amazonian Rainforests of Brazil: Past and Present. **Fire Ecology**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 24–39, 2011.

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

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Available at: <http://qgis.osgeo.org>, 2023.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2023.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. In **Cerrado: ecologia e flora** (S.M. Sano, S.P. Almeida & J.F. Ribeiro, eds.). Embrapa Cerrados, Planaltina. p.151-212, 2008.

RODRIGUES, A. A. *et al.* Cerrado deforestation threatens regional climate and water availability for agriculture and ecosystems. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 28, n. 22, p. 6807–6822, 2022.

ROTETA, E. *et al.* Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 222, p. 1–17, 2019.

ROUSE, JR., J. W. *et al.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with Ertis. In: **NASA Special Publication**. [s.l: s.n.]. v. 351, p. 309-317, 1974.

SANO, E. E. *et al.* Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 232, p. 818–828, 2019.

SANTOS, L. S. *et al.* Variação da cobertura vegetal com ênfase na identificação de mancha de cerrado em um perfil topográfico do semiárido pernambucano - Brasil. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 32, p. 335–345, 2020.

SARMIENTO, G. Adaptive strategies of perennial grasses in South American savannas. **Journal of Vegetation Science**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 325–336, 1992.

SCHMIDT, I. B. *et al.* Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 55, n. 5, p. 2094–2101, 2018.

SCHMIDT, I. B. *et al.* Implementação do Programa Piloto de Manejo Integrado do Fogo em três Unidades de Conservação do Cerrado. [s. l.], 2016.

SCHMIDT, I. B.; ELOY, L. Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. **Flora**, [s. l.], v. 268, p. 151613, 2020.

SCHOLLES, R. J.; ARCHER, S. R. Tree-Grass Interactions in Savannas. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 28, n.1, p. 517-544, 1997.

- SCHOWENGERDT, R. A. CHAPTER 1 - The Nature of Remote Sensing. In: Schowengerdt, R. A., **Remote Sensing (3ed.)**, Academic Press., 2007.
- SHEPHERD, J.; BUNTING, P.; DYMOND, J. Operational Large-Scale Segmentation of Imagery Based on Iterative Elimination. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 658, 2019.
- SHLISKY, A. et al. Fire, Ecosystems and People: Threats and Strategies for Global Biodiversity Conservation, Global Fire Initiative Technical Report 2007-2. **The Nature Conservancy**, Arlington, VA, 2007.
- SHLISKY, A. *et al.* Overview: Global fire regime conditions, threats, and opportunities for fire management in the tropics. [s. l.], 2009.
- SILVA, P. S. et al. Drivers of burned area patterns in cerrado: the case of MATOPIBA region. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3/W12-2020, p. 135–140, 5 nov. 2020.
- SILVA, M. M. P. D. *et al.* Eficiência fotoquímica de gramíneas forrageiras tropicais submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 67–74, 2006.
- SILVA, P. S. *et al.* Impacts of the 1.5 °C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 446, p. 193–203, 2019.
- SILVA, P. S. *et al.* Putting fire on the map of Brazilian savanna ecoregions. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 296, p. 113098, 2021.
- SILVA, M. L. A. D.; ARAÚJO, M. D. F. V.; CONCEIÇÃO, G. M. D. Percepção de povos tradicionais do Cerrado sobre a implantação do Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 429–435, 2019.
- SILVA, M. L. A. D.; ARAUJO, M. D. F. V.; DA CONCEIÇÃO, G. M. Síntese histórica e socioambiental do Parque Nacional da Chapada das Mesas (MA). **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, [s. l.], v. 12, n. 2, 2019. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/ecoturismo/article/view/6724>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- SILVA, I. A.; BATALHA, M. A. Woody plant species co-occurrence in Brazilian savannas under different fire frequencies. **Acta Oecologica**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 85–91, 2010.
- SIMON, M. F. *et al.* Recent Assembly of the Cerrado, a Neotropical Plant Diversity Hotspot, by in situ Evolution of Adaptations to Fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 106, n. 48, p. 20359–20364, 2009.
- SIMPSON, K. J. *et al.* Determinants of flammability in savanna grass species. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 104, n. 1, p. 138–148, 2016.

- SOARES-FILHO, B. *et al.* Forest fragmentation, climate change and understory fire regimes on the Amazonian landscapes of the Xingu headwaters. **Landscape Ecology**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 585–598, 2012.
- SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; PAOLINI, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 4, p. 434–440, abr. 2004.
- SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.
- STEELE, M. R.; GITELSON, A. A.; RUNDQUIST, D. C. A Comparison of Two Techniques for Nondestructive Measurement of Chlorophyll Content in Grapevine Leaves. **Agronomy Journal**, [s. l.], v. 100, n. 3, p. 779–782, 2008.
- STEVENS, N. *et al.* Savanna woody encroachment is widespread across three continents. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 235–244, 2017.
- STOREY, E. A.; STOW, D. A.; O’LEARY, J. F. Assessing postfire recovery of chamise chaparral using multi-temporal spectral vegetation index trajectories derived from Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 183, p. 53–64, 2016.
- SUDRÉ, S. *et al.* Percepção da comunidade local sobre o turismo no Parque Nacional da Chapada das Mesas, Carolina (MA). **Revista Brasileira de Ecoturismo (RBEcotur)**, [s.l.], v. 13, n. 2, 2020.
- SUDRÉ, S. G. S.; PÃOZINHO, F. C.; LEITE, A. F. R. Análise crítica do plano de manejo do PARNA Chapada Das Mesas, Maranhão, Brasil. **Revista Multidisciplinar do Amapá**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 17–28, 2022.
- TADONO, T. *et al.* Initial Validation of the 30 m-mesh Global Digital Surface Model Generated by ALOS PRISM. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p.157-162, 2016.
- TATTERSALL, G. J. **Thermimage: Thermal Image Analysis**. R package. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1069704>, 2021.
- TATTERSALL, G. J. **ThermImageJ: Thermal Image Functions and Macros for ImageJ**. doi:10.5281/zenodo.2652896, 2019.
- TRANCOSO, R.; SANO, E. E.; MENESES, P. R. The spectral changes of deforestation in the Brazilian tropical savanna. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 187, n. 1, p. 4145, 2015.
- VAN DER WERF, G. R. *et al.* Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. **Global Biogeochemical Cycles**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 2007GB003122, 2008.

VAN WILGEN, B. W. *et al.* Response of Savanna Fire Regimes to Changing Fire-Management Policies in a Large African National Park. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 1533–1540, 2004.

VERMOTE, E. *et al.* Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46–56, nov. 2016.

VESCOVO, L.; GIANELLE, D. Using the MIR bands in vegetation indices for the estimation of grassland biophysical parameters from satellite remote sensing in the Alps region of Trentino (Italy). **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 41, n. 11, p. 1764–1772, 2008.

VLASSOVA, L.; PÉREZ-CABELLO, F. Effects of post-fire wood management strategies on vegetation recovery and land surface temperature (LST) estimated from Landsat images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [s. l.], v. 44, p. 171–183, 2016.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 20 jul. 2006.

WALLIS, C. I. B. *et al.* Biodiversity and ecosystem functions depend on environmental conditions and resources rather than the geodiversity of a tropical biodiversity hotspot. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 24530, 2021.

WANG, R. *et al.* Seasonal Variation in the NDVI–Species Richness Relationship in a Prairie Grassland Experiment (Cedar Creek). **Remote Sensing**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 128, 2016.

WASSERMAN, T. N.; MUELLER, S. E. Climate influences on future fire severity: a synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States. **Fire Ecology**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 43, 2023.

WELCH, B. L. ON THE COMPARISON OF SEVERAL MEAN VALUES: AN ALTERNATIVE APPROACH. **Biometrika**, v. 38, n. 3–4, p. 330–336, 1951.

WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>>. 2023.

WICKHAM, H. stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. R package version 1.5.1, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=stringr>>. 2023.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag, New York, 2016.

WU, X. *et al.* Advances in quantitative remote sensing product validation: Overview and current status. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 196, p. 102875, 2019.

YANG, L. *et al.* A new generation of the United States National Land Cover Database: Requirements, research priorities, design, and implementation strategies. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 146, p. 108–123, 2018.

YANG, G.; RHODES, D.; JOLY, R. Effects of High Temperature on Membrane Stability and Chlorophyll Fluorescence in Glycinebetaine-Deficient and Glycinebetaine-Containing Maize Lines. **Functional Plant Biology**, v. 23, n. 4, p. 437, 1996.

ZHANG, X. *et al.* GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 2753–2776, 2021.

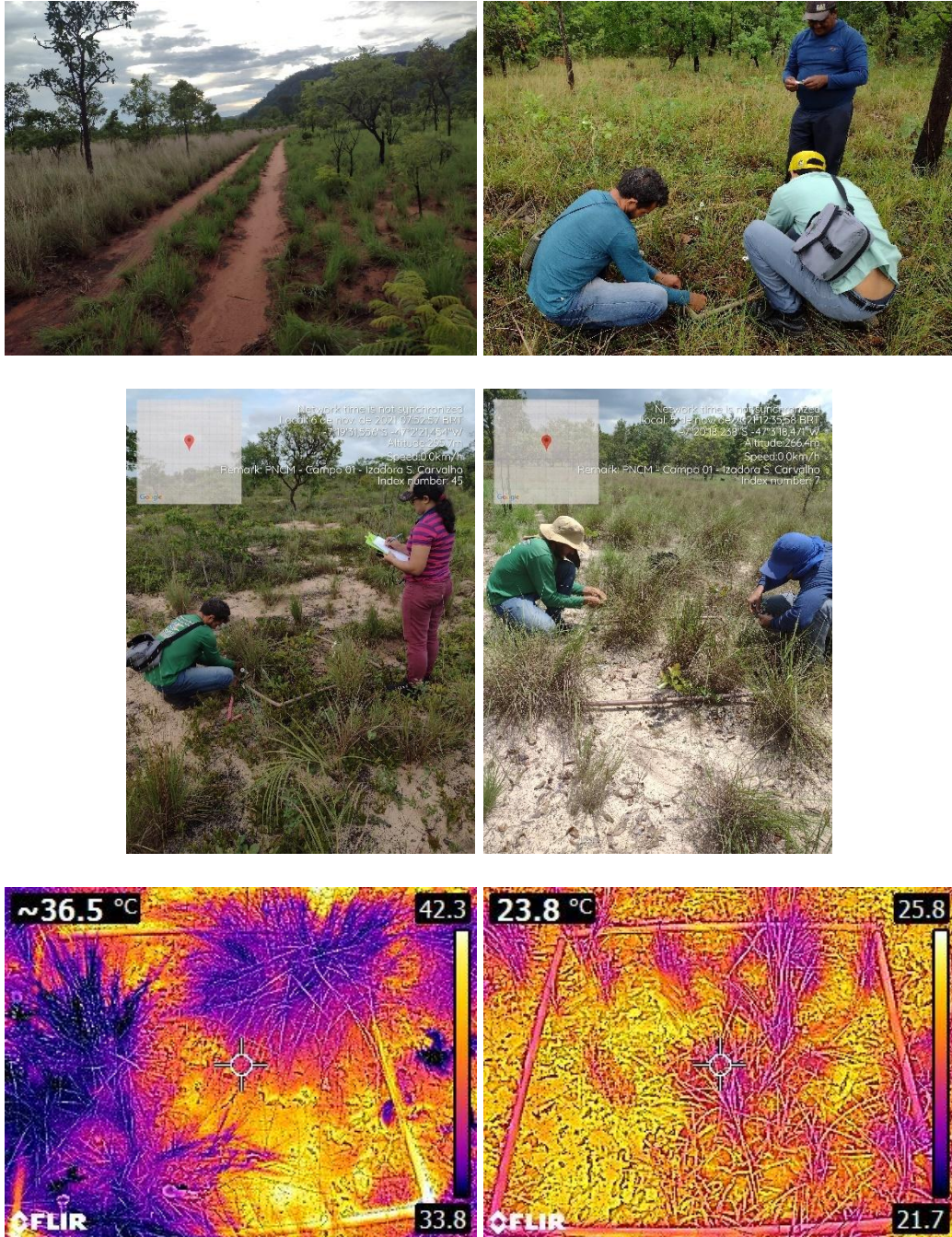
ZHANG, Y. *et al.* Revealing the dominant factors of vegetation change in global ecosystems. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 10, p. 1000602, 2022.

ZHOU, L. *et al.* Land surface phenology detections from multi-source remote sensing indices capturing canopy photosynthesis phenology across major land cover types in the Northern Hemisphere. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 135, p. 108579, 2022.

APÊNDICE

Capítulo II

- Expedição de campo para reconhecimento e teste de metodologia de coleta de dados realizada em novembro de 2021:



- Expedição de campo para coleta de dados realizada em julho de 2022:

Coletas em campo:





Atividades em laboratório:





Trabalhos desenvolvidos em parceria:

Dentro das parcelas de inventário foram coletadas amostras compostas de solo de 0-20 cm de profundidade, com auxílio de um trado holandês, e cada amostra composta foi constituída a partir de 5 subamostras. As amostras de solo foram submetidas a análises químicas e físicas, e determinação de carbono do solo/matéria orgânica que será realizada no Laboratório de Solos/Nutrição Animal do Centro de Ciências Agrárias – CCA da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, projeto em parceria com a Profª Drª. Alinne da Silva.

Amostras de solos também foram coletadas considerando a associação/proximidade com indivíduos arbóreos identificados em campo com o nome popular e georreferenciados, para o estudo de fungos micorrízicos arbusculares, que será realizado na Universidade Estadual

do Maranhão – UEMA/São Luís, projeto em parceria com a Prof^a Dr^a Camila Pinheiro Nobre:



- Expedição de campo para coleta de dados realizada em outubro de 2022:





Publicações (revistas, anais):

DE CARVALHO, IZADORA S.; BARROS, K. A. L. ; ALVES, D. B. ; FERRAZ, T. S. ; ALVARADO, SWANNI T. . RELAÇÕES ENTRE INCIDÊNCIA DE QUEIMADAS E A DINÂMICA DA VEGETAÇÃO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO-BRASIL: UMA ABORDAGEM A PARTIR DE MÉTRICAS FENOLÓGICAS DERIVADAS DE SENSORIAMENTO. REVISTA GEOGRÁFICA ACADÊMICA, v. 18, p. 19-41, 2024.

doi BRANDÃO, CAYLANNA LIMA ; SILVA, ALINNE DA ; SILVA, CRISTIANE MATOS DA ; SILVA, WILSON ARAÚJO DA ; **CARVALHO, IZADORA SANTOS DE** ; SILVA, PATRICK COSTA ; LEONEL, LÉO VIEIRA ; ROMERO, SWANNI TATIANA ALVARADO ; FERRAZ, TIAGO MASSI ; SOUSA, GESLANNY OLIVEIRA . A relação entre solo e fogo nos ecossistemas do cerrado maranhense. CADERNO PEDAGÓGICO (LAJEADO. ONLINE), v. 21, p. e9406, 2024.

CARVALHO, I. S. de; BORGES, D. C. ; ALVARADO, S. T. ; SILVA, P. C. ; LEONEL, L. V. ; FERRAZ, T. S. . CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DA VEGETAÇÃO COMBUSTÍVEL EM ÁREAS COM DIFERENTES HISTÓRICOS DE FOGO NO PARQUE NACIONAL DA CHAPADA DAS MESAS, MARANHÃO - BRASIL. In: XXI Simpósio Internacional SELPER: Além do Dossel ? Tecnologias e Aplicações de Sensoriamento Remoto, 2024, Belém. Anais do Simpósio Internacional Selper: Além do dossel ? Tecnologias e Aplicações de Sensoriamento Remoto, 2024.

DE CARVALHO, IZADORA S.; ALVARADO, S. T. ; FERRAZ, T. S. ; SILVA, P. C. ; LEÃO, P. H. A. . Análise das condições da vegetação susceptível ao fogo em área protegida no Cerrado brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2023, Florianópolis. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20. (SBSR), 2023, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2023., 2023. p. 3108-3111.

Capítulo III

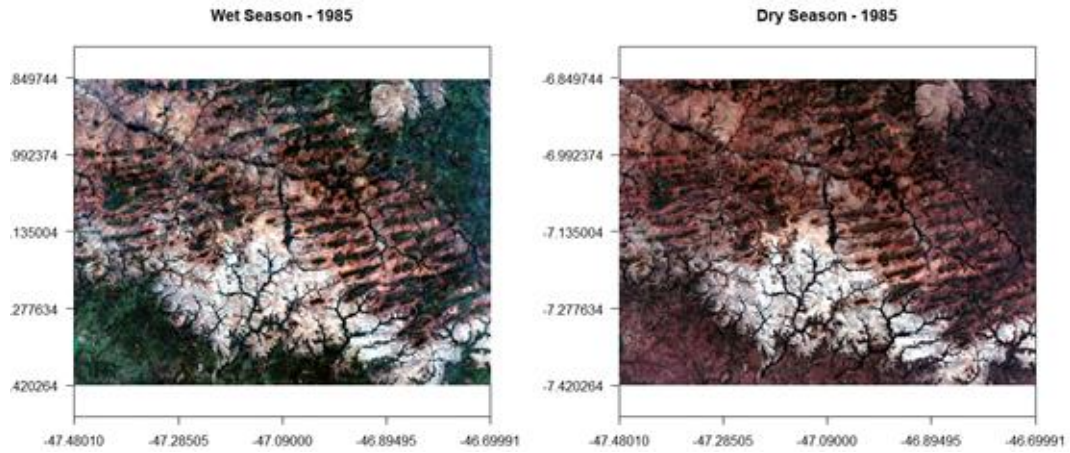


Figure 1. Landsat 5 multispectral bands used to map vegetation in 1985, showing the wet and dry seasons. The image data is collected taking into account the seasonal variation of the vegetation.

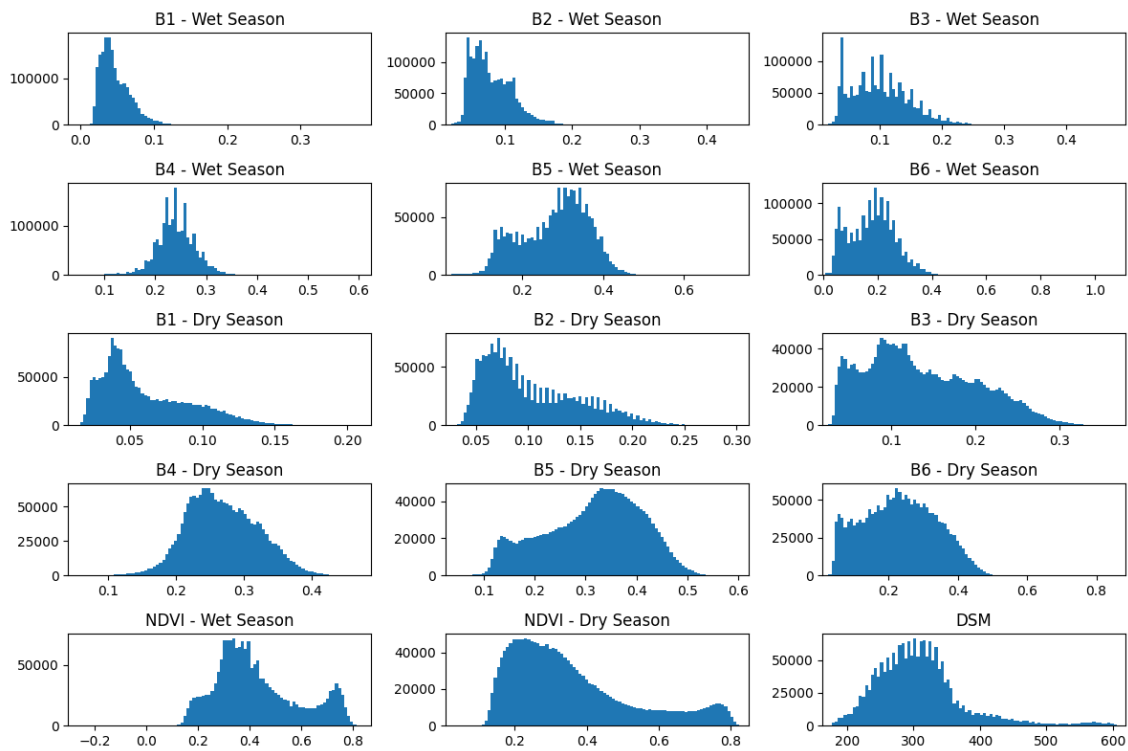


Figure 2. Histograms of the bands used in the vegetation classification based on Landsat-5 images for 1985, spectral bands, with digital reflectance values. And Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and elevation data from the Alos Palsar Digital Surface Model (DSM). For the dry and rainy seasons.

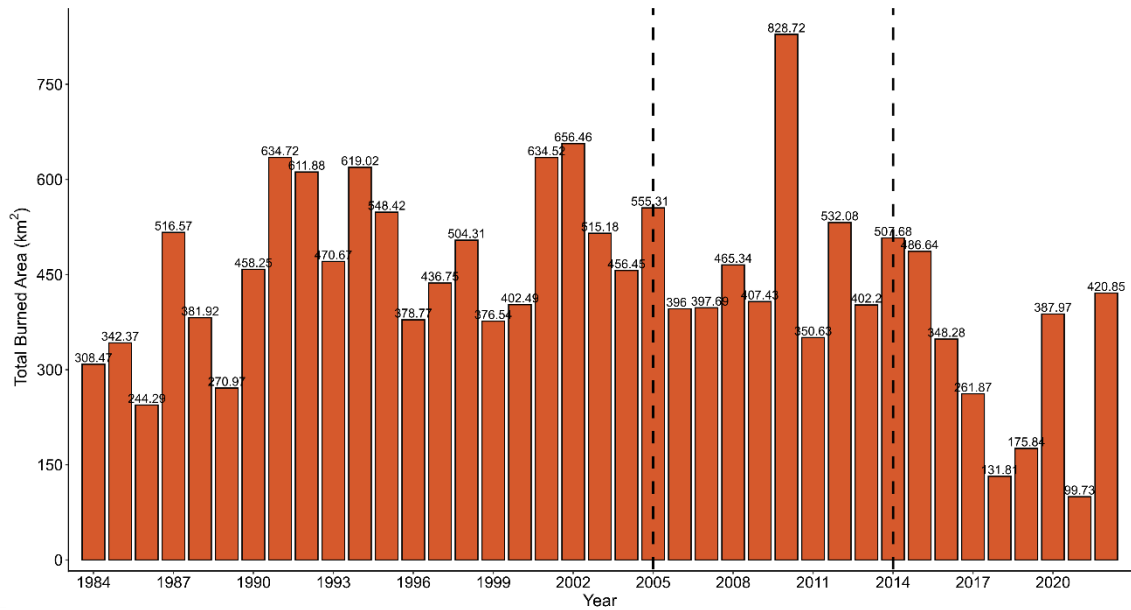


Figure 3. Total area burned in the CMNP between 1984 and 2022. With emphasis (dashed black vertical line) on the year the protected area was created (2005), and the year integrated fire management was implemented (2014).

Tabela 1. Confusion Matrix.

1985	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	13	4	0	0	0	0	0	76.5	23.5
	Woodland Savanna	3	8	2	1	2	1	1	44.4	55.6
	Rupestrian Savanna	0	3	9	1	0	0	0	69.2	30.8
	Highland Forest Formation	0	0	1	12	6	2	3	50.0	50.0
	Lowland Forest Formation	0	0	3	1	4	4	5	23.5	76.5
	Gallery Forest	0	0	0	2	3	28	1	82.4	17.6
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	0	1	0	0	4	80.0	20.0
	Producers	81.3	53.3	60.0	66.7	26.7	80.0	28.6		
	Omission Error	18.8	46.7	40.0	33.3	73.3	20.0	71.4		
1995	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	12	5	0	0	0	0	0	70.6	29.4
	Woodland Savanna	3	5	1	1	1	4	0	33.3	66.7
	Rupestrian Savanna	0	2	10	0	0	1	0	76.9	23.1
	Highland Forest Formation	0	0	0	13	3	1	5	59.1	40.9
	Lowland Forest Formation	0	3	1	3	9	3	2	42.9	57.1
	Gallery Forest	0	0	0	4	1	23	1	79.3	20.7
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	0	0	1	0	4	80.0	20.0
	Producers	80.0	33.3	83.3	61.9	60.0	71.9	33.3		
	Omission Error	20.0	66.7	16.7	38.1	40.0	28.1	66.7		

2005	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	13	1	0	0	0	0	0	92.9	7.1
	Woodland Savanna	1	12	3	0	0	1	0	70.6	29.4
	Rupestrian Savanna	1	1	8	0	0	3	1	57.1	42.9
	Highland Forest Formation	0	0	0	12	4	1	2	63.2	36.8
	Lowland Forest Formation	0	1	2	5	7	0	0	46.7	53.3
	Gallery Forest	0	0	2	1	3	28	0	82.4	17.6
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	0	3	1	0	10	71.4	28.6
	Producers	86.7	80.0	53.3	57.1	46.7	84.8	76.9		
	Omission Error	13.3	20.0	46.7	42.9	53.3	15.2	23.1		
2015	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	14	0	0	0	0	0	0	100.0	0.0
	Woodland Savanna	3	13	5	0	0	1	1	56.5	43.5
	Rupestrian Savanna	0	2	9	0	0	0	1	75.0	25.0
	Highland Forest Formation	0	0	0	11	3	0	0	78.6	21.4
	Lowland Forest Formation	0	0	1	8	12	2	0	52.2	47.8
	Gallery Forest	0	0	0	1	0	30	0	96.8	3.2
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	0	1	0	0	11	91.7	8.3
	Producers	82.4	86.7	60.0	52.4	80.0	90.9	84.6		
	Omission Error	17.6	13.3	40.0	47.6	20.0	9.1	15.4		
2020	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	18	3	0	0	0	0	0	85.7	14.3
	Woodland Savanna	2	7	2	0	1	0	0	58.3	41.7
	Rupestrian Savanna	0	2	9	0	0	0	0	81.8	18.2
	Highland Forest Formation	0	0	0	12	8	0	3	52.2	47.8
	Lowland Forest Formation	0	3	3	5	6	2	2	28.6	71.4
	Gallery Forest	0	0	0	2	0	31	0	93.9	6.1
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	1	2	1	0	10	71.4	28.6
	Producers	90.0	46.7	60.0	57.1	37.5	93.9	66.7		
	Omission Error	10.0	53.3	40.0	42.9	62.5	6.1	33.3		
2022	Confusion Matrix	OP	WS	RS	FFA	FFP	MG	MAP	Users	Commission Error
	Open Savanna	16	1	0	0	0	0	0	94.1	5.9
	Woodland Savanna	3	14	1	0	0	0	4	63.6	36.4
	Rupestrian Savanna	1	0	14	0	1	1	0	82.4	17.6
	Highland Forest Formation	0	0	0	13	6	0	1	65.0	35.0
	Lowland Forest Formation	0	0	0	6	9	3	1	47.4	52.6
	Gallery Forest	0	0	0	1	0	29	0	96.7	3.3
	Agriculture and Pasture Mosaic	0	0	0	2	1	0	9	75.0	25.0
	Producers	80.0	93.3	93.3	59.1	52.9	87.9	60.0		
	Omission Error	20.0	6.7	6.7	40.9	47.1	12.1	40.0		

Table 2. Land use and cover characterization inside Chapada das Mesas National Park - CMNP, in North of Brazilian Cerrado (CMNP = 1600.46 km²).

Vegetation classes	1985		1995		2005	
	km ²	% study area	km ²	% study area	km ²	% study area
Open Savanna	498.2	31.1	534.4	33.4	528.3	33.0
Woodland Savanna	487.6	30.5	482.5	30.1	455.6	28.5
Rupestrian Savanna	149.8	9.4	137.9	8.6	160.9	10.1
Highland Forest Formation	124.5	7.8	125.3	7.8	108.1	6.8
Lowland Forest Formation	147.3	9.2	137.2	8.6	114.3	7.1
Gallery Forest	165.1	10.3	161.5	10.1	177.7	11.1
Agriculture and Pasture Mosaic	43.1	2.7	36.7	2.3	70.6	4.4
Vegetation classes	2015		2020		2022	
	km ²	% study area	km ²	% study area	km ²	% study area
Open Savanna	516.9	32.3	536.7	33.5	543.0	33.9
Woodland Savanna	475.7	29.7	411.4	25.7	418.0	26.1
Rupestrian Savanna	181.1	11.3	143.3	9.0	210.0	13.1
Highland Forest Formation	86.3	5.4	108.4	6.8	71.0	4.4
Lowland Forest Formation	150.6	9.4	165.3	10.3	141.0	8.8
Gallery Forest	160.3	10.0	158.7	9.9	164.0	10.2
Agriculture and Pasture Mosaic	44.6	2.8	91.8	5.7	68.0	4.2

Table 3. Change in vegetation cover between 1985-2022 in the Chapada das Mesas National Park - CMNP, in North of Brazilian Cerrado (CMNP = 1600.46 km²).

Vegetation classes	1985-2022		
	km ²	% change	status
Open Savanna	44.8	9.0	increase
Woodland Savanna	-69.6	-14.3	decrease
Rupestrian Savanna	60.2	40.2	increase
Highland Forest Formation	-53.5	-43.0	decrease
Lowland Forest Formation	-6.3	-4.3	decrease
Gallery Forest	-1.1	-0.7	decrease
Agriculture and Pasture Mosaic	24.9	57.8	increase

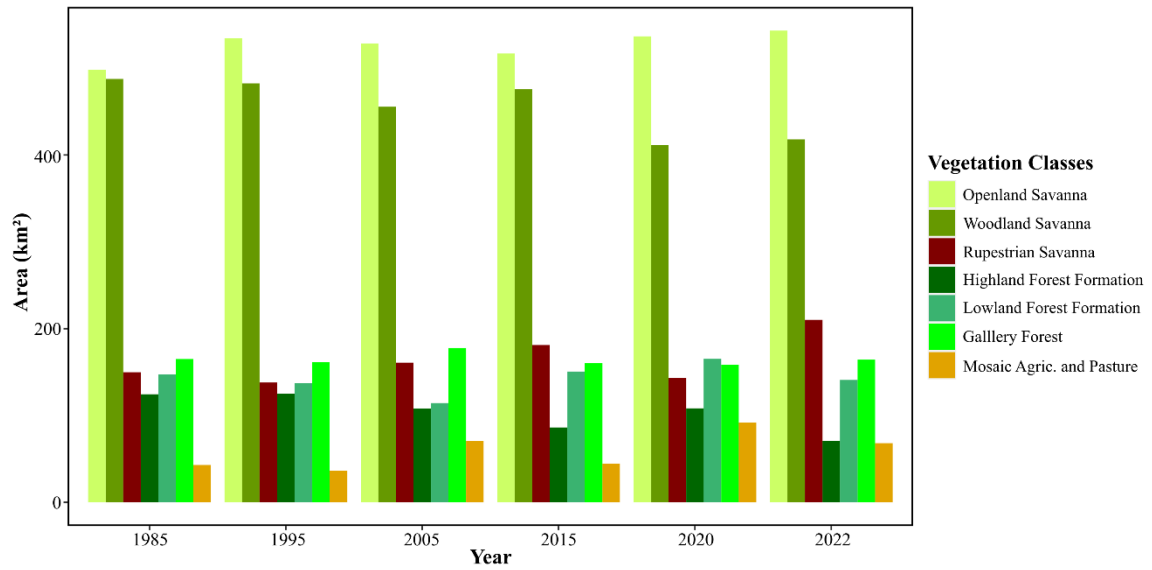


Figure 4. Total area of vegetation cover mapped over the historical series (1985-2022) for the park.

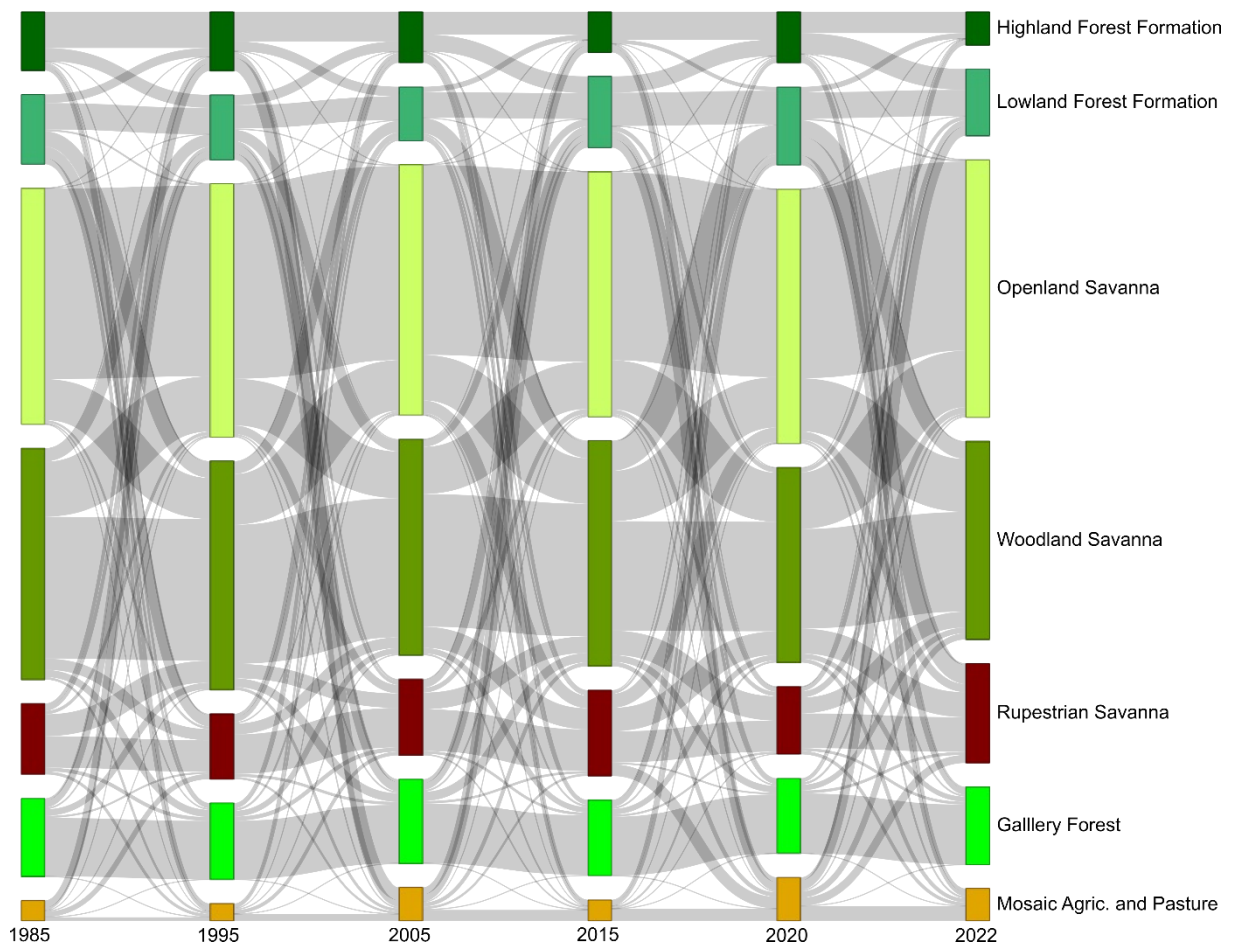


Figure 5 - Land use and land cover change trajectories for the areas of vegetation types and agriculture and pasture areas in the CMNP.

Capítulo IV

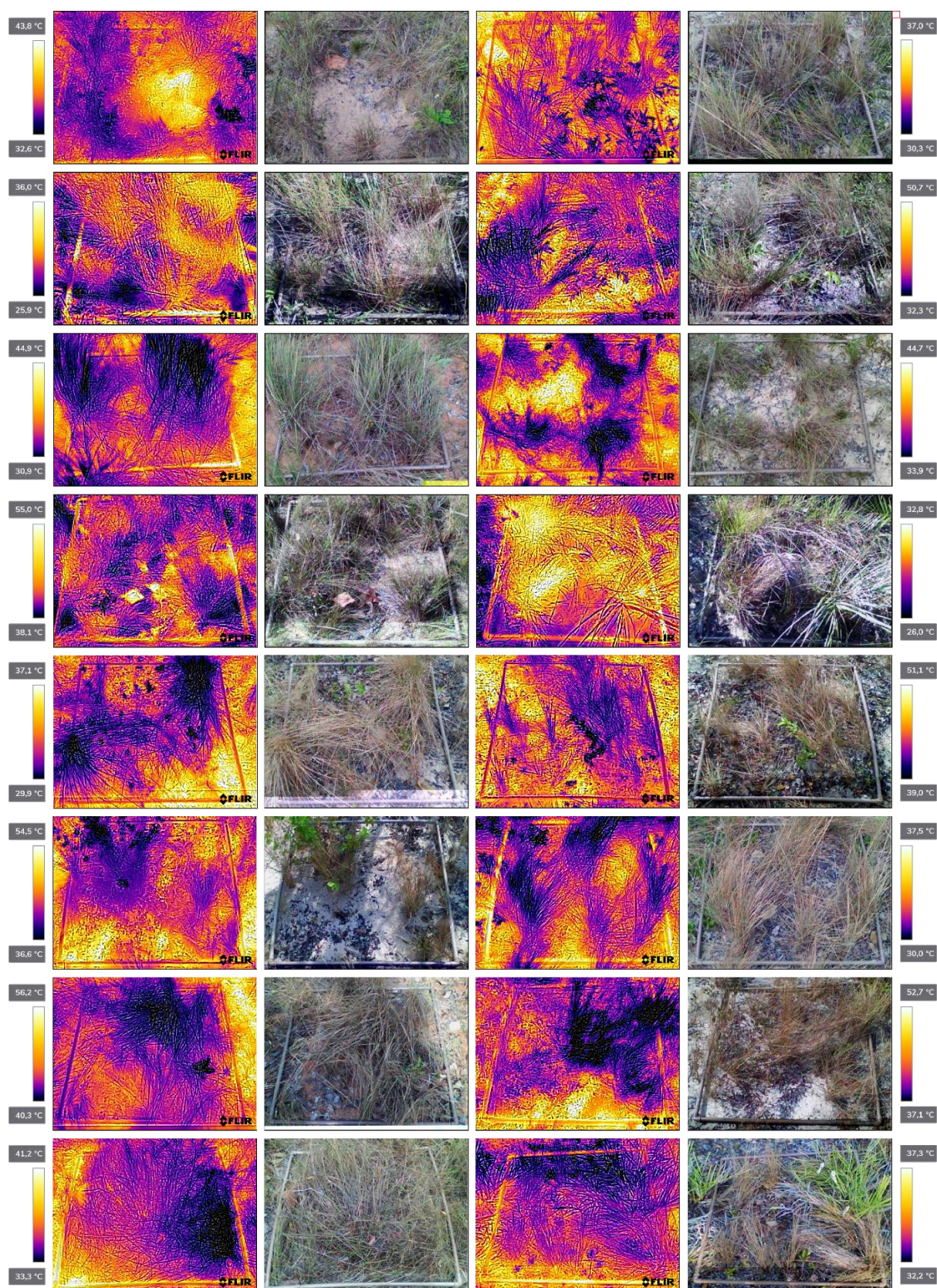


Figura 2. Ilustração das imagens das parcelas de biomassa combustível registradas com a camera FLIR.

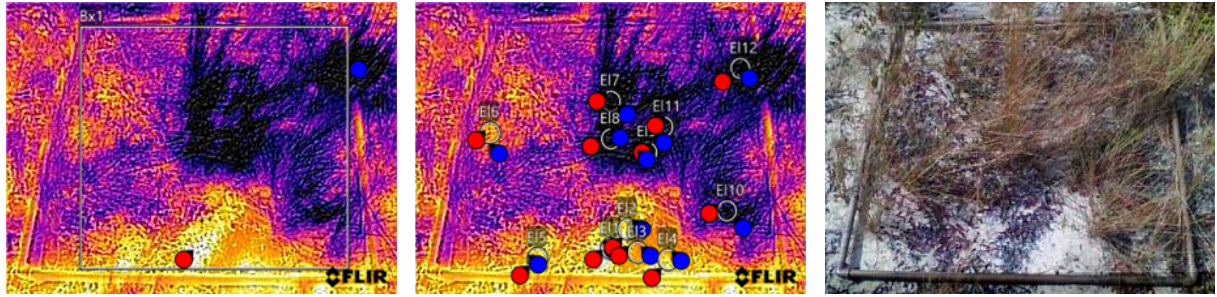


Figura 3. Análise de imagens termais realizada no programa FLIR Thermal Studio, sendo coletadas temperaturas mínima, máxima e média em amostras de solo exposto, vegetação, e parcela total.

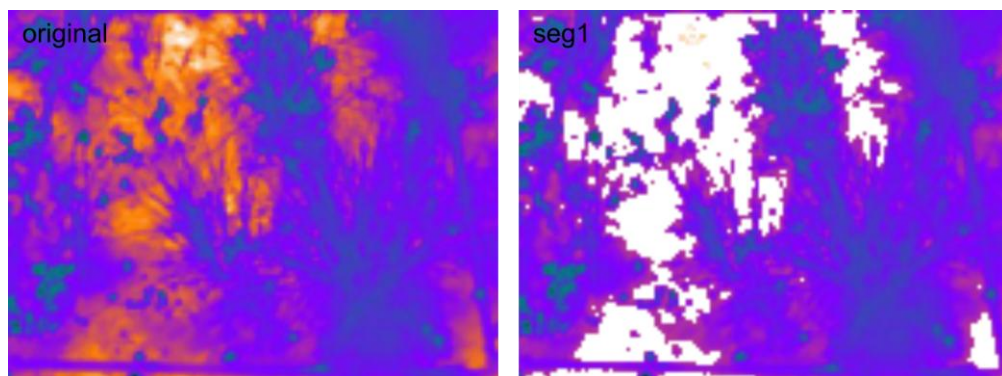


Figura 3. Segmentação de imagens da parcela para mensuração da cobertura (%).

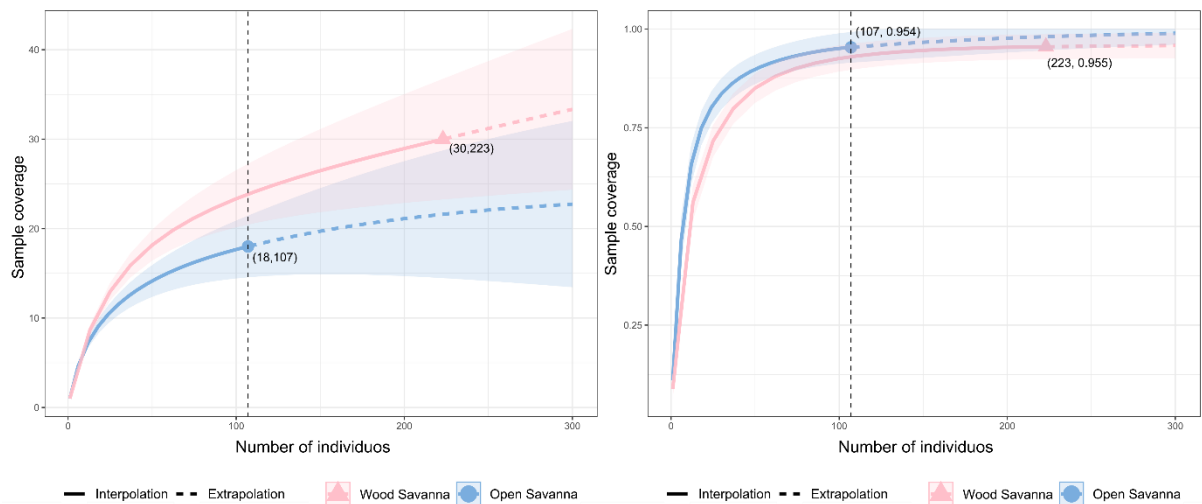


Figure 4. (A) Sample-size-based rarefaction (solid lines) and extrapolation (dashed lines) sampling curves with 95% confidence intervals (shaded areas, based on a bootstrap method with 300 replications) comparing beetle species richness between two vegetation type (Wood Savanna – WS and Open Savanna – OS). The extrapolation extends up to a maximum sample size of 300. (B) Sample completeness curve which depicts how sample completeness (measured by sample coverage) increases with sample size for arborea species data in WS and OS stratum. For each site, the plot of sample

coverage for rarefied samples (solid lines) and extrapolated samples (dashed lines) with 95% confidence intervals (shaded areas, based on a bootstrap method with 300 replications) is extrapolated up to a maximum sample size of 1200. The observed samples are denoted by the solid triangle and dot. For each reference sample point, the numbers in parentheses show the x- and y-axis coordinate.

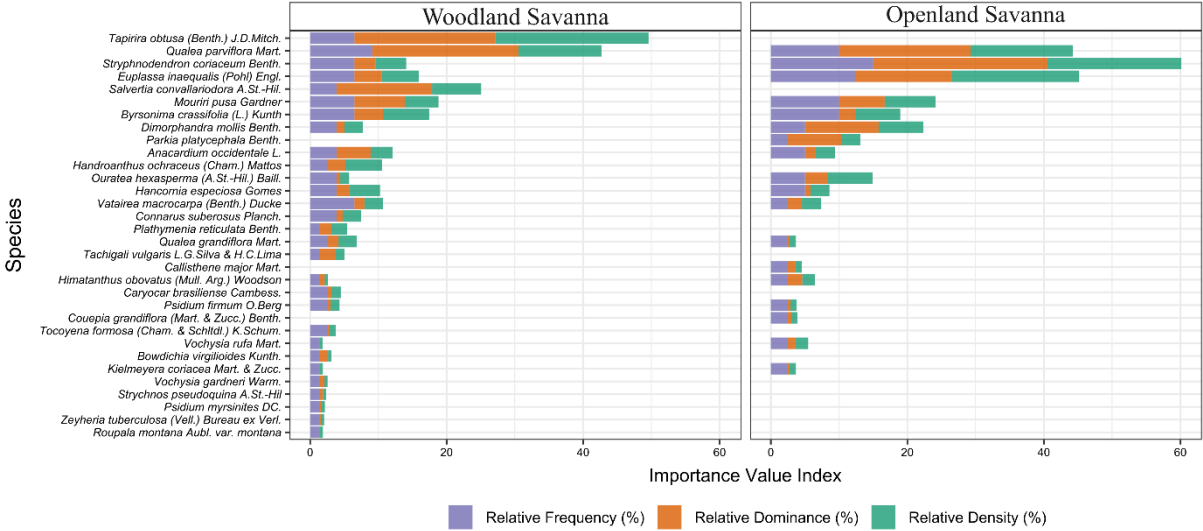


Figure 5. Importance Value Index by specie and by type vegetation (sum of relative density, relative dominance and relative frequency).

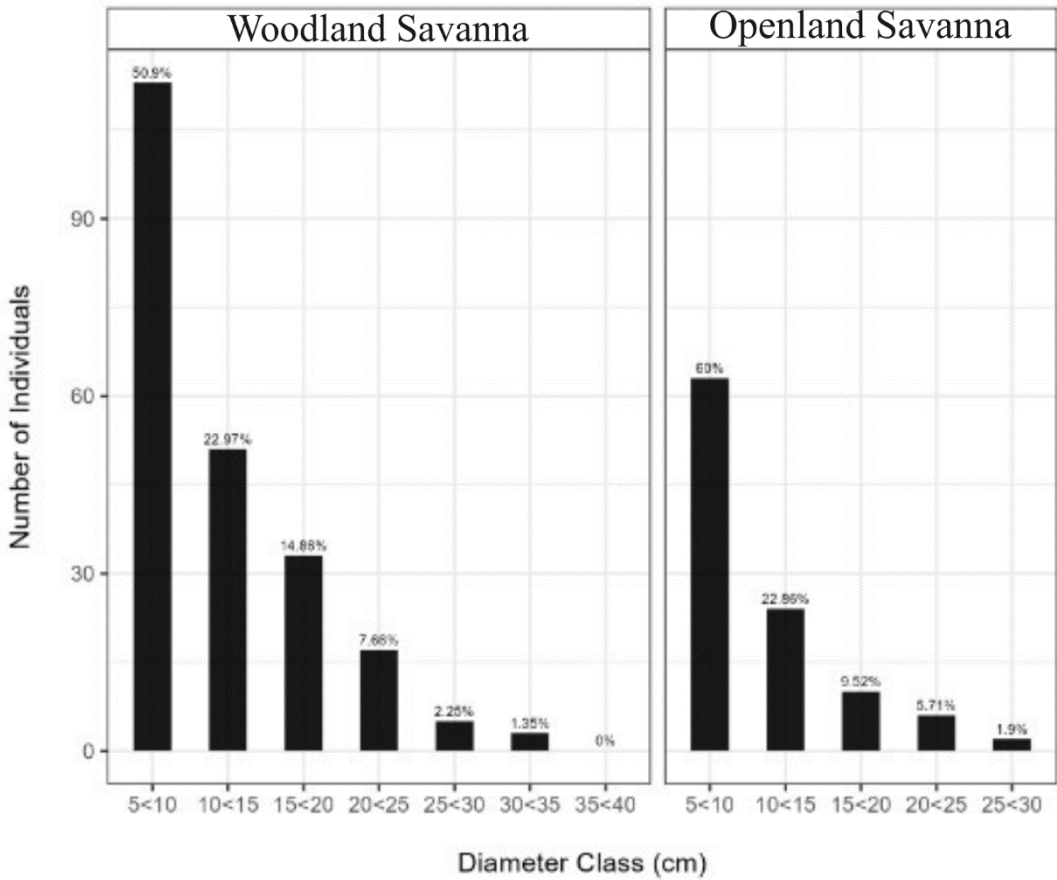


Figure 6. Diameter distribution by type vegetation.

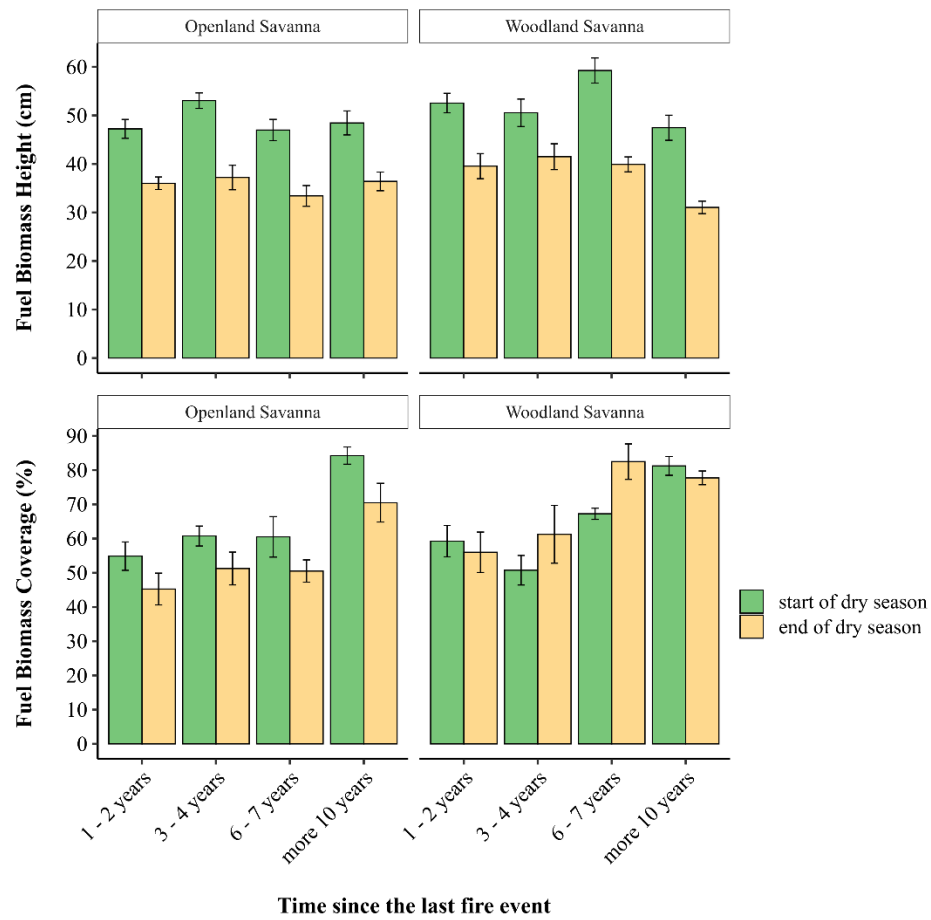


Figure 7. Fuel biomass height (cm) and coverage (%) in CMNP.

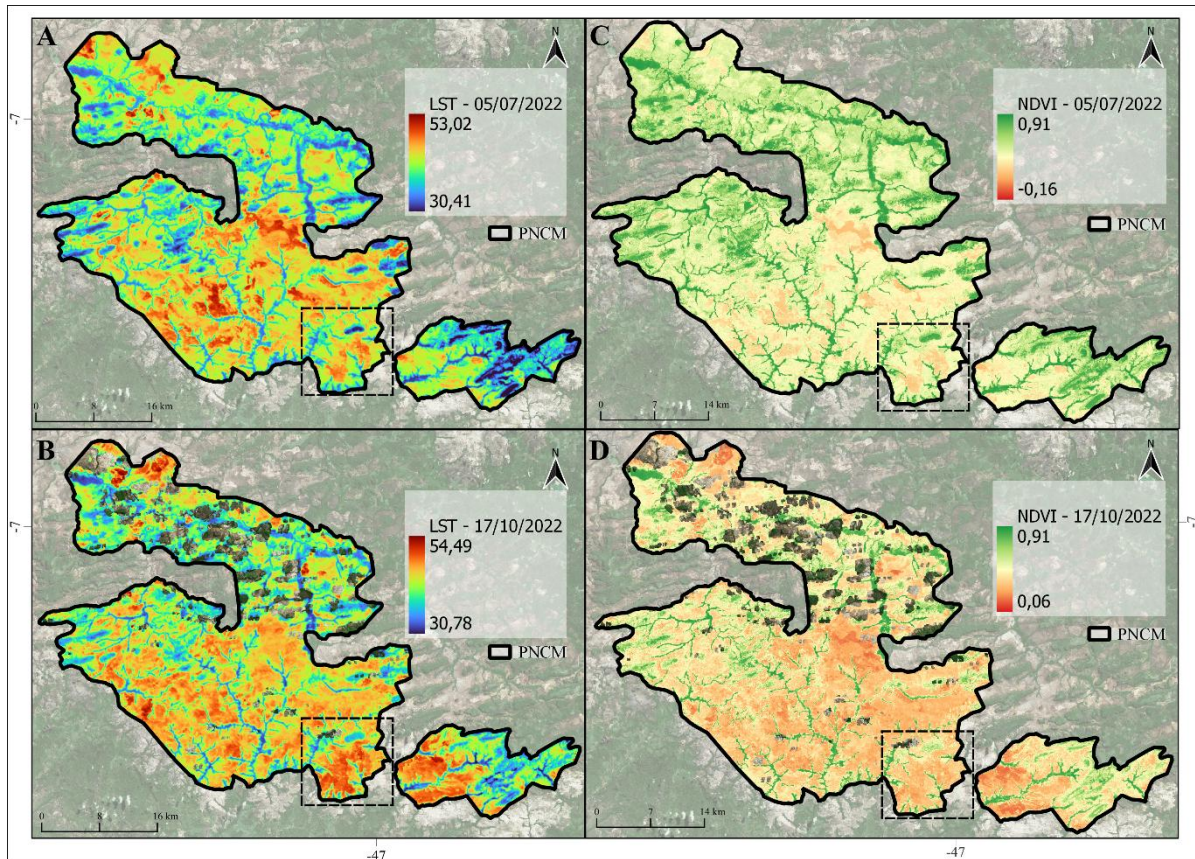
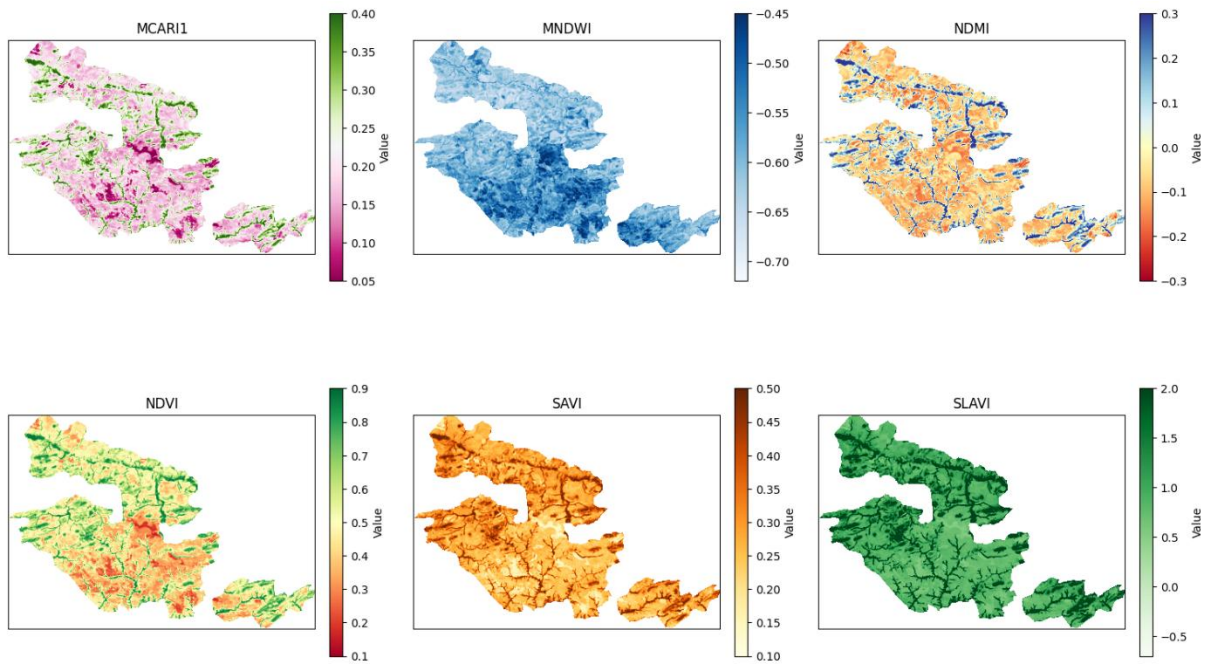


Figure 8. Map of the CMNP (A-B) Land Surface Temperature (LST) (C-D) NDVI generated from Landsat 9 satellite images (05/07/2022, scene with 0.31% cloud cover) and Landsat 8 (17/10/2022, scene with 40.15% cloud cover). Dashed black line corresponds to the region of the field plots.



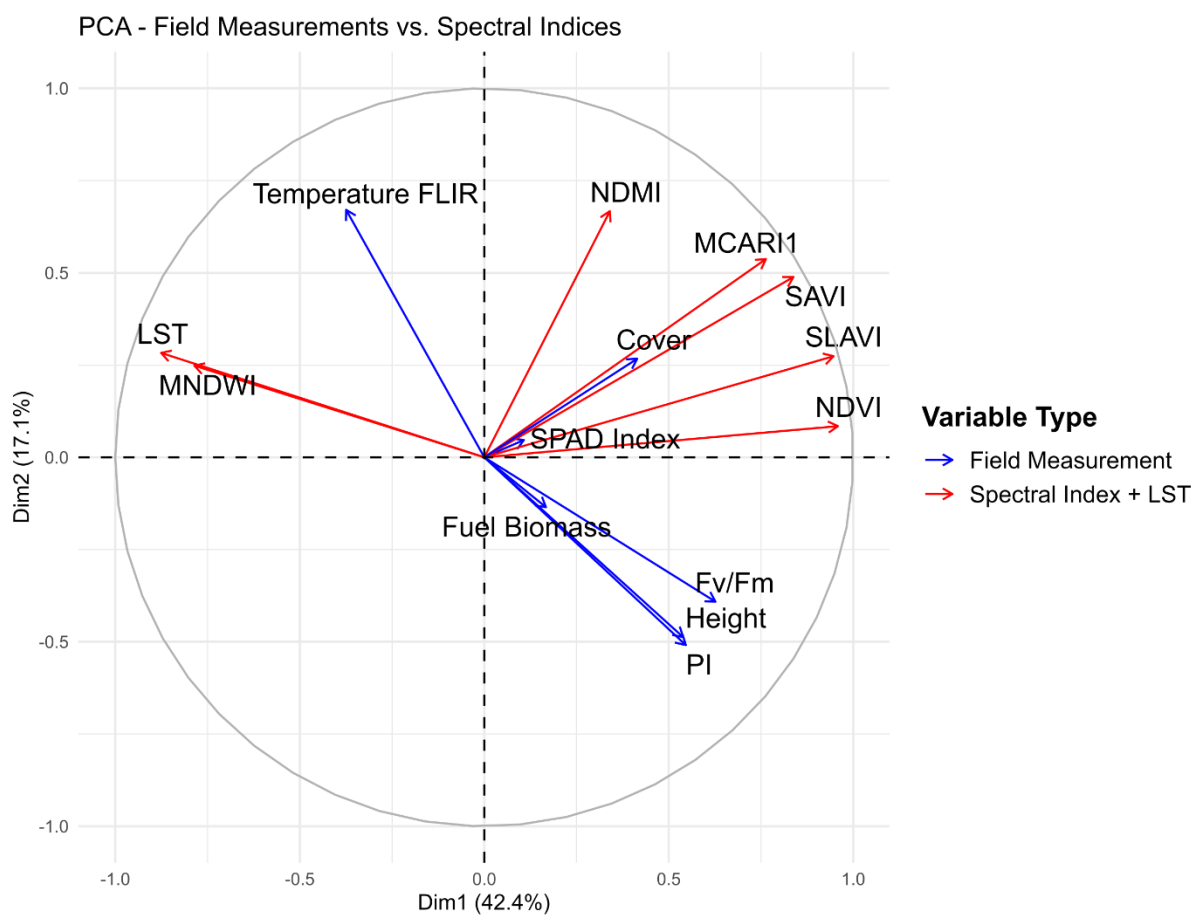
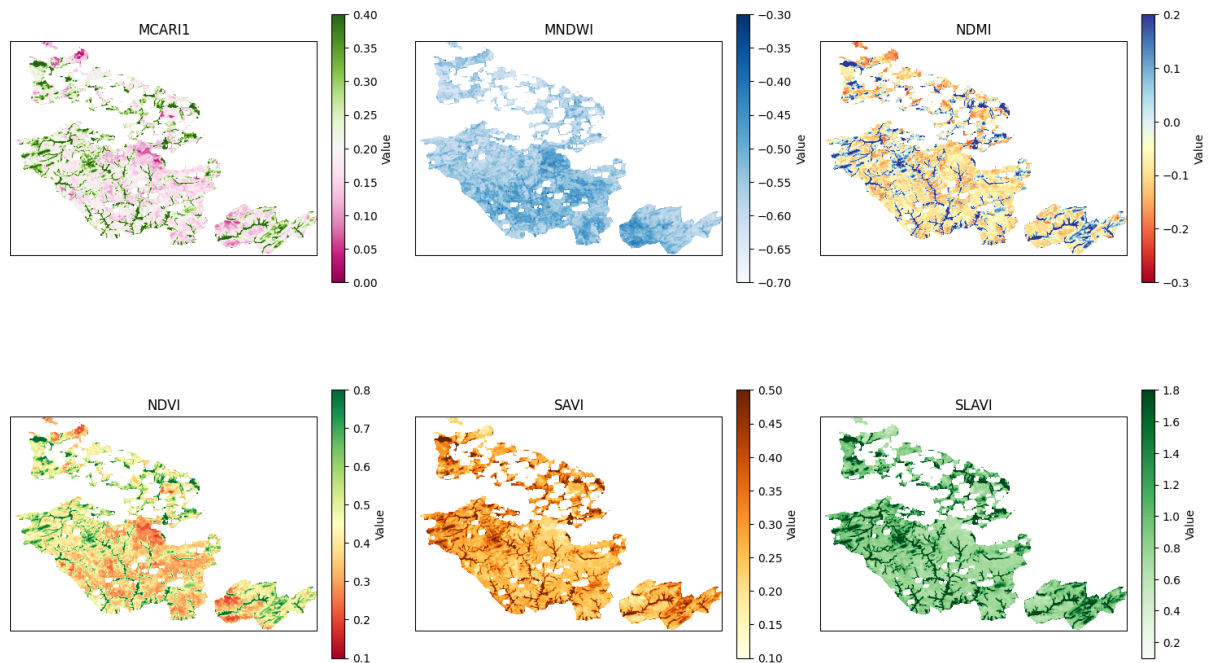


Figure 9. Principal component analysis (PCA) associating field measurement (blue), spectral index and LST - Land Surface Temperature (red).

Table. Phytosociological parameters by stratum, where: n = number of sampled individuals; G = basal area; SU = number of sample units; AD (n/ha) = absolute density; RD (%) = relative density; ADo (G/ha) = absolute dominance; RDo (%) = relative dominance; AF (%) = absolute frequency; RF (%) = relative frequency; IVI (%) = Importance Value Index.

[illegible]

Stratum	Specie	n	G (m2)	SU	AD (n/ha)	RD (%)	ADo (G/ha)	RDo (%)	AF (%)	RF (%)	IVI (%)
1	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	6	0.0068	2	9.52	2.69	0.01	1.54	28.57	2.60	2.28
1	<i>Tachigali vulgaris</i> L.G.Silva & H.C.Lima	3	0.0154	1	4.76	1.35	0.02	3.50	14.29	1.30	2.05
1	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	3	0.0018	3	4.76	1.35	0.00	0.40	42.86	3.90	1.88
1	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	5	0.0077	1	7.94	2.24	0.01	1.77	14.29	1.30	1.77
1	<i>Psidium firumum</i> O.Berg	3	0.0027	2	4.76	1.35	0.00	0.62	28.57	2.60	1.52
1	<i>Caryocar brasiliense</i> Cambess.	3	0.0020	2	4.76	1.35	0.00	0.45	28.57	2.60	1.46
1	<i>Tocoyena formosa</i> (Cham. & Schltld.) K.Schum.	2	0.0010	2	3.17	0.90	0.00	0.22	28.57	2.60	1.24
1	<i>Bowdichia virgilioides</i> Kunth.	1	0.0074	1	1.59	0.45	0.01	1.69	14.29	1.30	1.14
1	<i>Vochysia gardneri</i> Warm.	1	0.0058	1	1.59	0.45	0.01	1.32	14.29	1.30	1.02
1	<i>Himatanthus obovatus</i> (Mull. Arg.) Woodson	1	0.0025	1	1.59	0.45	0.00	0.56	14.29	1.30	0.77
1	<i>Strychnos pseudoquina</i> A.St.-Hil	1	0.0023	1	1.59	0.45	0.00	0.52	14.29	1.30	0.76
1	<i>Psidium myrsinites</i> DC.	1	0.0020	1	1.59	0.45	0.00	0.47	14.29	1.30	0.74
1	<i>Vochysia rufa</i> Mart.	1	0.0011	1	1.59	0.45	0.00	0.26	14.29	1.30	0.67
1	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	1	0.0010	1	1.59	0.45	0.00	0.23	14.29	1.30	0.66

Stratum	Specie	n	G (m2)	SU	AD (n/ha)	RD (%)	ADo (G/ha)	RDo (%)	AF (%)	RF (%)	IVI (%)
1	<i>Curatella americana</i> L	1	0.0006	1	1.59	0.45	0.00	0.13	14.29	1.30	0.63
1	<i>Roupala montana</i> Aubl. var. <i>montana</i>	1	0.0004	1	1.59	0.45	0.00	0.09	14.29	1.30	0.61
1	<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	1	0.0002	1	1.59	0.45	0.00	0.04	14.29	1.30	0.60
2	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	16	0.0562	4	29.63	14.95	0.10	28.98	66.67	10.00	17.98
2	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	21	0.0320	6	38.89	19.63	0.06	16.51	100.00	15.00	17.04
2	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	20	0.0344	5	37.04	18.69	0.06	17.74	83.33	12.50	16.31
2	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	8	0.0106	4	14.81	7.48	0.02	5.45	66.67	10.00	7.64
2	<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	7	0.0164	2	12.96	6.54	0.03	8.46	33.33	5.00	6.67
2	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	7	0.0040	4	12.96	6.54	0.01	2.08	66.67	10.00	6.21
2	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	7	0.0044	2	12.96	6.54	0.01	2.29	33.33	5.00	4.61
2	<i>Hancornia speciosa</i> Gomes	3	0.0035	2	5.56	2.80	0.01	1.79	33.33	5.00	3.20
2	<i>Anacardium occidentale</i> L.	3	0.0032	2	5.56	2.80	0.01	1.65	33.33	5.00	3.15
2	<i>Parkia platycephala</i> Benth.	3	0.0075	1	5.56	2.80	0.01	3.84	16.67	2.50	3.05
2	<i>Vochysia rufa</i> Mart.	2	0.0060	1	3.70	1.87	0.01	3.11	16.67	2.50	2.49
2	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	3	0.0038	1	5.56	2.80	0.01	1.98	16.67	2.50	2.43

Stratum	Specie	n	G (m2)	SU	AD (n/ha)	RD (%)	ADo (G/ha)	RDo (%)	AF (%)	RF (%)	IVI (%)
2	<i>Himatanthus obovatus</i> (Mull. Arg.) Woodson	2	0.0047	1	3.70	1.87	0.01	2.41	16.67	2.50	2.26
2	<i>Callisthene major</i> Mart.	1	0.0041	1	1.85	0.93	0.01	2.10	16.67	2.50	1.84
2	<i>Psidium firmum</i> O.Berg	1	0.0019	1	1.85	0.93	0.00	0.97	16.67	2.50	1.47
2	<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	1	0.0007	1	1.85	0.93	0.00	0.36	16.67	2.50	1.27
2	<i>Couepia grandiflora</i> (Mart. & Zucc.) Benth.	1	0.0003	1	1.85	0.93	0.00	0.18	16.67	2.50	1.20
2	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	1	0.0002	1	1.85	0.93	0.00	0.10	16.67	2.50	1.18

Table. Individual woody volume.

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	1	1	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	9.50	18.50	0.1839
1	1	2	<i>Anacardium occidentale L.</i>	7.50	34.50	0.5323
1	1	3	<i>Psidium firmum O.Berg</i>	3.80	7.80	0.0171
1	1	4	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	6.90	13.50	0.0766
1	1	5	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	6.90	11.00	0.0508
1	1	6	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	3.50	10.80	0.0311
1	1	7	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	5.50	14.00	0.0700
1	1	8	<i>Vatairea macrocarpa (Benth.) Ducke</i>	3.00	7.50	0.0137
1	1	9	<i>Psidium firmum O.Berg</i>	3.70	6.50	0.0117
1	1	10	<i>Dimorphanthra mollis Benth.</i>	2.90	5.00	0.0060
1	1	11	<i>Connarus suberosus Planch.</i>	3.80	10.50	0.0309
1	1	12	<i>Connarus suberosus Planch.</i>	3.80	6.30	0.0111
1	1	13	<i>Connarus suberosus Planch.</i>	3.80	9.50	0.0253
1	1	14	<i>Connarus suberosus Planch.</i>	3.80	6.80	0.0130
1	1	15	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	4.40	9.20	0.0260

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	1	16	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	7.10	23.50	0.2370
1	1	17	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	3.00	8.40	0.0172
1	1	18	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	3.00	6.70	0.0110
1	1	19	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	5.50	15.30	0.0836
1	1	20	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	5.50	14.20	0.0720
1	1	21	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	5.00	10.50	0.0369
1	1	22	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	8.00	8.00	0.0301
1	1	23	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	2.80	9.50	0.0212
1	1	24	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	2.80	7.30	0.0125
1	1	25	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	5.50	19.80	0.1400
1	1	26	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	2.80	6.50	0.0099
1	1	27	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	1.60	5.80	0.0061
1	2	28	<i>Bowdichia virgilioides</i> Kunth.	9.70	23.30	0.2967
1	2	29	<i>Himatanthus obovatus</i> (Mull. Arg.) Woodson	5.60	18.50	0.1237
1	2	30	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	2.90	6.50	0.0101
1	2	31	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	3.80	6.30	0.0111

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	2	32	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	2.60	15.50	0.0544
1	2	33	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	5.80	16.60	0.1021
1	2	34	<i>Vatairea macrocarpa (Benth.) Ducke</i>	2.10	5.80	0.0069
1	2	35	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.30	7.30	0.0137
1	2	36	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	2.10	7.50	0.0115
1	2	37	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.50	10.50	0.0344
1	2	38	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.50	14.50	0.0656
1	2	39	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	2.10	5.50	0.0062
1	2	40	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	3.40	10.00	0.0262
1	2	41	<i>Vochysia rufa Mart.</i>	3.80	6.50	0.0118
1	2	42	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.90	8.50	0.0206
1	2	43	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.00	8.50	0.0209
1	2	44	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.00	8.30	0.0199
1	2	45	<i>Hancornia espediosa Gomes</i>	5.20	12.00	0.0495
1	2	46	<i>Strychnos pseudoquina A.St.-Hil</i>	5.40	15.50	0.0847
1	2	47	<i>Hancornia espediosa Gomes</i>	3.70	7.50	0.0155

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	2	48	<i>Hancornia speciosa</i> Gomes	3.40	7.50	0.0148
1	2	49	<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	3.80	8.30	0.0193
1	2	50	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	7.20	22.30	0.2157
1	2	51	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	6.50	21.50	0.1859
1	2	52	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	6.50	14.00	0.0788
1	2	53	<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	4.10	8.50	0.0212
1	2	54	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	7.80	18.50	0.1577
1	2	55	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	7.80	12.50	0.0720
1	2	56	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	2.50	7.40	0.0121
1	2	57	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	4.00	9.50	0.0261
1	2	58	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	5.40	12.80	0.0578
1	2	59	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	3.40	7.00	0.0129
1	2	60	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	3.00	7.20	0.0127
1	2	61	<i>Hancornia speciosa</i> Gomes	3.00	5.20	0.0066
1	2	62	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	5.70	16.50	0.0997
1	2	63	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	4.80	11.00	0.0394

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	2	64	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	6.10	17.50	0.1176
1	2	65	<i>Psidium firmum</i> O.Berg	2.50	7.20	0.0115
1	2	66	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	5.70	10.00	0.0366
1	2	67	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	6.10	21.00	0.1694
1	2	68	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	6.10	9.50	0.0347
1	2	69	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	3.70	7.50	0.0155
1	2	70	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	5.10	8.80	0.0263
1	2	71	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	5.10	17.00	0.0980
1	2	72	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	5.10	13.00	0.0573
1	3	73	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	6.60	19.80	0.1594
1	3	74	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	5.20	9.50	0.0310
1	3	75	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	5.90	10.50	0.0414
1	3	76	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	5.90	9.20	0.0317
1	3	77	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	4.00	7.80	0.0176
1	3	78	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	2.00	9.70	0.0187
1	3	79	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	3.60	5.90	0.0094

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	3	80	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	3.60	18.50	0.0929
1	3	81	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	4.90	12.00	0.0475
1	3	82	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	4.90	15.00	0.0742
1	3	83	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	2.80	12.30	0.0356
1	3	84	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	3.50	8.50	0.0193
1	3	85	<i>Roupala montana</i> Aubl. var. <i>montana</i>	2.20	7.50	0.0117
1	3	86	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	1.60	5.50	0.0055
1	3	87	<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	1.50	7.40	0.0097
1	3	88	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	6.50	11.60	0.0541
1	4	89	<i>Tocoyena formosa</i> (Cham. & Schltdl.) K.Schum.	2.20	7.40	0.0114
1	4	90	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	5.80	13.00	0.0626
1	4	91	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	3.00	7.30	0.0130
1	4	92	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	3.60	7.30	0.0145
1	4	93	<i>Hancornia espediosa</i> Gomes	5.10	7.60	0.0196
1	4	94	<i>Hancornia espediosa</i> Gomes	5.10	6.00	0.0122
1	4	95	<i>Hancornia espediosa</i> Gomes	3.00	13.30	0.0432

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	4	96	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	3.00	7.40	0.0134
1	4	97	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	3.50	6.50	0.0113
1	4	98	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	3.00	6.80	0.0113
1	4	99	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	3.70	10.20	0.0287
1	4	100	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	6.00	12.50	0.0593
1	4	101	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	6.70	7.50	0.0231
1	4	102	<i>Hancornia speciosa Gomes</i>	1.30	5.20	0.0045
1	4	103	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	6.90	17.50	0.1287
1	4	104	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	7.00	15.50	0.1020
1	4	105	<i>Vatairea macrocarpa (Benth.) Ducke</i>	3.00	8.20	0.0164
1	4	106	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	4.10	10.00	0.0294
1	4	107	<i>Handroanthus ochraceus (Cham.) Mattos</i>	6.50	14.50	0.0846
1	4	108	<i>Caryocar brasiliense Cambess.</i>	2.40	5.50	0.0066
1	4	109	<i>Caryocar brasiliense Cambess.</i>	2.40	5.00	0.0054
1	4	110	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	9.10	40.50	0.8520
1	4	111	<i>Hancornia speciosa Gomes</i>	5.70	11.80	0.0510

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	4	112	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	3.30	6.50	0.0109
1	4	113	<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	4.30	10.50	0.0334
1	4	114	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	5.60	14.30	0.0739
1	4	115	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	2.50	5.20	0.0060
1	4	116	<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	1.90	5.30	0.0055
1	5	117	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	7.30	21.00	0.1933
1	5	118	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	2.70	7.00	0.0113
1	5	119	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	2.90	5.20	0.0065
1	5	120	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	6.60	17.20	0.1203
1	5	121	<i>Caryocar brasiliense</i> Cambess.	3.70	12.80	0.0452
1	5	122	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	8.10	27.00	0.3458
1	5	123	<i>Anacardium occidentale</i> L.	2.90	11.30	0.0306
1	5	124	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	4.00	15.00	0.0651
1	5	125	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	3.80	8.00	0.0179
1	5	126	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	4.20	9.00	0.0242
1	5	127	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch	4.20	6.00	0.0107

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	5	128	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.20	7.00	0.0146
1	5	129	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.30	8.30	0.0178
1	5	130	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.70	9.00	0.0223
1	5	131	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.10	9.00	0.0238
1	5	132	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.10	7.00	0.0144
1	5	133	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.00	6.50	0.0084
1	5	134	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.40	8.50	0.0222
1	5	135	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.80	5.30	0.0066
1	5	136	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.50	6.00	0.0080
1	5	137	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.00	6.50	0.0103
1	5	138	<i>Ouratea hexasperma (A.St.-Hil.) Baill.</i>	3.10	5.50	0.0075
1	5	139	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.70	5.30	0.0077
1	5	140	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.80	5.70	0.0091
1	5	141	<i>Curatella americana L</i>	2.70	5.30	0.0065
1	5	142	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	2.60	6.50	0.0096
1	5	143	<i>Anacardium occidentale L.</i>	3.40	16.70	0.0732

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	5	144	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.90	5.20	0.0065
1	5	145	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	3.50	8.30	0.0184
1	5	146	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	4.10	9.50	0.0265
1	5	147	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	2.80	6.50	0.0099
1	5	148	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	3.50	8.30	0.0184
1	5	149	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	7.70	23.00	0.2414
1	5	150	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	7.60	25.00	0.2824
1	5	151	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	3.10	8.00	0.0159
1	5	152	<i>Anacardium occidentale L.</i>	3.20	10.50	0.0279
1	5	153	<i>Anacardium occidentale L.</i>	3.20	7.00	0.0124
1	5	154	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	4.50	9.00	0.0253
1	5	155	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.00	8.50	0.0177
1	5	156	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	9.20	24.50	0.3145
1	5	157	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	6.70	17.50	0.1259
1	5	158	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	7.90	24.20	0.2725
1	5	159	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	3.10	15.50	0.0598

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	5	160	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	8.20	21.50	0.2213
1	5	161	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	9.70	27.70	0.4193
1	6	162	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	5.80	17.50	0.1135
1	6	163	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	3.70	13.60	0.0510
1	6	164	<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	3.40	5.70	0.0085
1	6	165	<i>Psidium myrsinites</i> DC.	5.10	13.00	0.0573
1	6	166	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	6.80	26.50	0.2919
1	6	167	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	5.00	11.50	0.0442
1	6	168	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	7.70	30.00	0.4106
1	6	169	<i>Tachigali vulgaris</i> L.G.Silva & H.C.Lima	9.00	24.50	0.3091
1	6	170	<i>Tachigali vulgaris</i> L.G.Silva & H.C.Lima	9.00	12.00	0.0741
1	6	171	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	8.60	22.30	0.2471
1	6	172	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	7.90	17.50	0.1425
1	6	173	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	2.30	5.40	0.0062
1	6	174	<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	2.30	5.50	0.0064
1	6	175	<i>Connarus suberosus</i> Planch.	2.10	5.50	0.0062

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	6	176	<i>Anacardium occidentale L.</i>	3.10	14.00	0.0488
1	6	177	<i>Anacardium occidentale L.</i>	3.10	8.40	0.0176
1	6	178	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	6.20	22.80	0.2020
1	6	179	<i>Tachigali vulgaris L.G.Silva & H.C.Lima</i>	5.80	15.30	0.0867
1	6	180	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	4.20	19.00	0.1077
1	7	181	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	4.30	11.00	0.0367
1	7	182	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	4.30	8.50	0.0219
1	7	183	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	4.30	11.50	0.0401
1	7	184	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	5.60	24.00	0.2083
1	7	185	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	5.60	12.00	0.0521
1	7	186	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	7.60	18.00	0.1464
1	7	187	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	4.80	9.30	0.0282
1	7	188	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	7.70	16.00	0.1168
1	7	189	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	3.20	12.00	0.0365
1	7	190	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	3.20	10.50	0.0279
1	7	191	<i>Zeyheria tuberculosa (Vell.) Bureau ex Verl.</i>	3.60	11.00	0.0328

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	7	192	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.50	6.50	0.0094
1	7	193	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch</i>	2.30	6.00	0.0077
1	7	194	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	4.10	13.70	0.0552
1	7	195	<i>Ouratea hexasperma (A.St.-Hil.) Baill.</i>	3.00	8.50	0.0177
1	7	196	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	1.90	6.50	0.0082
1	7	197	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	6.20	16.00	0.0995
1	7	198	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	3.60	13.00	0.0459
1	7	199	<i>Salvertia convallariodora A.St.-Hil.</i>	6.10	24.50	0.2306
1	7	200	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.20	6.50	0.0107
1	7	201	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.20	7.00	0.0124
1	7	202	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	4.20	17.50	0.0914
1	7	203	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	9.70	29.00	0.4596
1	7	204	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	9.70	16.50	0.1488
1	7	205	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	3.90	8.50	0.0206
1	7	206	<i>Tapirira obtusa (Benth.) J.D.Mitch.</i>	6.70	19.50	0.1563
1	7	207	<i>Vochysia gardneri Warm.</i>	8.60	18.00	0.1610

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
1	7	208	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	4.30	11.00	0.0367
1	7	209	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	4.30	12.50	0.0473
1	7	210	<i>Hancornia speciosa</i> Gomes	2.60	5.40	0.0066
1	7	211	<i>Tocoyena formosa</i> (Cham. & Schltl.) K.Schum.	2.70	6.40	0.0095
1	7	212	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	5.50	20.00	0.1428
1	7	213	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	3.90	6.00	0.0103
1	7	214	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	11.30	23.40	0.3387
1	7	215	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	6.50	17.50	0.1232
1	7	216	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	8.10	30.00	0.4269
1	7	217	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	3.80	5.30	0.0079
1	7	218	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	3.90	5.50	0.0086
1	7	219	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	4.10	13.50	0.0536
1	7	220	<i>Salvertia convallariodora</i> A.St.-Hil.	3.00	8.20	0.0164
1	7	221	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	4.40	10.50	0.0339
1	7	222	<i>Plathymenia reticulata</i> Benth.	4.40	13.50	0.0560
1	7	223	<i>Tapirira obtusa</i> (Benth.) J.D.Mitch.	4.00	7.50	0.0163

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	8	224	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	2.80	5.50	0.0071
2	8	225	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	8.00	26.00	0.3176
2	8	226	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	8.00	12.00	0.0677
2	8	227	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	8.00	13.00	0.0794
2	8	228	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	1.80	7.80	0.0116
2	8	229	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	3.20	9.80	0.0243
2	8	230	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	2.10	8.40	0.0144
2	8	231	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	2.20	6.00	0.0075
2	8	232	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	3.60	7.50	0.0153
2	8	233	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	3.60	9.00	0.0220
2	9	234	<i>Anacardium occidentale</i> L.	3.50	11.80	0.0372
2	9	235	<i>Anacardium occidentale</i> L.	4.60	10.10	0.0323
2	9	236	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	2.00	14.00	0.0390
2	9	237	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	4.00	5.50	0.0088
2	9	238	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	4.50	8.40	0.0220
2	9	239	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	2.30	14.40	0.0441

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	9	240	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	5.20	9.50	0.0310
2	9	241	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	2.50	15.50	0.0533
2	9	242	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	5.20	7.80	0.0209
2	9	243	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	2.50	7.80	0.0135
2	9	244	<i>Ouratea hexasperma (A.St.-Hil.) Baill.</i>	3.20	9.30	0.0219
2	10	245	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	7.40	34.50	0.5270
2	10	246	<i>Hancornia speciosa Gomes</i>	3.90	6.30	0.0113
2	10	247	<i>Hancornia speciosa Gomes</i>	3.90	7.40	0.0156
2	10	248	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	7.30	20.40	0.1824
2	10	249	<i>Vatairea macrocarpa (Benth.) Ducke</i>	3.60	11.50	0.0359
2	10	250	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	2.90	8.30	0.0165
2	10	251	<i>Vatairea macrocarpa (Benth.) Ducke</i>	2.60	7.00	0.0111
2	10	252	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	3.20	7.90	0.0158
2	10	253	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.20	9.50	0.0229
2	10	254	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	1.50	10.50	0.0195
2	10	255	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	2.10	6.00	0.0073

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	10	256	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	2.60	5.50	0.0068
2	10	257	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	2.60	7.70	0.0134
2	10	258	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	2.60	8.80	0.0175
2	10	259	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	2.60	8.50	0.0163
2	10	260	<i>Euplassa inaequalis</i> (Pohl) Engl.	3.70	10.00	0.0276
2	10	261	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	3.10	12.00	0.0358
2	10	262	<i>Ouratea hexasperma</i> (A.St.-Hil.) Baill.	3.10	10.00	0.0249
2	10	263	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	5.40	13.10	0.0605
2	11	264	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	6.70	16.50	0.1119
2	11	265	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	6.70	8.50	0.0297
2	11	266	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	3.10	9.50	0.0225
2	11	267	<i>Psidium firmum</i> O.Berg	4.90	8.00	0.0211
2	11	268	<i>Stryphnodendron coriaceum</i> Benth.	9.00	30.40	0.4758
2	11	269	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	6.00	14.30	0.0776
2	11	270	<i>Qualea parviflora</i> Mart.	5.70	10.80	0.0427
2	11	271	<i>Mouriri pusa</i> Gardner	3.60	8.00	0.0174

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	11	272	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	5.30	9.50	0.0314
2	11	273	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	6.10	17.00	0.1110
2	11	274	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	3.20	7.00	0.0124
2	11	275	<i>Himatanthus obovatus (Mull. Arg.) Woodson</i>	5.20	13.20	0.0599
2	11	276	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.60	13.00	0.0459
2	11	277	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	7.00	23.70	0.2385
2	11	278	<i>Parkia platycephala Benth.</i>	6.70	20.40	0.1711
2	11	279	<i>Couepia grandiflora (Mart. & Zucc.) Benth.</i>	2.10	9.20	0.0172
2	11	280	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	7.60	15.60	0.1099
2	11	281	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	7.30	17.50	0.1342
2	11	282	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.60	8.20	0.0213
2	11	283	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	7.40	25.00	0.2767
2	11	284	<i>Callisthene major Mart.</i>	7.20	13.70	0.0814
2	11	285	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.80	8.50	0.0235
2	11	286	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	4.10	8.00	0.0188
2	11	287	<i>Himatanthus obovatus (Mull. Arg.) Woodson</i>	5.70	13.50	0.0667

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	11	288	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.30	9.70	0.0285
2	11	289	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.20	10.20	0.0310
2	11	290	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	5.30	8.60	0.0257
2	11	291	<i>Parkia platycephala Benth.</i>	5.00	25.20	0.2124
2	11	292	<i>Parkia platycephala Benth.</i>	5.00	16.50	0.0911
2	11	293	<i>Anacardium occidentale L.</i>	2.70	5.20	0.0062
2	11	294	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	6.70	19.50	0.1563
2	11	295	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	6.70	9.40	0.0363
2	11	296	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	4.20	7.20	0.0155
2	11	297	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	3.50	5.80	0.0090
2	12	298	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	6.00	15.80	0.0948
2	12	299	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	3.50	9.00	0.0216
2	12	300	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	2.40	5.10	0.0057
2	12	301	<i>Qualea parviflora Mart.</i>	8.60	8.50	0.0359
2	12	302	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	6.00	8.00	0.0243
2	12	303	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	7.70	8.40	0.0322

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	12	304	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	6.50	10.50	0.0443
2	12	305	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	6.00	20.20	0.1549
2	12	306	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.50	8.40	0.0188
2	12	307	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	3.80	6.00	0.0101
2	12	308	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.00	9.00	0.0234
2	12	309	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	5.60	21.80	0.1718
2	12	310	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	2.40	6.50	0.0092
2	12	311	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	2.10	5.20	0.0055
2	12	312	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	2.30	6.00	0.0077
2	12	313	<i>Vochysia rufa Mart.</i>	6.20	11.50	0.0514
2	12	314	<i>Vochysia rufa Mart.</i>	6.20	7.50	0.0219
2	12	315	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	2.40	5.80	0.0073
2	12	316	<i>Dimorphandra mollis Benth.</i>	4.70	11.50	0.0424
2	13	317	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	5.50	15.00	0.0803
2	13	318	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	5.50	9.50	0.0322
2	13	319	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	5.80	18.00	0.1201

Stratum	Plot	Individual	Specie	Height (m)	Diameter (cm)	Volume (m3)
2	13	320	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	3.30	7.80	0.0157
2	13	321	<i>Qualea grandiflora Mart.</i>	1.60	6.50	0.0077
2	13	322	<i>Byrsonima crassifolia (L.) Kunth</i>	2.40	6.00	0.0078
2	13	323	<i>Hancornia speciosa Gomes</i>	3.70	6.20	0.0106
2	13	324	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	4.90	13.00	0.0558
2	13	325	<i>Kielmeyera coriacea Mart. & Zucc.</i>	3.00	6.50	0.0103
2	13	326	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	3.70	10.50	0.0304
2	13	327	<i>Mouriri pusa Gardner</i>	3.70	9.50	0.0249
2	13	328	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.80	19.30	0.1212
2	13	329	<i>Stryphnodendron coriaceum Benth.</i>	1.50	9.50	0.0159
2	13	330	<i>Euplassa inaequalis (Pohl) Engl.</i>	4.80	14.80	0.0713