



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



REGIME DO FOGO SOB A CONDIÇÃO DA ESTRUTURA FUNDIÁRIA E ECOLÓGICA NA SUB-REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES-MT

DAIANA FERREIRA DIAS

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de mestre.

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2026



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



DAIANA FERREIRA DIAS

**REGIME DO FOGO SOB A CONDIÇÃO DA ESTRUTURA FUNDIÁRIA E
ECOLÓGICA NA SUB-REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES-MT**

Dissertação apresentada à Universidade do Estado de Mato Grosso, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais para obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior

Cáceres,
Mato Grosso, Brasil
2026



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



DAIANA FERREIRA DIAS

**REGIME DO FOGO SOB A CONDIÇÃO DA ESTRUTURA FUNDIÁRIA E
ECOLÓGICA NA SUB-REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES-MT**

Essa dissertação foi julgada e aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais.

Cáceres, março de 2026

Banca examinadora

Prof. Dr. Ernandes Sobreira Oliveira Junior

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT (Orientador)
Presidente da Banca

Prof. Dr. Wilkinson Lopes Lázaro

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Examinador Interno

Dr. Daniel Luis Zanella Kantek

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio
Examinador Externo

Prof. Dra. Solange Kimie Ikeda Castrillon

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT
Suplente



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



FICHA CATALOGRÁFICA



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



Dedico este estudo aos que sempre
acreditaram em mim, minha família.



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



AGRADECIMENTOS

Ao longo desta trajetória, em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Dona Creuza Ferreira Teixeira Dias e Sr. Hélio Salvador Matos Dias, e à minha irmã, Danielle Ferreira Dias, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim.

Igualmente, rendo meus agradecimentos aos meus guias espirituais, em especial a pai Ogum, pela coragem, sabedoria e proteção que me concederam.

Gratidão aos colegas e amigos que ganhei durante estes dois anos no LIPAN e no LEFA. Com eles, compartilhei momentos de alegria e dedicação à pesquisa, de modo que cada dia representou um novo aprendizado.

Ademais, agradeço ao Laboratório de Química Atmosférica da PUC, liderado pela Professora Adriana Gioda, onde pude realizar um estágio extremamente proveitoso, o que me proporcionou, além do conhecimento técnico, uma inesquecível experiência cultural no Rio de Janeiro.

É importante reconhecer o papel fundamental da Universidade Estadual de Mato Grosso (UNEMAT) e junto ao LIPAN, que não apenas disponibilizaram o espaço e equipamentos, mas também ofereceram subsídios financeiros para a apresentação de trabalhos em congressos. Da mesma forma, registro meu agradecimento à FAPEMAT e à SECITECI pelo financiamento do prêmio que conquistei na 22ª SNCT, cujo resultado melhorou significativamente minha mobilidade urbana.

Por fim, e não menos importante, manifesto minha profunda gratidão ao meu principal mentor e amigo, Professor Ernandes Sobreira Oliveira Júnior. Com a humildade e a sabedoria de um verdadeiro mestre, ele depositou sua confiança em mim, sendo, portanto, uma peça central nesta jornada.



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



Sumário

RESUMO	10
ABSTRACT	12
INTRODUÇÃO GERAL.....	14
REFERÊNCIAS.....	18
Artigo 01: FOGO E FRONTEIRAS: UMA INVERSÃO DAS CHAMAS NA SUB- REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES	22
1. INTRODUÇÃO	23
2. MATERIAL E MÉTODOS	28
2.1 Área de estudo.....	28
2.2 Fontes dos dados	29
2.3 Processamento e análise	30
2.4 Média de área queimada por módulo e ano.....	31
2.5 Frequência relativas de imóveis afetados por incêndios em relação a recorrência	31
2.6 Limitações e justificativas.....	32
3. RESULTADOS	33
3.1 Distribuição fundiária.....	33
3.2 Distribuição espacial	34
3.3 Magnitude de área queimada por módulo	37
3.4 Frequência de queimadas e incêndios por módulo fiscal.....	37
3.5 Comportamento do fogo em relação aos módulos fiscal de 1985 a 2023.....	38
4. DISCUSSÃO.....	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
6. REFERÊNCIAS	44
Artigo 02 – PAISAGENS INFLAMÁVEIS: TRANSIÇÕES ECOLÓGICAS E VULNERABILIDADE CLIMÁTICA DO PANTANAL DE CÁCERES	50
1 INTRODUÇÃO	51
2. METODOLOGIA.....	53
2.1 Área de estudo.....	53
2.2 Período de estudo e obtenção de dados.....	54
2.2.1 Dados climáticos	56
2.3 Organização e pré-processamento dos dados.....	56



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



2.4 Avaliação da distribuição dos dados	57
2.5 Influência de variáveis climáticas e fases do ENSO	57
2.6 Controles paisagísticos	58
3 RESULTADO.....	59
3.1 Caracterização da área queimada por tipo de paisagem	59
3.2 Influência das variáveis climáticas e do ENSO.....	60
3.3 Controles paisagísticos e temperatura como modulador	62
4. DISCUSSÃO.....	63
4.1. Papel da paisagem com modulador do fogo.....	63
4.2. Implicações ecológicas e para o manejo adaptativo do fogo	64
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
6. REFERENCIAS	67
Material suplementar 1 – Script das variáveis ambientais	72
Material suplementar 2 - Distribuição espacial e anual por classe de uso e cobertura na sub-região do Pantanal de Cáceres (1985-2023).....	74
CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS.....	75



RESUMO

DIAS, Ferreira Daiana. REGIME DO FOGO SOB A CONDIÇÃO DA ESTRUTURA FUNDIÁRIA E ECOLÓGICA NA SUB-REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES-MT. Cáceres: UNEMAT, 2026. 77 pp (Dissertação – Mestrado em Ciências Ambientais).

O fogo tem se consolidado como um dos principais distúrbios socioecológicos no Pantanal, especialmente nas últimas décadas, quando eventos extremos passaram a coexistir com transformações profundas na organização territorial. Na sub-região do Pantanal de Cáceres, incêndios de grande magnitude registrados entre 1985 e 2023 mostraram que o regime do fogo não pode ser explicado apenas por variáveis climáticas, sendo fortemente condicionado pela estrutura fundiária e pela configuração da paisagem. Esta dissertação analisa como a interação entre estrutura fundiária, paisagem e clima moldou o regime do fogo no Pantanal de Cáceres entre 1985 a 2023, integrando dados do MapBiomas Fogo, do Cadastro Ambiental Rural (CAR), variáveis climáticas do ERA5-Land e Fenômenos climáticos como El Niño-Oscilação do Sul (ENSO). O estudo está organizado em dois capítulos e estruturado como artigos. O primeiro artigo “Fogo e fronteiras: uma inversão das chamas na sub-região do Pantanal de Cáceres”, demonstra que a estrutura fundiária modulou a trajetória espacial e a recorrência do fogo no território. A área queimada anual apresentou média de $60.457,50 \pm 65.734,02$ ha, com elevada variabilidade interanual e concentração de 29,8% de toda a área queimada apenas nos anos de 2020 e 2021. A partir do início dos anos 2000, observou-se uma inflexão no padrão espacial das queimadas, definida como “inversão das chamas”, caracterizada pelo deslocamento progressivo do núcleo do fogo da porção norte para o centro-sul da sub-região, acompanhando a concentração de grandes propriedades rurais. A análise de recorrência revelou regimes contrastantes de 83% das pequenas propriedades (<4 módulos fiscais) queimaram até dez vezes ao longo da série, enquanto 91% das grandes propriedades (>15 módulos fiscais) queimaram 11 ou mais vezes, sendo 59% enquadradas na classe de alta recorrência (21–38 eventos), configurando áreas cronicamente expostas ao fogo. O segundo artigo “Paisagens inflamáveis: transições ecológicas e vulnerabilidade climática do Pantanal de Cáceres”, destaca que a paisagem exerce controle estrutural primário sobre a suscetibilidade ao fogo, enquanto o clima atua como modulador condicionante. As formações campestres concentraram a maior parte da área queimada, com média anual de $3.580,57 \pm 5.813,99$ ha, valor 1,72 vezes superior ao observado em campos alagáveis. Modelos exclusivamente climáticos apresentaram baixo poder explicativo ($R^2 = 0,28$), ao passo que o modelo integrando paisagem e temperatura máxima foi o mais parcimonioso ($\Delta AICc = 0,00$; peso $AICc = 0,746$). A temperatura máxima apresentou efeito positivo significativo sobre a área queimada ($\beta = 0,289 \pm 0,031$), com respostas diferenciadas entre classes de paisagem. Valores críticos de precipitação, umidade do solo e temperatura indicaram aumentos expressivos da área queimada quando combinados, especialmente em formações campestres. Os resultados dos dois artigos demonstram que o regime do fogo no Pantanal de Cáceres emerge da sobreposição entre decisões territoriais, recorrência do uso do fogo em grandes propriedades e configuração da paisagem, sob condições climáticas que atuam como gatilho, mas não como determinantes únicos. De todo modo, essa dissertação contribui



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



para uma compreensão sobre o fogo em áreas úmidas tropicais e oferece base técnica para o manejo adaptativo e preventivo do fogo e para possíveis políticas públicas sensíveis às especificidades socioecológicas do Pantanal. Ao combinar análises temporais, espaciais, o trabalho contribui para compreender a resiliência ecológica dos sistemas úmidos frente às mudanças climáticas principalmente considerando os ODS 13 suas metas 13.2 e ODS 15 e sua meta 15.3.

Palavras - chaves: Modificação da paisagem; incêndios florestais; mudanças climáticas.



ABSTRACT

DIAS, Ferreira Dias. FIRE REGIME UNDER THE INFLUENCE OF LAND TENURE AND ECOLOGICAL STRUCTURE IN THE PANTANAL DE CÁCERES SUB-REGION, MATO GROSSO, BRAZIL Cáceres: UNEMAT, 2025. 077 pp. (Dissertation – Master’s Degree in Environmental Sciences).

Fire has become one of the main socioecological disturbances in the Pantanal, particularly in recent decades, as extreme events have increasingly coexisted with profound transformations in territorial organization. In the Cáceres sub-region of the Pantanal, large-scale wildfires recorded between 1985 and 2023 demonstrate that fire regimes cannot be explained solely by climatic variables, being strongly conditioned by land-tenure structure and landscape configuration. This dissertation analyzes how the interaction between land tenure structure, landscape, and climate shaped the fire regime in the Pantanal of Cáceres between 1985 and 2023, integrating data from MapBiomas Fire, the Rural Environmental Registry CAR, climate variables from ERA5-Land, and climate phenomena such as the El Niño–Southern Oscillation ENSO. The study is organized into two article-based chapters. The first article, “Fire and frontiers: an inversion of flames in the Cáceres sub-region of the Pantanal” demonstrates that land-tenure structure modulated both the spatial trajectory and the recurrence of fire across the territory. Mean annual burned area reached $60,457.50 \pm 65,734.02$ ha, with high interannual variability, and 29.8% of the total burned area concentrated in only two years (2020 and 2021). From the early 2000s onward, a marked inflection in the spatial pattern of fires was observed, defined as an “inversion of flames,” characterized by the progressive displacement of the fire core from the northern portion toward the central-southern sector of the sub-region, coinciding with the concentration of large rural properties. Fire recurrence analysis revealed contrasting regimes: 83% of small properties (<4 fiscal modules) burned up to ten times throughout the series, whereas 91% of large properties (>15 fiscal modules) burned 11 or more times, with 59% falling into the high-recurrence class (21–38 events), thus defining areas chronically exposed to fire. The second article “flammable landscapes: ecological transitions and climate vulnerability in the Pantanal of Cáceres” highlights that landscape exerts primary structural control over fire susceptibility, while climate acts as a conditional modulator. Grassland formations concentrated the largest proportion of burned area, with a mean annual value of $3,580.57 \pm 5,813.99$ ha, 1.72 times higher than that observed in seasonally flooded grasslands. Models based exclusively on climatic variables showed low explanatory power ($R^2 = 0.28$), whereas the model integrating landscape and maximum temperature was the most parsimonious ($\Delta AICc = 0.00$; $AICc$ weight = 0.746). Maximum temperature had a significant positive effect on burned area ($\beta = 0.289 \pm 0.031$), with differentiated responses among landscape classes. Critical thresholds of precipitation, soil moisture, and temperature indicated substantial increases in burned area when combined, particularly in grassland formations. Taken together, the results of both articles demonstrate that fire regimes in the Pantanal of Cáceres emerge from the overlap between territorial decision-making, recurrent fire use in large properties, and landscape configuration, under climatic conditions that act as triggers rather than as sole determinants. Overall, this dissertation contributes to advancing the understanding of fire dynamics in tropical wetlands and provides a technical basis for adaptive and preventive fire management, as well as for



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



public policies sensitive to the socioecological specificities of the Pantanal. By integrating temporal and spatial analyses, this work also contributes to understanding the ecological resilience of wetland systems under climate change, particularly in relation to Sustainable Development Goal (SDG) 13 (target 13.2) and SDG 15 (target 15.3).

Keywords: Pantanal; wildfires; soil carbon; land use and land cover; landscape modification; forest fires; climate change.



INTRODUÇÃO GERAL

O fogo tem se consolidado como um dos principais distúrbios socioecológicos em sistemas tropicais nas últimas décadas, impulsionado pela intensificação de extremos climáticos e pela crescente transformação antrópica da paisagem (Bowman, 2009). Ondas de calor mais frequentes, secas prolongadas e alterações nos regimes hidrológicos ampliam as condições de inflamabilidade da vegetação, enquanto mudanças no uso do território redefinem a distribuição, a continuidade e a qualidade do combustível disponível (Teodoro et al., 2022; Ferreira Neto et al., 2024). Nesse contexto, o fogo deixa de ser compreendido apenas como uma resposta passiva às condições climáticas e passa a emergir como um fenômeno socioecológico, resultante da interação entre clima, paisagem e formas de ocupação do território (Jones et al., 2022; Kelly et al., 2023).

Neste trabalho, o fogo é compreendido tanto como uma ferramenta de manejo da terra quanto como um distúrbio socioecológico quando ocorre de forma não controlada (Garcia et al., 2021). Nesse contexto, torna-se importante diferenciar os conceitos associados ao uso do fogo. As queimadas referem-se à queima intencional da vegetação, realizada com finalidade de manejo, podendo ser prescritas ou controladas. Já os incêndios caracterizam-se pela propagação não controlada do fogo na paisagem, podendo resultar da intensificação da biomassa disponível, de fatores climáticos, como descargas elétricas ou da perda de controle de uma queimada previamente iniciada (Brasil, 2024).

No Brasil, essa dinâmica assume contornos particularmente dinâmicos, uma vez que o fogo desempenha papel central como ferramenta de manejo e organização de território em sistemas agropecuários. A expansão agropecuária, a fragmentação de ecossistemas naturais e o uso recorrente do fogo como ferramenta de manejo têm alterado de forma profunda os regimes históricos de queima (Aragão et al., 2018).

Em diferentes regiões do país, a relação entre seca e área queimada vem sendo progressivamente enfraquecida, à medida que fatores territoriais, como estrutura fundiária, tamanho das propriedades, abertura de áreas e práticas produtivas, passam a exercer papel central na ignição e na propagação dos incêndios (Andrade et al., 2020; Ren et al., 2024). Assim, compreender o regime do fogo no Brasil contemporâneo exige



ultrapassar explicações exclusivamente meteorológicas e incorporar a forma como o território é apropriado, organizado e manejado.

O Pantanal insere-se de maneira singular nesse debate, como a maior área úmida tropical contínua do planeta, o bioma é estruturado pelo pulso anual de inundação, que regula a produtividade primária, a conectividade entre habitats (Alho e Sabino, 2012; Ivory et al., 2019), historicamente, atuou como um importante limitante natural à propagação do fogo (Garcia et al., 2021; Martins et al., 2022). Entretanto, nas últimas décadas, o Pantanal tem registrado incêndios de magnitude sem precedentes, associados à intensificação de secas, ao aumento da temperatura e à crescente pressão antrópica sobre o sistema hidrológico (Libonati et al., 2022; Marengo et al., 2022). A recorrência desses eventos tem produzido impactos ecológicos, econômicos e sociais expressivos, colocando em risco a resiliência do bioma e os modos de vida que dele dependem (Alho, 2008; Chiaravalloti et al., 2023).

Dentro do Pantanal, composto por 11 sub-regiões (Silva & Abdon, 1989), a sub-região de Cáceres destaca-se como um território estratégico para a análise do regime de fogo por reunir condições ecológicas, hidrológicas e territoriais singulares. Situada em uma zona de transição entre os biomas Pantanal, Cerrado e Amazônia, a região combina elevada heterogeneidade paisagística com a predominância de propriedades rurais extensivas, nas quais o uso do fogo permanece amplamente empregado como prática de manejo (Araújo et al., 2018; Melo et al., 2025). Soma-se a isso a influência direta de intervenções na bacia do Alto Paraguai, como dragagens, projetos de infraestrutura e alterações no regime hidrológico, que afetam a conectividade das áreas alagáveis e ampliam a sensibilidade da região à propagação do fogo (Wantzen et al., 2024).

Além das características ambientais, o Pantanal de Cáceres diferencia-se de outras sub-regiões do Pantanal Mato-grossense, como Poconé e Barão de Melgaço, por sua dinâmica socioecológica, devido a interação entre um núcleo urbano consolidado, alta densidade populacional e a predominância de grandes propriedades (Brasil, 2026), cria uma interface urbano-rural marcada por múltiplos agentes nas decisões territoriais sobre o fogo. Esse arranjo, associado à pecuária extensiva (Braz et al., 2020; Seidl et al., 2001), influencia diretamente a configuração da paisagem e a propagação das queimadas,



tornando a região um laboratório ideal para estudar como decisões humanas e fatores ambientais moldam o regime de incêndios.

Entretanto, a paisagem pantaneira é marcada por um mosaico dinâmico de regiões campestres, campos alagados, formações savânicas, florestais e corpos d'água, cuja funcionalidade varia conforme o regime hidrológico (Neves et al., 2011; Da Cunha et al., 2023). A alternância entre fases úmidas e secas pode converter rapidamente áreas alagadas em ambientes dominados por combustível fino altamente inflamável, redefinindo a suscetibilidade ao fogo em escalas temporais curtas (Whitney et al., 2026; Kumar et al., 2022). Nesse sentido, a paisagem atua como mediadora entre clima e área queimada, modulando interações climáticas em distúrbios ecológicos efetivos (Vidal-Rivieros et al., 2024).

Diante desse cenário, esta pesquisa busca responder à seguinte pergunta: de que forma a estrutura fundiária, a configuração da paisagem e o clima influenciam a distribuição espacial e a magnitude das queimadas e incêndios na sub-região do Pantanal de Cáceres? Para responder essa questão, testam-se 3 hipóteses relacionadas: (H0) A distribuição espacial, a recorrência e a magnitude das queimadas e incêndios na sub-região do Pantanal de Cáceres não apresentam associação significativa com a estrutura fundiária, com a configuração da paisagem ou com o clima, ocorrendo de forma independente desses fatores; (H1) A distribuição espacial das áreas queimadas no Pantanal de Cáceres está associada à estrutura fundiária, de modo que grandes propriedades rurais concentram maior extensão de área queimada e maior recorrência de fogo; (H2) Incêndios de maior extensão ocorrem predominantemente em paisagens de transição ecológica, onde a interação entre mudanças na cobertura da terra, estresse climático e disponibilidade de biomassa aumenta a suscetibilidade ao fogo.

O objetivo geral do trabalho (Figura 1) é analisar como a interação entre clima, estrutura fundiária e paisagem molda o regime de queimadas na sub-região do Pantanal de Cáceres. Especificamente, busca-se: (i) avaliar a influência da organização fundiária na distribuição espacial e na recorrência temporal do fogo; e (ii) caracterizar o regime do fogo através de diferentes tipos de paisagem e identificar os principais fatores (climáticos e paisagísticos) que controlam a magnitude das queimadas.



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



Esta dissertação propõe integrar duas abordagens frequentemente tratadas de forma separada, mas diretamente conectadas, o território rural, como espaço de decisão antrópica que organiza a paisagem, e a paisagem, como substrato biofísico que controla a propagação do fogo. Metodologicamente, o estudo articula dados de sensoriamento remoto, informações fundiárias, variáveis climáticas de reanálise e modelos estatísticos comparativos, permitindo avaliar respostas não lineares do fogo em diferentes contextos socioespaciais.

A dissertação está estruturada em dois artigos científicos: 1) Fogo e fronteiras: uma inversão das chamas na sub-região do Pantanal de Cáceres; e 2) Paisagens Inflamáveis: transições ecológicas e vulnerabilidade climática no Pantanal de Cáceres.

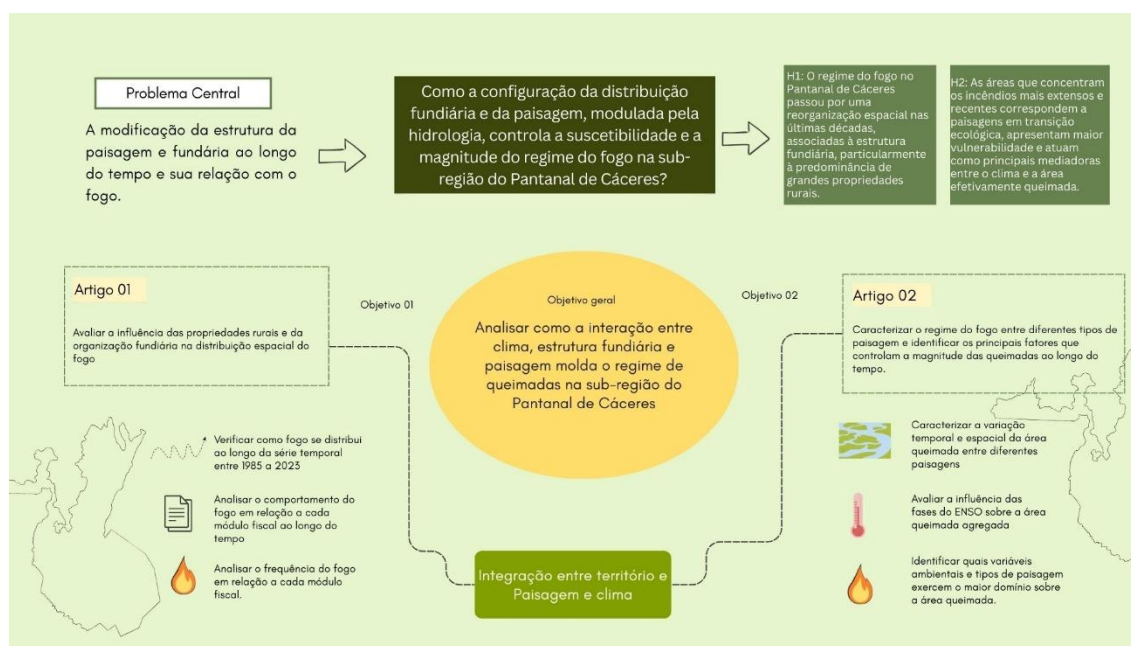


Figura 01: Arquitetura da dissertação em artigos. O fluxograma ilustra a organização da dissertação, demonstrando como a pergunta científica e as hipóteses orientam a definição dos objetivos gerais. Estes são executados por meio de dois artigos estruturados, que constituem os eixos analíticos do trabalho, garantindo foco e unidade temática à investigação.



REFERÊNCIAS

ALHO, C. J. R. Biodiversity of the Pantanal: Response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4 (Suppl.), p. 957-966, 2008. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842008000500005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/cTbDFzkGmpNjD4RKnsxfTwn/?lang=en>. Acesso em: 6 out. 2025.

ALHO, C.J.R; SABINO, J. Pulso de inundação sazonal do Pantanal: implicações para a biodiversidade. **Oecologia Australis**. v, 16(4): 958-978, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2012.1604.17> . Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/8249>. Acesso em: 10 Fev. 2026

ANDRADE, C. F. et al. Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, 108198, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108194>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192320302963?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02771-y>. Acesso em: 6 out. 2025

ARAÚJO, A, G, J. et al. Beef Cattle Production Systems in South Pantanal: Considerations on Territories and Integration Scales. **Land**. v. 7, n. 4. 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/land7040156>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-445X/7/4/156>. Acesso em: 20 out. 2025

BOWMAN, D. M. J. S. et al., Fire in the Earth System. **Science**. 324,481-484, 2009. Doi: [10.1126/science.1163886](https://doi.org/10.1126/science.1163886). Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1163886>. Acesso em: 6 Fev. 2026

BRASIL. Painel de regularização Ambiental. 2026. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrijoizmrirm2qwzdqtyjuxzi00ywi0lwfjngetztixnjg1ywfknmzliiwidci6imvimjjjmju4lwq0zwqtnzgmmmc04y2y2lti4nmq2mjc3otq5zsj9>. Acesso em: Fev. 2026

BRASIL. Lei nº 14.944, de 31 de julho de 2024. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/114944.htm. Acesso em: Fev. 2026.

BRAZ, A. M. et al. Estrutura Fundiária do Pantanal Brasileiro. **Finisterra**. V, 55(113), 157–174, 2020. Doi: <https://doi.org/10.18055/Finis18323> . Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/view/18323>. Acesso em: 31 jul. 2025.



CHIARAVALLOTI, R. M et al. Achieving conservation through cattle ranching: The case of the Brazilian Pantanal. **Conservation Science and Practice**, v. 5, n. 10, e13006, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1111/csp2.13006>. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/csp2.13006>. Acesso em: 6 out. 2025.

DA CUNHA et al. Classificação dos Macrohabitat do Pantanal Brasileiro: Atualização para Políticas Públicas e Manejo de Áreas Protegidas. **Biodiversidade Brasileira**. v13(1): 76-101. 2023. Doi: 10.37002/biobrasil.v13i1.2223. Disponível em: <https://revistaeletronica.icmbio.gov.br/index.php/BioBR/article/view/2223?articlesBySameAuthorPage=2>. Acesso em: 14 Nov. 2025

FERREIRA NETO, J. B. F. et al. Bioclimatic zoning of the Pantanal. **Ra’e Ga**, v. 61, n. 1, p. 173–191, 2024. Doi: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.97357>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/97357>. Acesso em: 6 out. 2025.

GARCIA, L. C et al. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. **Journal of Environmental Management**. v, 293, 112870. 2021. Doi <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112870>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721009324?via%3Dihub>. Acesso em: 02 Fev. 2026

JONES, M.W et al. Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. **Reviews of Geophysics**, v 60, e2020RG000726, 2022. Doi <https://doi.org/10.1029/2020RG000726> . Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020RG000726>. Acesso m:

KELLY, L. T et al. Understanding Fire Regimes for a Better Anthropocene. *Annual Review Environment and Resources*. v 48:207-235. 2023. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120220-055357>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-120220-055357>. Acesso em: 31 jul. 2025

KUMAR, S. et al. Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**. v. 12, n. 1, 5130, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05130-0> . Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-05130-0>. Acesso em: 6 out. 2025.

LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 4, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac462e>. Acesso em: 6 out. 2025.



MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**. 3:639204, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.942068>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2022.942068/full>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MARTINS, P. I. et al. Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**. v 176, 106517. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106517>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857421003724?via%3Dihub>. Acesso em: 05 Fev 2026

MELO, G. S. et al. Gado, fogo e fronteiras: dinâmicas fundiárias e ambientais no Pantanal de Cáceres. Campo-Território: **Revista de Geografia Agrária**. v. 20, n. 49, 2025. Doi: <https://doi.org/10.14393/RCT205977520>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/77520>. Acesso em: 31 jul. 2025.

NEVES, S. M. A. S. et al. Caracterização das condições climáticas de Cáceres - MT- Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 69-82, 2011. Doi: <https://doi.org/10.5216/bgg.v31i2.16845>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/index.php/bgg/article/view/16845>. Acesso em: 31 jul. 2025.

REN, S. et al. Coherence of recurring fires and land use change in South America. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**. V. 10. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1002/rse2.390>. Disponível em: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rse2.390>. Acesso em: 31 jul. 2025.

SEIDL, A. F; SILVA; SILVA, J.S.V; MORAES, A.S. Cattle ranching and deforestation in the Brazilian Pantanal. **Ecological Economics**. v. 36, p. 413-425. 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00238-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00238-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180090000238X?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025

TEODORO, P. E. et al. Wildfire Incidence throughout the Brazilian Pantanal Is Driven by Local Climate Rather Than Bovine Stocking Density. **Sustainability**, v. 14, n. 16. 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su141610187> . Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/10187> . Acesso em: 31 julho 2025.

VIDAL-RIVEROS, C. et al. Spatiotemporal analysis of wildfires and their relationship with climate and land use in the Gran Chaco and Pantanal ecoregions. **Science of the Total Environment**, v. 955, 185624, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176823> . Disponível em:



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724069808?via%3Dihub>.
Acesso em: 6 out. 2025.

WANTZEN K. M et al. The end of an entire biome? World's largest wetland, the Pantanal, is menaced by the Hidrovia project which is uncertain to sustainably support large-scale navigation. **Science of The Total Environment**. v. 908, 167751, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167751>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723063787?via%3Dihub> .
Acesso em: 20 Ago 2025.



ARTIGO A SER SUBMETIDO A REVISTA: REGIONAL ENVIRONMENTAL CHANGE

(FATOR DE IMPACTO 3.6)

Artigo 01: FOGO E FRONTEIRAS: UMA INVERSÃO DAS CHAMAS NA SUB-REGIÃO DO PANTANAL DE CÁCERES

Fire and Frontiers: an Inversion of the Flames in the Subregion of the Cáceres Pantanal

Resumo: O uso do fogo como ferramenta de manejo da terra permanece comum no Pantanal, sobretudo em sistemas de pecuária extensiva. Contudo, a estruturação fundiária redefiniu os arranjos territoriais ao longo do tempo, fazendo com que as cicatrizes do fogo revelem trajetórias históricas de propagação, intensidade e recorrência associadas à paisagem e aos diferentes tamanhos de propriedade. Neste estudo, tivemos como objetivo, analisar como a estrutura fundiária moldou o regime do fogo na sub-região do Pantanal de Cáceres (1985-2023), integrando dados do MapBiomas Fogo com o Cadastro Ambiental Rural por módulos fiscais. A análise do regime do fogo na sub-região do Pantanal de Cáceres revelou uma inflexão a partir do início dos anos 2000, caracterizada por uma inversão das chamas, onde, o núcleo das queimadas deslocou-se progressivamente da porção ao norte para o centro-sul da sub-região, acompanhando a concentração de grandes propriedades rurais. Considerando todo o período analisado (1985-2023), a área queimada anual apresentou média de $60.457,50 \pm 65.734,02$ ha, destacando elevada variabilidade interanual. Temporalmente, o período de 2020 a 2023 destacou-se como o mais crítico da série, com média anual de 150.811 ha queimados, valor 6,8 vezes superior ao observado entre 2015 e 2019 (22.173 ha/ano) e pico absoluto de 285.812 ha em 2021. Em relação a recorrência, há modulações referente ao tamanho da propriedade, pequenas propriedades (<4 MF) 83% queimaram somente 10 vezes ao longo da série, as médias propriedades (4-15 MF) faixa intermediária de 11-20 vezes, já as grandes propriedades (>15 MF) 91% imóveis queimaram 11 ou mais, e 59% da categoria máxima de 21-38 queimadas. Portanto, consideramos que a estrutura fundiária modulou o percurso do fogo no território. Ela não impõe um padrão fixo, mas condiciona fortemente onde o fogo se torna recorrente e onde ele permanece esporádico. Nas grandes propriedades, essa modulação se traduz em um regime crônico e espacialmente persistente, que define áreas prioritárias para intervenção. Portanto, a efetividade do Manejo Integrado do Fogo (MIF) depende de reconhecer essa lógica fundiária, atuando de forma diferenciada para interromper os ciclos de combustível justamente onde a paisagem está configurada para queimar repetidamente.

Palavra-chave: Propriedades rurais; Incêndios; Manejo territorial.

Abstract: The use of fire as a land management tool remains common in the Pantanal, particularly within extensive cattle ranching systems. However, land tenure structuring has progressively reshaped territorial arrangements, causing fire scars to reveal historical trajectories of fire spread, intensity, and recurrence associated with landscape



organization and different property sizes. In this study, we aimed to analyze how land tenure structure shaped the fire regime in the Cáceres sub-region of the Pantanal between 1985 and 2023, integrating MapBiomas Fire data with the Rural Environmental Registry (CAR) classified by fiscal modules. The analysis of the fire regime in the Cáceres sub-region revealed a marked inflection beginning in the early 2000s, characterized by an “inversion of the flames,” in which the core of burned areas progressively shifted from the northern portion to the central–southern sector of the sub-region, following the spatial concentration of large rural properties. Considering the entire study period (1985–2023), annual burned area averaged $60,457.50 \pm 65,734.02$ ha, indicating high interannual variability. Temporally, the period from 2020 to 2023 emerged as the most critical in the time series, with a mean of 150,811 ha burned per year—6.8 times higher than the average observed between 2015 and 2019 ($22,173 \text{ ha yr}^{-1}$)—and an absolute peak of 285,812 ha in 2021. Fire recurrence was strongly modulated by property size. Among small properties (<4 fiscal modules), 83% burned no more than ten times over the entire series. Medium-sized properties (4–15 fiscal modules) exhibited intermediate recurrence levels (11–20 fire events), whereas large properties (>15 fiscal modules) showed substantially higher recurrence, with 91% of properties burning 11 or more times and 59% falling within the highest recurrence class (21–38 fire events). We therefore conclude that land tenure structure modulated the spatial trajectory of fire across the territory. Rather than imposing a fixed pattern, it strongly conditions where fire becomes recurrent and where it remains sporadic. In large properties, this modulation translates into a chronic and spatially persistent fire regime, defining priority areas for intervention. Consequently, the effectiveness of Integrated Fire Management (IFM) depends on recognizing this land tenure logic and adopting differentiated strategies to disrupt fuel cycles precisely where the landscape is configured to burn repeatedly.

Keywords: Rural properties; Wildfires; Land management.

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais têm se consolidado como um desafio central para a governança do uso da terra em um contexto de intensificação das mudanças climáticas, especialmente em regiões onde os arranjos fundiários e as práticas de manejo influenciam diretamente os regimes de fogo (Gonçalves, 2020; Marques et al., 2021). No Brasil, embora o bioma Pantanal represente uma parcela relativamente pequena do total da área queimada no país, trata-se do bioma proporcionalmente mais afetado, com aproximadamente 62% de sua área atingida por incêndios entre 1985 e 2024 (MapBiomas, 2025). Essa configuração reflete a elevada vulnerabilidade das grandes



áreas úmidas tropicais, nas quais eventos climáticos extremos interagem com decisões de uso da terra, intensificando a ocorrência do fogo (Garcia, et al., 2021; Martins et al., 2022; Alho, 2011).

Para além dos condicionantes climáticos, a dinâmica dos incêndios no Pantanal é fortemente moldada pelos processos históricos de ocupação do território e pela estrutura agrária, iniciado por sesmarias (Rosseto & Souza, 2005). A predominância de grandes propriedades rurais associadas à pecuária extensiva, coexistindo com pequenas propriedades e assentamentos rurais, resultou em um mosaico de usos da terra que influencia os padrões de ignição, propagação e controle do fogo (Seidl et al., 2001; Rosseto & Souza, 2005; Braz et al., 2020; Melo et al., 2025). Nesse contexto, o tamanho da propriedade rural constitui um indicador relevante das diferenças na capacidade de manejo, no acesso a recursos, no cumprimento da legislação ambiental e na resposta aos incêndios (Araújo et al., 2018; Barbosa et al., 2022), embora ainda seja pouco explorado em análises empíricas sobre a dinâmica do fogo.

Os incêndios recorrentes no Pantanal geram impactos que extrapolam a degradação ambiental, incluindo perdas econômicas, riscos à saúde pública associados à exposição à fumaça e emissões significativas de gases de efeito estufa (Caumo et al., 2022; Ferreira Neto et al., 2024). Esses efeitos são agravados em áreas com elevados estoques de matéria orgânica no solo, onde a ocorrência de incêndios persistentes e subterrâneos pode prolongar a duração do fogo e ampliar seus impactos ambientais e climáticos (Turetsky et al., 2015; Beer et al., 2024). Essas consequências indicam que políticas de uso da terra construídas a partir de regras padronizadas nem sempre conseguem atender às diferentes realidades sociais e territoriais do Pantanal, reduzindo sua capacidade de enfrentar os impactos dos incêndios (Cunha et al., 2023).

Mesmo com a existência de instrumentos nacionais voltados à gestão do fogo, como a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo e planos de ação específicos para o Pantanal, as políticas vigentes ainda incorporam de forma limitada variáveis associadas à estrutura fundiária e ao tamanho das propriedades rurais na análise da dinâmica espacial do fogo em escalas sub-regionais. Embora a legislação enfatize o planejamento territorial, a identificação de áreas de recorrência de incêndios e a elaboração de planos de manejo integrado do fogo (Brasil, 2024), a organização da propriedade rural permanece pouco explorada como fator estruturante do risco e da propagação do fogo na paisagem. Essa



lacuna científica dificulta a identificação de padrões territoriais de ocorrência do fogo e limita a formulação de estratégias de prevenção e manejo adaptadas a diferentes contextos fundiários e de uso da terra (Marques et al., 2021).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo geral: analisar como a dinâmica espacial e temporal das queimadas se relaciona com a estrutura fundiária na sub-região do Pantanal de Cáceres, localizada na porção norte do bioma Pantanal. Essa área corresponde a uma das unidades fisiográficas reconhecidas na regionalização clássica do Pantanal proposta por Silva e Abdon (1998), caracterizada por particularidades hidrológicas e geomorfológicas que influenciam a organização da paisagem e a dinâmica das inundações sazonais.

Para responder aos objetivos, integram-se dados de sensoriamento remoto e informações fundiárias a fim de avaliar:

- (1) a distribuição espacial do fogo entre 1985 e 2023 na sub-região;
- (2) a frequência de incêndios florestais em função das classes de tamanho das propriedades rurais, definidas a partir do módulo fiscal;
- (3) o comportamento temporal do fogo ao longo da série histórica em diferentes escalas de propriedade.

Com base nesses objetivos, formulam-se as seguintes hipóteses: **H0**: A ocorrência histórica do fogo é independente da estrutura fundiária, não havendo relação com tamanhos de propriedades **H1**: A distribuição espacial do fogo na sub-região do Pantanal de Cáceres está associada à configuração da estrutura fundiária, refletindo diferenças na organização do uso da terra. **H2**: A escala da propriedade rural define regimes distintos de ocorrência do fogo, de modo que diferentes classes de tamanho de propriedade apresentam padrões diferenciados de frequência e recorrência de queimadas.

Ao abordar conjuntamente o regime de fogo e a estrutura fundiária, o estudo contribui para o debate sobre políticas de uso da terra, contribuindo do onde, quando e ausência e presença das áreas queimadas, afim de servir como estratégia de aprimoramento da governança do fogo e para o desenho de estratégias de manejo mais adequadas à complexidade socioambiental do Pantanal em micro escala, em consonância com evidências observadas em outros ecossistemas úmidos e savânicos vulneráveis ao fogo (Heinl et al., 2007; Vidal-Riveiros et al., 2023).



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A delimitação espacial do bioma Pantanal adotada neste estudo seguiu a base cartográfica oficial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), que define os limites do bioma a partir de critérios geomorfológicos e hidrológicos associados à planície de inundação da bacia do Alto Paraguai. Dentro desse limite, a área de estudo corresponde à sub-região do Pantanal de Cáceres, localizada na porção norte da planície pantaneira (Figura 01).

A delimitação da sub-região seguiu a regionalização proposta por Silva e Abdon (1998), amplamente utilizada na literatura por identificar unidades fisiográficas do Pantanal com base em diferenças geomorfológicas, hidrológicas e na dinâmica de inundação. Essa classificação foi adotada neste estudo por permitir a análise de processos ecológicos e espaciais em unidades ambientais relativamente homogêneas da planície, além de ser uma das regionalizações mais utilizadas em estudos ecológicos e ambientais no Pantanal, o que favorece a comparabilidade dos resultados com trabalhos anteriores.

Embora o sistema Pantaneiro se estenda por territórios do Brasil, Bolívia e Paraguai, o recorte espacial da análise foi restrito à porção brasileira do bioma devido à disponibilidade de bases de dados fundiários padronizadas e comparáveis em escala nacional, o que permite integrar de forma consistente a análise da estrutura fundiária com a dinâmica espacial do fogo.

O Pantanal de Cáceres é caracterizado por clima tropical semiúmido, com estação seca bem definida entre os meses de maio e setembro e precipitação média anual de aproximadamente 1.335 mm no período entre 1971 e 2009 (Neves et al., 2011). Os solos predominantes incluem planossolos, plintossolos e argissolos (Santos et al., 2011), e o uso da terra é historicamente voltado à pecuária extensiva (Melo et al., 2025). Ecologicamente, a sub-região apresenta forte sazonalidade hidrológica, marcada por ciclos periódicos de inundação e seca (Alho & Sabino, 2012; Ivory et al., 2019), o que influencia diretamente a organização da paisagem e a dinâmica da vegetação. Entre as principais formações vegetacionais destacam-se diferentes unidades funcionais, incluindo lagoas, baías e corixos, áreas dominadas por macrófitas aquáticas, formações herbáceas, áreas arbustivas inundáveis, florestas poliespecíficas e campos limpos dominados por gramíneas nativas (Da Cunha et al., 2023).

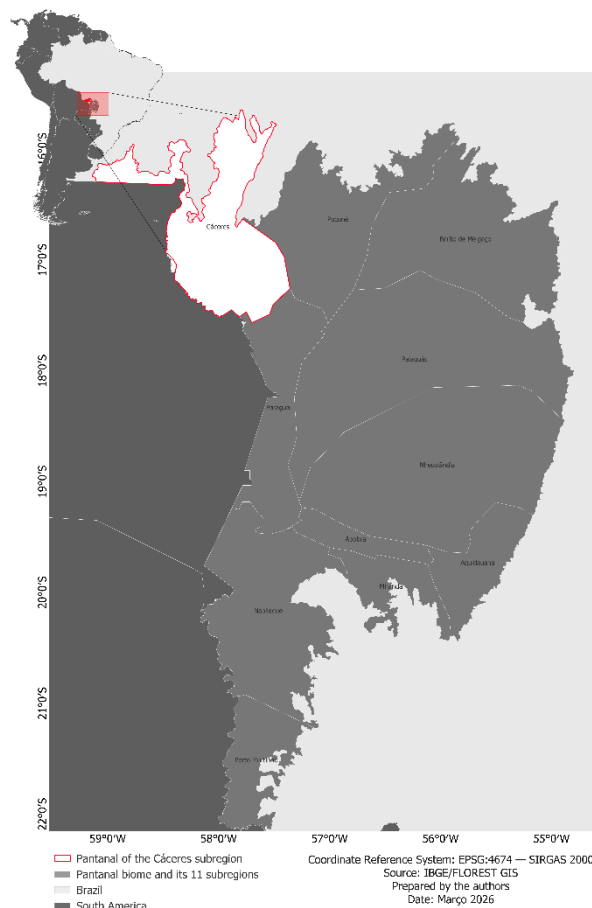


Figura 01: Delimitação da sub-região do Pantanal Brasileiro de Cáceres em relação às 10 sub-regiões.
Fonte: Silva e Abdon (1998) e Ibge (2018). Adaptado pelos autores (2026).

2.2 Fontes dos dados

Para caracterizar as propriedades rurais analisadas, foram utilizados dados públicos do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SiCAR), que reúne informações declaradas pelos proprietários sobre os limites e características ambientais dos imóveis rurais no Brasil. A partir dessa base, foram extraídas as geometrias dos imóveis registrados até 02 de setembro de 2024, considerando-se um único recorte temporal, de modo a evitar duplicidades e inconsistências associadas a atualizações sucessivas do cadastro.

A identificação das áreas atingidas por incêndios florestais foi realizada por meio da plataforma *Google Earth Engine*, que permite o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais em ambiente computacional em nuvem. Para isso, utilizou-se o *toolkit* da Coleção 3 do MapBiomas Fogo, que disponibiliza mapas anuais de áreas queimadas obtidos a partir de imagens de satélite. O período analisado compreendeu os anos de 1985 a 2023, permitindo a avaliação de padrões de longo prazo. Para cada ano,



foi gerada uma camada *raster* correspondente à área total queimada acumulada de cada ano, a qual foi posteriormente baixada e utilizada nas etapas de análise espacial.

2.3 Processamento e análise

As imagens de *Raster* foram processadas e espacialmente cruzadas com os limites das propriedades rurais no *software QGIS*, utilizando intersecção para juntar os dados de *shapefile* das propriedades com os *raster* de área queimada. Para extração dos valores de área queimada, foi utilizado a estatística zonal. Depois dos dados cruzados, foram extraídas as tabelas, com código dos imóveis, tamanho em hectares, módulo fiscal, cidade pertencente, e valor dos pixels encontrados em cada polígono das propriedades. Para conversão do pixel para área, considerando que o 1 pixel das camadas GeoTiff do mapbiomas é 30m30m, foi convertido no excel para:

$$\text{Hectares} = \text{número de pixel} \times \frac{900}{10.000}$$

Sendo:

Número de pixel = Número de pixel dentro do polígono

1 pixel = 30m x 30m = 900m²

1 hectare = 10.000 m²

Para avaliar o grau de impacto, foi calculado a proporcionalidade das áreas afetadas com o fogo de acordo com o tamanho total da propriedade, seguindo a fórmula:

$$\text{Proporção de área queimada} = \frac{\text{Área queimada (ha)}}{\text{Área total da propriedade (ha)}}$$

A classificação das propriedades por módulo fiscal foi realizada com base na Lei nº 8.629/1993, que estabelece os critérios de enquadramento fundiário no Brasil. De acordo com essa legislação, as propriedades foram agrupadas em três classes: pequenas (até 4 módulos fiscais), médias (acima de 4 até 14.99 módulos fiscais) e grandes (acima de 15 módulos fiscais), considerando as dimensões baseado na lei. De acordo com a Lei nº 6.746/1979, o módulo fiscal corresponde a uma unidade de medida agrária definida para cada município brasileiro com base em fatores como o tipo de exploração predominante, a renda gerada por essa atividade e as características agrárias locais. A área



de estudo abrange predominantemente o município de Cáceres (MT), além de porções territoriais dos municípios de Mirassol d'Oeste, Curvelândia, Porto Esperidião e uma pequena área pertencente ao município de Porto Estrela. Para todos esses municípios, 1 módulo fiscal definido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária corresponde a 80 hectares, valor adotado neste estudo como referência para a classificação do tamanho das propriedades rurais.

2.4 Média de área queimada por módulo e ano

Após a conversão dos pixels para hectares, a área queimada foi agregada dentro do limite de cada propriedade rural para cada ano da série histórica. Em seguida, foram calculados o somatório e a média da área queimada por classe de módulo fiscal, permitindo estimar a magnitude mínima e máxima das queimadas entre os diferentes tamanhos de propriedades.

2.5 Frequência relativas de imóveis afetados por incêndios em relação a recorrência

Para cada ano do período analisado (1985–2023), foi calculada a frequência relativa de propriedades rurais com ocorrência de incêndios em cada classe de tamanho definida por módulos fiscais. Inicialmente, contabilizou-se o número de propriedades com registros de área queimada em cada classe fundiária. Em seguida, esse valor foi dividido pelo número total de propriedades com ocorrência de incêndio no mesmo ano e multiplicado por 100, permitindo expressar a participação percentual de cada classe no total anual de imóveis afetados. A frequência relativa foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Frequência relativa} = \frac{MF \text{ observados}}{Mf \text{ totais}} \times 100$$

A recorrência do fogo foi estimada a partir do número de anos em que ocorreu área queimada dentro do limite de cada propriedade ao longo da série histórica. Para cada ano em que o fogo foi detectado dentro do imóvel, contabilizou-se uma ocorrência, independentemente da extensão da área queimada no evento. Dessa forma, uma mesma propriedade pode apresentar múltiplas ocorrências ao longo do período analisado.

A base fundiária analisada é composta por 2.111 imóveis rurais, classificados em três categorias de tamanho: pequenas propriedades (<4 módulos fiscais; n = 1.537),



médias propriedades (4–15 módulos fiscais; $n = 363$) e grandes propriedades (>15 módulos fiscais; $n = 211$).

Para avaliar as tendências temporais do regime de fogo entre as diferentes classes fundiárias, foram calculadas as frequências anuais de propriedades com ocorrência de área queimada entre 1985 e 2023. A fim de reduzir a variabilidade interanual, aplicou-se uma média móvel de cinco anos às séries temporais. Em seguida, foram ajustados modelos de regressão polinomial de segunda ordem para avaliar tendências não lineares ao longo do tempo entre o ano e as métricas analisadas (frequência relativa de propriedades afetadas e número absoluto de imóveis atingidos). A qualidade do ajuste foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da significância estatística dos modelos (p-valor).

2.6 Limitações e justificativas

Considerando que bases cartográficas históricas padronizadas de limites de propriedades rurais anteriores a 2013 não estão amplamente disponíveis em escala nacional ou apresentam inconsistências espaciais entre diferentes cadastros agrários, optou-se por utilizar a malha fundiária mais recente do Cadastro Ambiental Rural (CAR), instituído pela Lei nº 12.651/2012, portanto, limites das propriedades registrados foram coletados em 2024 usado como referência espacial para toda a série temporal analisada (1985–2023), permitindo manter uma unidade espacial consistente na avaliação da ocorrência de fogo ao longo do tempo.

Entretanto, reconhece-se que a estrutura fundiária da região passou por mudanças relevantes nas últimas décadas, incluindo processos de desmembramento e reorganização de propriedades rurais, bem como a implementação de projetos de assentamento. Essas dinâmicas podem introduzir distorções na representação histórica dos imóveis quando a malha fundiária atual é projetada retrospectivamente, podendo superestimar a presença de pequenas propriedades em períodos mais antigos ou subestimar mudanças fundiárias recentes.

No caso específico da área de estudo, evidências documentais indicam processos de reorganização fundiária associados à antiga Fazenda Nacional Caiçara. Registros administrativos da Secretaria do Patrimônio da União apontam disputas e processos de regularização fundiária nessa área ao longo do tempo, que contribuíram para a



fragmentação fundiária observada atualmente (Brasil, 2024). Contudo, não existe um marco temporal preciso que permita identificar o momento exato de desocupação ou subdivisão dessas terras. Assim, o ano de registro das propriedades no CAR foi utilizado apenas como referência administrativa do cadastro, não sendo interpretado como o momento efetivo de criação ou ocupação dos imóveis rurais.

Apesar dessas limitações, a utilização de uma única malha fundiária para toda a série temporal permite analisar padrões espaciais relativos de ocorrência do fogo em função do tamanho das propriedades, garantindo consistência metodológica nas comparações entre diferentes períodos.

3. RESULTADOS

3.1 Distribuição fundiária

A área total da sub-região é de aproximadamente 1.525.174 ha que corresponde a cerca de 10,10% do bioma Pantanal (Figura 02). As propriedades classificadas como grandes (> 15 módulos fiscais) ocupam aproximadamente 1.100.431 ha, correspondendo a 72% da área total da sub-região. As propriedades de médio porte (4–14,99 módulos fiscais) totalizam 166.980 ha (10%), enquanto as pequenas propriedades (< 4 módulos fiscais) ocupam 96.151 ha, representando cerca de 6,3% da área.

A região possui áreas não classificadas como imóveis rurais, incluindo perímetros urbanos, áreas públicas e áreas privadas não registradas no Cadastro Ambiental Rural, correspondendo a 150.058 ha (~9,8%) e a Estação Ecológica de Taiamã ocupa 11.554 ha (0,75%).

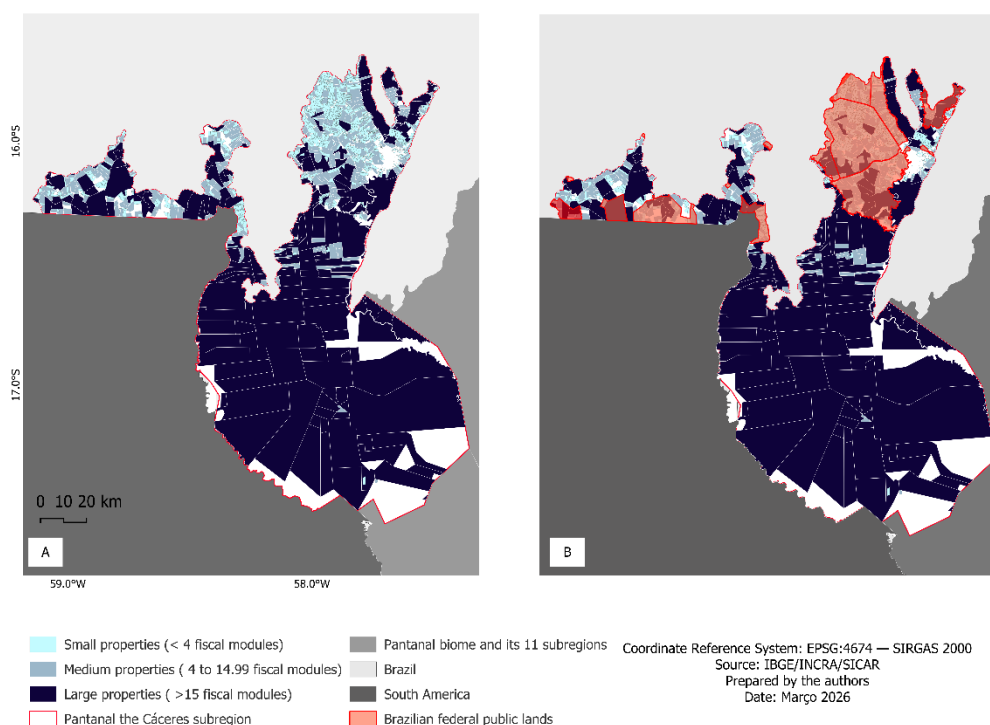


Figura 02: Localização e distribuição fundiária da sub-região do Pantanal de Cáceres. O mapa apresenta a delimitação da sub-região de estudo (em destaque), inserida no contexto do bioma Pantanal das 11 sub-regiões (em cinza e suas repartições). Em relação as cores, em azul são as pequenas propriedades, cinza as propriedades médias e azul escuro as grandes propriedades, áreas que estão em branco constam como ou áreas não ocupadas, ou áreas públicas não registradas e unidade de conservação, além do perímetro urbano da cidade de Cáceres. Fonte: SICAR. Elaborado pelos autores (2026).

3.2 Distribuição espacial

A dinâmica do fogo na sub-região do Pantanal de Cáceres, entre 1985 e 2023, foi marcada por uma alta variabilidade interanual, com uma área média queimada de $60.457,50 \pm 65.734,02$ ha por ano. Espacialmente, observou-se uma mudança clara no padrão das queimadas ao longo do tempo (Figura 02). Até 1999, os incêndios concentravam-se na porção norte. A partir da década de 2000, iniciou-se um processo contínuo de migração e expansão do núcleo do fogo para as porções centro-sul da sub-região.

A série histórica registrou seu valor mínimo anual em 1998 (38.402,7 ha) e seu pico absoluto em 2021 (285.812,5 ha). Uma análise da contribuição dos anos extremos revela que apenas os dois anos mais críticos, 2020 e 2021, foram responsáveis por 29,8% de toda a área queimada acumulada nos 39 anos do estudo. A comparação entre períodos



quinquenais destaca um contraste ainda mais pronunciado. Quando calculada a média anual de área queimada dentro de cada período, o quinquênio 2020-2023 destacou-se como o mais severo, com uma média de 150.811 ha/ano. Este valor é 6,8 vezes superior à média anual do quinquênio anterior (2015-2019), que foi o menos afetado, com 22.173 ha/ano.

Figura 03 abaixo.



Figura 03: (A) Evolução espaço-temporal das áreas queimadas na sub-região do Pantanal de Cáceres (1985-2023). Os mapas quinquenais mostram a progressão geográfica das cicatrizes de fogo (vermelho) ao longo de quatro décadas, revelando um deslocamento gradual do núcleo de queimadas da porção norte para a porção sul da sub-região a partir dos anos 2000; (B) Gráfico de distribuição de área queimada acumulada anual na sub-região. Fonte: SICAR e MapBiomas Fogo. Elaborado pelos autores (2026).



3.3 Magnitude de área queimada por módulo

A magnitude da área queimada diferiu entre as classes fundiárias (Tabela 01). As propriedades com mais de 15 módulos fiscais concentraram a maior área total queimada (230.851,1 ha), seguidas pelas propriedades entre 4 e 15 módulos fiscais (169.511,3 ha) e pelas propriedades com menos de 4 módulos fiscais (71.026,6 ha). A área média queimada e os valores máximos também aumentaram com o tamanho da propriedade, indicando maior extensão espacial dos incêndios nas propriedades de maior porte.

ÁREA	< 4 módulos	4 - 15 módulos	Acima de 15 módulos
Área total queimada (ha)	71026.65	169511.3	230851.1
Área média queimada (ha)	1821.19	4346.44	59192.79
Área mínima queimada (ha)	0.002323	0.0206	0.161
Área máxima queimada (ha)	255.29	438.28	8199.065

Tabela 01: área queimada (ha) por classe de módulo fiscal no período de 1985 a 2023. As classes fundiárias foram definidas como propriedades com menos de 4 módulos fiscais, entre 4 e 15 módulos fiscais e acima de 15 módulos fiscais.

3.4 Frequência de queimadas e incêndios por módulo fiscal

A análise da recorrência do fogo revelou que as queimadas não se distribuem aleatoriamente na paisagem, elas se organizam de forma segregada conforme o tamanho das propriedades. Testes estatísticos confirmam que essa vinculação fundiária é forte ($\chi^2 = 6.00$, $p < 0.001$; V de Cramér = 0.546), indicando que propriedades de diferentes tamanhos possuem modulações distintas de recorrência do fogo (Figura 03).

As pequenas propriedades (<4 MF) caracterizam-se predominantemente como áreas de baixa recorrência do fogo. Conforme apresentado na Figura 03A, 1.815 imóveis registram entre 1 e 4 ocorrências de fogo e 2.421 entre 5 e 10 ocorrências ao longo da série histórica (1985–2023), representando cerca de 83% das pequenas propriedades analisadas.

As propriedades médias (4–15 MF) apresentam distribuição relativamente equilibrada entre as classes de recorrência do fogo. Embora ocorram em todas as categorias, observa-se maior concentração nas classes intermediárias, especialmente entre 11 e 20 ocorrências de fogo, que reúne 1.339 imóveis. Além disso, essas propriedades



também apresentam presença nas classes de maior recorrência, indicando participação relevante no regime de fogo da paisagem.

Em contraste, as grandes propriedades (>15 MF) emergem como *hotspots* de cronicidade do fogo, 91% de seus 3.616 imóveis (3.294 propriedades) experimentaram 11 ou mais queimadas, com 2.137 propriedades (59%) na categoria máxima de recorrência (21-38 queimadas). Este padrão de persistência espacial extrema manteve-se estável temporalmente, com 326 a 201 propriedades consistentemente na categoria máxima a cada período quinquenal.

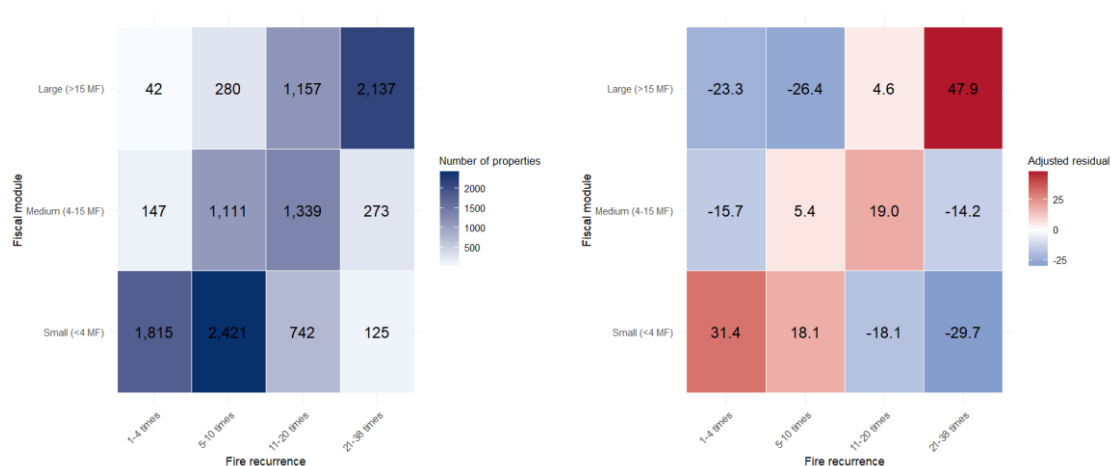


Figura 03: Recorrência de fogo dentro das propriedades (A) Distribuição absoluta de propriedades por classe de recorrência e tamanho fundiário. (B) Resíduos ajustados mostrando desvios da distribuição esperada sob independência. Em (A), cores mais escuras indicam maior número de propriedades; em (B), cores vermelhas indicam excesso e cores azuis indicam déficit em relação ao esperado. Fonte: SICAR e MapBiomias Fogo. Elaborado pelos autores (2026).

3.5 Comportamento do fogo em relação aos módulos fiscal de 1985 a 2023

A análise temporal revelou uma inversão fundiária na dinâmica do fogo no Pantanal de Cáceres entre 1985 e 2023 (Figura 04). O período entre 2000-2005 em que denominamos "inversão das chamas", marcou a transição entre dois regimes distintos de uma concentração inicial dominado pelas pequenas propriedades para um novo regime progressivamente dominado pelas grandes propriedades. Essa mudança estrutural é destacado pelo cruzamento das trajetórias polinomiais das classes fundiárias e se manifesta tanto na frequência relativa quanto no número absoluto de propriedades afetadas.

As pequenas propriedades (<4 módulos fiscais), embora tenham sido a classe mais frequente no início da série (61% dos anos), apresentaram um declínio curvilíneo acelerado ($R^2 = 0,78$; $p < 0,001$), particularmente pronunciado após o ano 2000. Sua



participação relativa reduziu-se progressivamente, assim como o número absoluto de propriedades desta classe atingidas pelo fogo ($R^2 = 0,85$; $p < 0,001$).

As propriedades médias (4–15 MF) mantiveram uma dinâmica estável e não-linear ao longo de toda a série, sem tendência direcional significativa tanto em frequência ($R^2 = 0,25$; $p = 0,005$) quanto em número absoluto ($R^2 = 0,81$; $p = 0,001$), funcionando como um elemento de transição no mosaico fundiário.

Em contraste, as grandes propriedades (>15 MF) apresentaram tendência não linear de aumento na frequência relativa de imóveis afetados pelo fogo ($R^2 = 0,71$; $p < 0,001$), no entanto, no número absoluto de propriedades atingidas ($R^2 = 0,76$; $p < 0,001$), observa-se redução geral ao longo da série temporal, semelhante ao padrão observado nas demais classes fundiárias, ainda que as grandes propriedades frequentemente apresentem valores comparáveis ou ligeiramente superiores em alguns períodos.

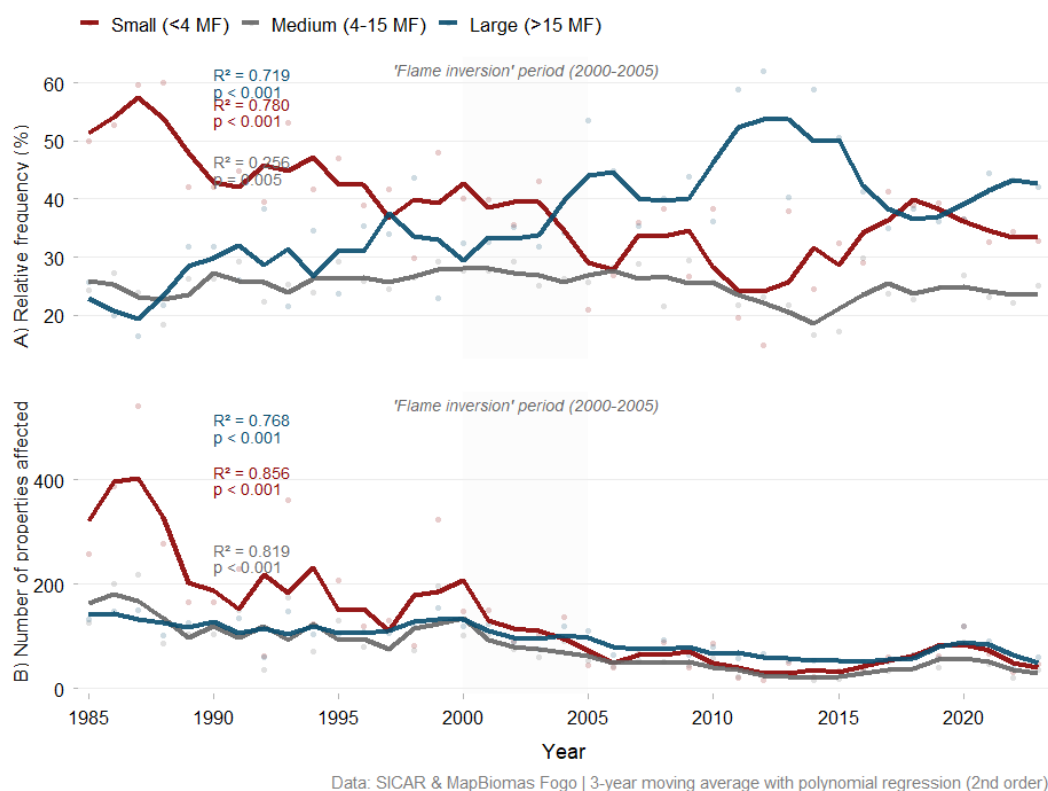


Figura 04: Regime temporal do fogo por classe fundiária no Pantanal de Cáceres (1985–2023). (A) Frequência relativa (%) de propriedades afetadas por fogo. (B) Número absoluto de propriedades atingidas. Linhas representam médias móveis de 5 anos aplicadas às séries temporais. Curvas indicam ajustes de regressão polinomial de segunda ordem. Valores de R^2 e p são apresentados no gráfico. Fonte: SICAR e MapBiomass Fogo. Elaborado pelos autores (2026)



4. DISCUSSÃO

Os resultados indicam que o regime de fogo no Pantanal de Cáceres entre 1985 e 2023 está fortemente associado à estrutura fundiária da paisagem. A distribuição da recorrência do fogo apresentou padrões distintos entre classes de tamanho de propriedades: pequenas propriedades concentraram-se principalmente em classes de baixa recorrência, propriedades médias apresentaram comportamento intermediário e grandes propriedades estiveram associadas às maiores recorrências de fogo. Além disso, observa-se uma mudança temporal na participação relativa dessas classes ao longo da série histórica, indicando que o regime do fogo na região passou por uma reorganização progressiva nas últimas décadas.

Neste estudo, utilizamos o termo “inversão das chamas” aplicado as propriedades para descrever uma mudança persistente no centro espacial e socioeconômico da ocorrência de queimadas na paisagem, no momento temporal, ou seja, a mudança ocorreram a partir de 2000-2005, porém, na literatura internacional é entendido como “regime de incêndio”. Esse processo ocorre quando o foco dominante das ocorrências de fogo se desloca geograficamente e passa a se associar a diferentes estruturas territoriais ou classes fundiárias ao longo do tempo (Rogers et al., 2020; Saiedy et al., 2024). No Pantanal de Cáceres, essa inversão manifesta-se pelo deslocamento do epicentro das queimadas da porção norte para o centro-sul da sub-região, acompanhado pelo aumento da participação de grandes propriedades na dinâmica do fogo a partir dos anos 2000. Processos semelhantes de reorganização espacial do regime de fogo têm sido descritos em sistemas socioecológicos onde mudanças históricas no uso da terra alteram os padrões de distúrbio (Kelly et al., 2023).

Nesse sentido, a noção de inversão das chamas ou mudança da do regime do incêndio funciona como uma unidade analítica para identificar momentos em que o regime do fogo deixa de ser dominado por um determinado arranjo territorial e passa a ser estruturado por outro. Ao explicitar onde, quando e em que direção ocorre esse deslocamento, o conceito permite comparar trajetórias de regimes de fogo entre diferentes regiões e investigar como mudanças fundiárias, políticas de uso do fogo e variações climáticas reorganizam espacialmente a ocorrência das queimadas (Bowman et al., 2020; Saiedy et al., 2024)



Consolidado a partir dos anos 2000, esse movimento não representa uma expansão aleatória das queimadas associada apenas ao aumento da inflamabilidade provocado por secas mais intensas (Lázaro et al., 2020; Marengo et al., 2022). Em vez disso, os resultados sugerem um deslocamento espacial seletivo das áreas mais afetadas pelo fogo, que passa a coincidir com regiões onde predominam grandes propriedades rurais. Embora análises em escala de bioma frequentemente enfatizem o papel de fatores climáticos na dinâmica das queimadas (Marques et al., 2021), a análise sub-regional realizada neste estudo indica que a distribuição do fogo também reflete a organização territorial da paisagem.

Grandes propriedades tendem a apresentar maior continuidade espacial da vegetação nativa e das áreas de pastagem, o que facilita a propagação do fogo em eventos de ignição. Além disso, a escala operacional dessas propriedades permite o uso do fogo como ferramenta de manejo em áreas mais extensas, ampliando a área potencialmente afetada por queimadas (Marques et al., 2021). Estudos anteriores mostram que a estrutura fundiária influencia diretamente as práticas de manejo do fogo, o acesso a recursos técnicos e as estratégias de controle de incêndios em paisagens rurais (Seidl et al., 2001; Araújo et al., 2018; Melo et al., 2025).

No Pantanal, onde a pecuária extensiva historicamente se organiza em grandes propriedades, o fogo permanece amplamente utilizado como ferramenta de manejo da pastagem (Braz et al., 2020; Melo et al., 2025). Em contextos amazônicos, propriedades de maior extensão também tendem a concentrar incêndios mais extensos e recorrentes devido à maior continuidade do combustível vegetal e a menores restrições operacionais para o uso do fogo (Fearnside, 2001; Uriarte et al., 2012).

A análise de recorrência revelou que pequenas e médias propriedades concentraram predominantemente eventos de baixa a média frequência, com redução ao longo do tempo, enquanto grandes propriedades mantêm, de forma consistente, elevados números de imóveis nas classes de alta recorrência em todos os períodos analisados. A recorrência do fogo está associada à consolidação de paisagens estruturalmente inflamáveis, nas quais ciclos de queima se retroalimentam ao longo do tempo (Ren et al., 2024; Justino et al., 2025). Em áreas úmidas, a repetição do fogo intensifica impactos cumulativos sobre a vegetação, o solo e os estoques de carbono, especialmente em sistemas com elevada matéria orgânica (Turetsky et al., 2015; Caumo et al., 2022).



A concentração sistemática de eventos de alta frequência revela um padrão de persistência espacial, reforçando ciclos recorrentes de queima (Kelly et al 2023). Esse achado é consistente com estudos realizados em outros sistemas savânicos e úmidos, onde paisagens com elevada continuidade de combustível vegetal favorecem a propagação extensiva do fogo e dificultam seu controle (Bowman et al., 2009; Heinl et al., 2007; Ren et al., 2024).

A utilização do CAR como base fundiária, ainda que útil para análises de longo prazo, revela fragilidades institucionais para a governança do fogo. Seu caráter autodeclaratório, somado a sobreposições, fragmentações artificiais e processos de grilagem documentados na região (Fearnside, 2001; Braz et al., 2020; Melo et al., 2025), compromete a responsabilização por recorrências sucessivas de queimadas. Como consequência, propriedades que apresentam repetidas ocorrências de fogo ao longo dos anos podem permanecer sem mecanismos efetivos de responsabilização ou acompanhamento (Furumo et al., 2024). Essa lacuna institucional tende a enfraquecer instrumentos tradicionais de comando e controle ambiental, uma vez que a identificação do responsável pela área queimada torna-se incerta ou contestável (Azevedo Ramos et al., 2020). Nesse contexto, a recorrência do fogo em grandes propriedades pode persistir ao longo do tempo não apenas por fatores ecológicos ou produtivos, mas também pela fragilidade dos mecanismos institucionais de monitoramento, responsabilização ambiental e fiscalização territorial.

A associação sistemática entre a ocorrência de áreas queimadas e a escala das propriedades indica que estratégias generalistas de controle do fogo, baseadas principalmente em respostas emergenciais durante a estação seca ou em políticas uniformes aplicadas a todo o território, tendem a apresentar eficácia limitada em sistemas socioecológicos complexos como o Pantanal. Essas abordagens priorizam o combate direto aos incêndios após sua ignição, frequentemente sem considerar diferenças estruturais entre tipos de propriedade, histórico de recorrência do fogo ou características locais da paisagem (Bowman et al., 2020; Hai et al., 2023).

Esse padrão reforça a necessidade de abordagens territorialmente diferenciadas para a gestão do fogo, como o Manejo Integrado do Fogo (MIF). O MIF integra prevenção, planejamento do uso do fogo, monitoramento e participação de atores locais, buscando reduzir incêndios de grande magnitude por meio do manejo estratégico do



combustível na paisagem (Santos et al., 2011; Carvalho et al., 2024). Diferentemente de políticas baseadas exclusivamente na supressão do fogo, essa abordagem reconhece que o fogo faz parte da dinâmica ecológica e das práticas produtivas locais, propondo seu uso planejado em momentos e locais específicos para reduzir a intensidade de queimadas descontroladas. No entanto, a implementação dessas estratégias em ambientes como o Pantanal apresenta desafios operacionais importantes, especialmente em áreas sazonalmente inundáveis ou de difícil acesso (Garcia et al., 2021). Ainda assim, experiências regionais indicam resultados promissores. No território indígena Kadiwéu, por exemplo, estratégias territorializadas de manejo resultaram em redução de aproximadamente 80% da frequência e da área queimada ao longo do período monitorado (Oliveira et al., 2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Consideramos que a modulação do regime do fogo na sub-região do Pantanal de Cáceres, ao longo da série temporal, é fundamentalmente compreendida pela estrutura fundiária. O fenômeno da "inversão das chamas", a migração do núcleo das queimadas do norte para o centro-sul a partir dos anos 2000, é o registro espacial dessa modulação. Embora outros fatores atuem, a trajetória do fogo está intrinsecamente vinculada à escala da posse da terra. Nas grandes propriedades, onde historicamente predomina uma intervenção antrópica de baixa intensidade mas grande extensão, o fogo encontra um território propício para se tornar crônico e recorrente, caracterizando um regime de incêndios mais severo.

Os resultados deste estudo também indicam a necessidade de aprimorar sistemas de monitoramento territorial voltados à recorrência do fogo. Uma estratégia possível consiste na integração de bases de dados fundiárias, como o CAR, com sistemas de monitoramento por satélite de áreas queimadas, permitindo identificar propriedades que apresentam padrões persistentes de recorrência. A partir dessas informações, órgãos ambientais poderiam desenvolver sistemas de alerta ou relatórios periódicos direcionados aos proprietários rurais, indicando o histórico de ocorrência de fogo em seus imóveis e incentivando a adoção de práticas preventivas. Paralelamente, esses dados poderiam orientar ações prioritárias de fiscalização, assistência técnica e implementação de estratégias de manejo do fogo em áreas com maior risco de recorrência, contribuindo para tornar a governança do fogo mais preventiva e territorialmente direcionada.



Esse arranjo estrutural ajuda a explicar por que políticas públicas baseadas em modelos padronizados de controle do fogo apresentam resultados limitados em contextos socioecológicos diversos como o Pantanal. A relação consistente entre recorrência das queimadas e escala fundiária indica que a governança do fogo precisa considerar, de forma explícita, o histórico de uso da terra, a configuração dos imóveis e a sensibilidade ecológica das áreas afetadas. Nesse contexto, o Manejo Integrado do Fogo (MIF) mostra maior aderência à realidade observada, ao permitir a adaptação das estratégias ao território e a concentração de esforços em áreas onde a reincidência do fogo é estrutural.

Do ponto de vista metodológico, o uso da malha fundiária recente como referência para análises retrospectivas impõe restrições à reconstrução precisa dos limites históricos dos imóveis. Ainda assim, a consistência dos padrões identificados entre estrutura fundiária e regime de fogo indica que os resultados capturam processos territoriais de longo prazo.

De forma integrada, esta pesquisa contribui para o debate sobre políticas de uso da terra e gestão do fogo em áreas úmidas tropicais. Ao demonstrar o papel decisivo da estrutura fundiária na organização espacial e temporal das queimadas, o estudo reforça que incorporar essa dimensão é fundamental para evitar a consolidação de regimes de fogo crônicos e para orientar estratégias de manejo verdadeiramente eficazes e ajustadas à realidade do território pantaneiro.

6. REFERÊNCIAS

ALHO, C.J.R. Biodiversity of the Pantanal: its magnitude, human occupation, environmental threats and challenges for conservation. **Brazilian Journal of Biology**. v. 71, p. 229-232. 2011. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1519-69842011000200001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/C4cbByyZN3XxMdHjYRhMc5z/?lang=en>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ARAÚJO, A, G, J. et al. Beef Cattle Production Systems in South Pantanal: Considerations on Territories and Integration Scales. *Land*. v. 7, n. 4. 2018. Doi: <https://doi.org/10.3390/land7040156>. Disponível: <https://www.mdpi.com/2073-445X/7/4/156>. Acesso em: 20 out. 2025

AZEVEDO RAMOS, C et al. Lawless land in no man's land: The undesignated public forests in the Brazilian Amazon. **Land use policy**. V 99, 104863. 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104863>. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837720302180>. Acesso em: 14 mar. 2026.



BARBOSA, M.L.F. et al. Compound impact of land use and extreme climate on the 2020 fire record of the Brazilian Pantanal. **Global Ecology & Biogeography**. v. 31. p.1960-1975. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1111/geb.13563>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/geb.13563>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BEER, F. et al. Peatlands in the Brazilian Cerrado: insights into knowledge, status and research needs. **Perspectives in Ecology and Conservation**. V. 22, p.260-269, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.07.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2530064424000373?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Fire in the Earth System. **Science**. v 324,481-484, 2009. Doi:10.1126/science.1163886. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1163886>. Acesso em: 6 Fev. 2026

BOWMAN, D.M.J.S et al. Vegetation fires in the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment* . V 1, 500–515, 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0085-3>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0085-3>. Acesso em: 14 mar. 2026.

BRASIL. Lei n.º 14.944, de 31 julho 2024. Institui a Política Nacional de Manejo Integrado do Fogo. Diário Oficial da União, Brasília, DF, [2024]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L14944.htm . Acesso em: 31 jul. 2025.

BRASIL. Lei nº 6.746 de 10 dezembro 1979. Altera o disposto nos arts. 49 e 50 da Lei nº 4.504, de 30 de novembro de 1964 (Estatuto da Terra). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1979. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1970-1979/l6746.htm . Acesso em: 20 dez. 2025.

BRASIL. Lei nº 8.629 de 25 fevereiro 1993. Dispõe sobre a regulamentação dos dispositivos constitucionais relativos à reforma agrária. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1993. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8629.htm . Acesso em: 20 dez. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Serviço Florestal Brasileiro. SICAR: Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural. Brasília: MAPA/SFB, [2024]. Disponível em: <https://consultapublica.car.gov.br/publico/imoveis/index> . Acesso em: 31 Julho. 2024.

BRASIL. Secretaria Pública da União (SPU). Parecer Fazenda nacional caicara. 2024. Disponível em: <https://memoria-spu.gestao.gov.br/manifestacoes-da-consultoria-juridica-2/parecer-sobre-fazenda-caicara/>. Acesso em: 09 mar. 2026.

BRAZ, A. M. et al. Estrutura Fundiária do Pantanal Brasileiro. **Finisterra**. v. 55(113), 157–174. 2020. Doi: <https://doi.org/10.18055/Finis18323>. Disponível: <https://revistas.rcaap.pt/finisterra/article/view/18323>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CARVALHO, W.S. et al. Influence of Land Use and Land Cover on the Quality of Surface Waters and Natural Wetlands in the Miranda River Watershed, Brazilian Pantanal. **Applied Sciences**, v. 14, n. 13, 5666, 2024. Doi: <https://doi.org/10.3390/app14135666>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5666>. Acesso em: 31 jul. 2025.



CAUMO, S. et al. Human risk assessment of ash soil after 2020 wildfires in Pantanal biome (Brazil). **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 15, p. 1575-1588, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01248-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11869-022-01248-2>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CUNHA, C, L, D; ALBUQUERQUE, F.B; MARTINAZZO, W.M.P. Convenção Ramsar E Pantanal Mato-Grossense: Aspectos da Política de Proteção Jurídica Ambiental. **Revista Jurídica da Ufersa**. v. 7, n. 13, p. 238-260. 2023. Doi: <https://doi.org/10.21708/issn2526-9488.v7.n13.p238-260.2023>. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/rejur/article/view/11887>. Acesso em: 31 jul. 2025.

FEARSIDE, P.M. Land-Tenure Issues as Factors in Environmental Destruction in Brazilian Amazonia: The Case of Southern Pará. **World Development**. v. 29, p. 1361-1372. 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(01\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(01)00039-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X01000390?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

FERREIRA NETO, J. B. F. et al. Bioclimatic zoning of the Pantanal. **Ra’e Ga**, v. 61, n. 1, p. 173–191, 2024. Doi: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.97357>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/97357>. Acesso em: 06 out. 2025.

FURUMO, P. R et al. Land conflicts from overlapping claims in Brazil’s rural environmental registr **Sustainability Science Research in PNAS**. 121 (33) e2407357121. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2407357121>. Acesso em: 14 mar. 2026.

GARCIA, L. C et al. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. **Journal of Environmental Management**. v, 293, 112870. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112870>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721009324?via%3Dihub>. Acesso em: 02 Fev. 2026

GONÇALVES, K. B. O Pantanal transfronteiriço e suas díades: uma análise a partir das áreas protegidas na zona de fronteira. **Geofronter**, v. 13, n. 2, p. 1-15, 2020. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/GEOF/article/view/5104>. Acesso em: 31 jul. 2025.

HAI, J. How Does Fire Suppression Alter the Wildfire Regime? A Systematic Review. **Fire**. 6, 424. 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/fire6110424>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-6255/6/11/424#article-metrics-citations>. Acesso em: 14 mar. 2026.

HEINL, M. et al. Fire activity on drylands and floodplains in the southern Okavango Delta, Botswana. **Journal of Arid Environments**. v. 68, p. 77-87. 2007. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.10.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196306001236?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e estatística – IBGE. Limites Pantanal-Cerrado-Amazônia. 2018. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/biomas/pdf/Lim06_PantCerr.pdf. Acesso em: 14/03/2026.

JUNK, W. J; DA CUNHA, C. N. Pantanal: a large South American wetland at a crossroads. **Ecological Engineering**. v. 24, p. 391-401. 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.11.012>. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857405000406?via%3Dihub>.
Acesso em: 31 de julho de 2025

JUSTINO, S.T.P et al. Monitoring Environmental Degradation and Spatial Changes in Vegetation and Water Resources in the Brazilian Pantanal. **Sustainability**, v. 17, n. 1, p. 51, 2025. Doi: <https://doi.org/10.3390/su17010051>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/51>. Acesso em: 31 jul. 2025.

KELLY, L. T et al. Understanding Fire Regimes for a Better Anthropocene. *Annual Review Environment and Resources*. v 48:207-235. 2023. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120220-055357>. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-environ-120220-055357>. Acesso em: 07 Jan.2026.

LÁZARO, W. L. et al. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**. v. 32, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/alb/a/6WY69WMrd8CDsycNgWSwF5j/?lang=en>. Acesso em: 31 jul. 2025.

LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 4, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac462e>. Acesso em: 6 out. 2025.

MapBiomias Project – Collection 3 of MapBiomias Fire, accessed on 24 jul through the link: <https://code.earthengine.google.com/?scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-fire.js>

MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**. 3:639204. 2022. Doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.942068>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2022.942068/full>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MARQUES, A. et al. Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. *Journal of Environmental Management*. v. 299, 113586, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113586>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721016480?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MARTINS, P. I. et al. Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**. v 176, 106517. 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106517>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857421003724?via%3Dihub>. Acesso em: 05 Fev 2026

MELO, G. S. et al. Gado, fogo e fronteiras: dinâmicas fundiárias e ambientais no Pantanal de Cáceres. *Campo-Território*. **Revista Campo-Território**. v. 20, n. 49, 2025. Doi: <https://doi.org/10.14393/RCT205977520>. Disponível em:



<https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/77520>. Acesso em: 31 jul. 2025.

NEVES, S. M. A. S; NUNES, M. C. M; NEVES, R. J. Caracterização das condições climáticas de Cáceres - MT-Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 69-82, 2011. Doi: <https://doi.org/10.5216/bgg.v31i2.16845>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/index.php/bgg/article/view/16845>. Acesso em: 31 jul. 2025.

OLIVEIRA M. R et al. Indigenous brigades change the spatial patterns of wildfires, and the influence of climate on fire regimes. **Journal of Applied Ecology**. 59, 1279–1290, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14139>. Disponível em: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1365-2664.14139>. Acesso em: 20 Dez. 2025.

REN, S. et al. Coherence of recurring fires and land use change in South America. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**. v. 10. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1002/rse2.390>. Disponível em: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rse2.390>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ROGERS, B.D et al. Focus on changing fire regimes: interactions with climate, ecosystems, and Society. *Environmental Research Letters*. V 15 030201. 2020. Doi: 10.1088/1748-9326/ab6d3a. Disponível: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab6d3a#erlab6d3as4>. Acesso em: 14 mar. 2026.

ROSSETO, O.C; SOUZA, M.B. Reorganização da estrutura fundiária no Pantanal Mato-grossense: os assentamentos da reforma agrária Corixinha, Katira, Água Boa e Bom Sucesso em Cáceres-MT. **Revista do Instituto Histórico e Geográfico de Mato Grosso**. v 1(63), p. 110–131. Disponível em: <https://revistaihgmt.com.br/index.php/revistaihgmt/article/view/245> . Acesso em: 31 jul. 2025.

SANTOS, F.C. et al. Fires in Pantanal: The link to Agriculture, Conversions in Cerrado, and Hydrological Changes. **Wetlands**. v. 44, 75. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01832-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13157-024-01832-5>. Acesso em: 31 jul. 2025.

SANTOS, H. G. et al. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Embrapa solos**. 2011. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. Acesso em: 31 jul. 2025.

SAYEDI, S.S et al. Assessing changes in global fire regimes. *Fire ecology*. v 20, 18. 2024. Doi: <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9>. Disponível: [ire ecol 20, 18 \(2024\)](https://doi.org/10.1186/s42408-023-00237-9). Acesso em: 14 mar. 2026.

SEIDL, A. F; SILVA; SILVA, J.S.V; MORAES, A.S. Cattle ranching and deforestation in the Brazilian Pantanal. **Ecological Economics**. v. 36, p. 413-425. 2001. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(00\)00238-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(00)00238-X). Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092180090000238X>. Acesso em: 31 jul. 2025

SILVA, J. S. V; ABDON, M. M. Delimitation of the Brazilian Pantanal and its subregions. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. 33(13), 1703–1711. 1998. Doi: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1998.v33.5050>. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/5050>. Acesso em: 15 Ago. 2025.

TURETSKY, M. R et al. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. **Nature Geoscience**. v. 8, 11–14. 2014. Doi: <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/ngeo2325>. Acesso em: 31 jul. 2025.

URIARTE, M. et al. Depopulation of rural landscapes exacerbates fire activity in the western Amazon. **Pnas**. v. 109, p. 21546-21550. 2012. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215567110>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1215567110>. Acesso em: 31 jul. 2025.

VIDAL-RIVEROS, C. et al. Spatiotemporal analysis of wildfires and their relationship with climate and land use in the Gran Chaco and Pantanal ecoregions. **Science of the Total Environment**, v. 955, 185624, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176823>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724069808?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

WANTZEN K. M et al. The end of an entire biome? World's largest wetland, the Pantanal, is menaced by the Hidrovia project which is uncertain to sustainably support large-scale navigation. **Science of The Total Environment**, v. 908, 167751, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167751>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723063787?via%3Dihub>. Acesso em: 20 Ago 2025.



ARTIGO A SER SUBMETIDO A REVISTA: INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY

(Fator de impacto 2.8)

Artigo 02 – PAISAGENS INFLAMÁVEIS: TRANSIÇÕES ECOLÓGICAS E VULNERABILIDADE CLIMÁTICA DO PANTANAL DE CÁCERES

Resumo: Compreender o regime do fogo no Pantanal exige considerar sua singularidade ecológica como sistema úmido e sazonalmente inundável. O pulso de inundação redefine continuamente a disponibilidade de combustível e a conectividade da paisagem, moldando a forma como variáveis ambientais e climáticas interagem para favorecer ou limitar a ignição e a propagação do fogo. Assim, a paisagem emerge como elemento estruturante da dinâmica do fogo, com implicações diretas para sua previsão e manejo. Este estudo avaliou como variáveis climáticas, ENSO e tipos de paisagem influenciaram a área queimada entre 1985 e 2023 na sub-região do Pantanal de Cáceres. A análise baseou-se em dados do MapBiomas Fogo e variáveis climáticas do ERA5-Land, utilizando Modelos Lineares Generalizados (Gamma) selecionados por AICc. Os resultados revelaram dominância das formações campestres na dinâmica do fogo, com média anual de $3.580,57 \pm 5.813,99$ ha, 1,72 vezes superior à segunda paisagem mais afetada (campos alagados $2.079,86 \pm 1.934,88$ ha). O período 2020-2023 apresentou médias quinquenais 6,8 vezes maiores que 2015-2019, destacando-se os anos extremos de 2020 (25.012 ha) e 2021 (28.009 ha) em formações campestres. Modelos exclusivamente climáticos exibiram baixo poder explicativo ($R^2 = 0,28$), sem preditores significativos individualmente ($p > 0,20$). A seleção por AICc identificou o modelo combinando paisagem e temperatura como mais parcimonioso ($\Delta AICc = 0,00$; peso AICc = 0,746), superando amplamente modelos puramente climáticos ($\Delta AICc = 196,87$). A temperatura máxima apresentou efeito positivo significativo ($\beta = 0,289 \pm 0,031$; $p < 0,001$), com respostas diferenciadas entre paisagens de formações campestres e campos alagáveis mostraram incrementos de 1.500–2.000 ha/°C, enquanto formações florestais e corpos d'água variaram 500–800 ha/°C. Limiares críticos emergiram abaixo de 1.200 mm de precipitação anual, $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de umidade do solo, ou acima de 32 °C, condições que predizem aumentos de área queimada em 3.000–4.000 ha em formações campestres quando combinadas. Interações ENSO×clima não foram significativas ($p > 0,37$), e a exclusão dos anos 2020-2021 reduziu o poder explicativo dos modelos para $R^2 = 0,13$. Conclui-se que a paisagem exerce controle estrutural primário sobre a suscetibilidade ao fogo, enquanto o clima atua como modulador condicional. A manutenção da conectividade hidrológica e a configuração espacial da vegetação emergem como possíveis estratégias para prevenção de incêndios.

Palavras-chave: Regime hidrológico. Modificação da paisagem. Uso da terra.

Abstract: Understanding fire regimes in the Pantanal requires consideration of its ecological singularity as a wetland system subject to seasonal flooding. The flood pulse continuously reshapes fuel availability and landscape connectivity, thereby modulating how environmental and climatic variables interact to promote or constrain fire ignition and spread. In this context, landscape structure emerges as a key organizing element of fire dynamics, with direct implications for fire prediction and management. This study evaluated how climatic variables, ENSO, and landscape types influenced burned area between 1985 and 2023 in the Cáceres sub-region of the Pantanal. The analysis was based



on MapBiomass Fire data and climatic variables from ERA5-Land, using Gamma Generalized Linear Models selected by AICc. Results revealed the dominance of grassland formations in fire dynamics, with an annual mean burned area of $3,580.57 \pm 5,813.99$ ha, 1.72 times higher than the second most affected landscape type (flooded grasslands: $2,079.86 \pm 1,934.88$ ha). The period 2020–2023 exhibited five-year mean values 6.8 times higher than those observed in 2015–2019, with extreme years recorded in 2020 (25,012 ha) and 2021 (28,009 ha) within grassland formations. Models based exclusively on climatic variables showed low explanatory power ($R^2 = 0.28$), with no individually significant predictors ($p > 0.20$). AICc-based model selection identified the model combining landscape and temperature as the most parsimonious ($\Delta AICc = 0.00$; AICc weight = 0.746), substantially outperforming purely climatic models ($\Delta AICc = 196.87$). Maximum temperature showed a significant positive effect ($\beta = 0.289 \pm 0.031$; $p < 0.001$), with landscape-specific responses: grassland and seasonally flooded grasslands exhibited increases of 1,500–2,000 ha per $^{\circ}\text{C}$, whereas forest formations and water bodies varied between 500 and 800 ha per $^{\circ}\text{C}$. Critical thresholds emerged below 1,200 mm of annual precipitation, $0.12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ of soil moisture, or above 32°C , conditions that jointly predict increases of 3,000–4,000 ha in grassland formations. ENSO $\times$ climate interactions were not significant ($p > 0.37$), and excluding the years 2020–2021 reduced model explanatory power to $R^2 = 0.13$. We conclude that landscape structure exerts primary control over fire susceptibility, while climate acts as a conditional modulator. Maintaining hydrological connectivity and vegetation spatial configuration emerges as a potential strategy for fire prevention in the Pantanal.

Keywords: Hydrological regime. Landscape modification. Land use.

1 INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e incêndios florestais, têm se tornado mais frequentes e intensos nas últimas décadas, refletindo de forma clara os efeitos das mudanças climáticas globais (Ipcc, 2021). Esses fenômenos afetam diretamente os ecossistemas e as populações humanas, comprometendo a biodiversidade, a segurança alimentar e a economia regional (Lazzari et al., 2024). Entre esses distúrbios, o fogo destaca-se por atuar simultaneamente como agente ecológico e como vetor de degradação ambiental, alterando ciclos biogeoquímicos, estruturas de habitat e fluxos de energia em diferentes escalas espaciais (Aragão et al., 2018; Ferreira Neto et al., 2022). A compreensão dos mecanismos que controlam a ocorrência e a propagação do fogo é, portanto, pertinente para avaliar a resiliência dos ecossistemas frente às mudanças climáticas.

O Pantanal, maior área úmida tropical contínua do planeta, constitui um sistema ecológico singular, cuja dinâmica depende fortemente do pulso anual de inundação, responsável por regular a produtividade, a conectividade entre habitats e a distribuição da biomassa vegetal (Junk & Wantzen, 2004). Sua biodiversidade e o papel essencial que



desempenha na regulação hídrica e climática, sustentam atividades econômicas tradicionais, como a pesca, o turismo e a pecuária extensiva (Alho & Sabino, 2011). Esse pulso hidrológico historicamente atuou como um importante fator limitante à propagação do fogo. No entanto, nas últimas décadas, o bioma tem vivenciado eventos de incêndios de grande escala, associados à intensificação de secas e ao aumento da temperatura, resultando em degradação do solo, impactos sobre a biodiversidade e prejuízos às atividades tradicionais da região (Marengo et al., 2020; Barros Rosa et al., 2025).

A dinâmica do fogo no Pantanal é fortemente condicionada por variáveis climáticas, como temperatura, precipitação e umidade do solo, que atuam sobre a disponibilidade e a inflamabilidade do combustível vegetal (Libonati et al., 2022; Justino et al., 2024). A temperatura máxima, em particular, exerce papel central ao acelerar a perda de umidade da vegetação e influenciar processos fenológicos, alterando o momento e a quantidade de biomassa seca disponível para a queima (Arieira et al., 2025). A recorrência de anos anormalmente quentes pode levar a mudanças estruturais na vegetação, favorecendo fisionomias mais inflamáveis e reduzindo a resiliência ecológica do sistema (Ferreira et al., 2024; Justino et al., 2025).

Além disso, a precipitação e a umidade do solo regulam a espacialidade do fogo ao controlar a conectividade hidrológica da paisagem. A irregularidade das chuvas e a supressão do pulso de inundação promovem a desconexão entre áreas alagadas, reduzindo a formação de barreiras naturais ao fogo e permitindo que incêndios se propaguem por regiões que, em condições normais, permaneceriam isoladas (Marengo et al., 2021; Martins et al., 2024). Nesse contexto, fenômenos de larga escala, como El Niño–Oscilação Sul (ENSO), podem atuar como moduladores indiretos do regime de fogo ao alterar padrões regionais de temperatura e precipitação (Moura et al., 2019; Andrade et al., 2020).

Em um bioma de grande extensão territorial e elevada heterogeneidade ambiental, como o Pantanal, variações sub-regionais no pulso de inundação, no uso e cobertura da terra e no microclima criam contextos ecológicos distintos, nos quais os mecanismos de ignição, propagação e persistência do fogo operam de forma diferenciada em relação as últimas duas décadas (Garcia et al., 2022). Assim, a análise por sub-regiões emerge como abordagem necessária para compreender como mudanças climáticas alteram o regime de fogo por meio da dinâmica espacial da paisagem, em vez de assumirem respostas



uniformes em larga escala (Marengo et al., 2021; Barros Rosa et al., 2025; Martins et al., 2024; Souza et al., 2025).

Com isso, a sub-região do Pantanal de Cáceres que representa 10,10% da área total do bioma Pantanal, caracteriza-se uma área estratégica nesse contexto, por concentrar pressões econômicas, como o projeto de hidrovía Paraguai-Paraná, dragagem do rio e por sofrer a influência das atividades do uso da terra na bacia do alto Paraguai (Lázaro *et al.*, 2020, Junk e Wantzen, 2004, Wantzen et al., 2024). Localizada em zona de transição de Biomas (Pantanal, Cerrado e Amazônia) e fronteira com a Bolívia, a sub-região abriga unidades de conservação e atividades tradicionais, como a pesca e pecuária Pantaneira, além de abrigar sítios arqueológicos (Chiaravalloti *et al.*, 2023; Tomas *et al.*, 2023; Oliveira e Milheira, 2020).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar como variáveis climáticas e diferentes tipos de paisagem influenciam a ocorrência e a magnitude das queimadas entre 1985 e 2023 na sub-região do Pantanal de Cáceres. Para isso, buscou-se: (i) caracterizar a variação temporal e espacial da área queimada entre diferentes tipos de paisagem; (ii) avaliar a influência das fases do ENSO sobre a área queimada agregada; e (iii) identificar quais variáveis ambientais e classes de paisagem exercem maior influência sobre a magnitude da área queimada. Com base nesses objetivos, foram formuladas as seguintes hipóteses: **(H1)** A magnitude e a distribuição temporal da área queimada variam significativamente entre diferentes tipos de paisagem, refletindo diferenças estruturais na disponibilidade e continuidade do combustível; **(H2)** As fases do ENSO influenciam a área queimada na região, com maiores extensões de queimadas associadas à anos caracterizados por condições climáticas mais secas; **(H3)** Variáveis climáticas e ambientais exercem influência significativa sobre a magnitude da área queimada, sendo responsáveis por explicar grande parte da variabilidade interanual das queimadas na sub-região.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

A sub-região do Pantanal de Cáceres, localizada no Pantanal Mato-Grossense, caracteriza-se por clima tropical sazonal, com alternância bem definida entre períodos de cheia e seca e precipitação média anual em torno de 1.335 mm (Neves et al., 2011). Essa sazonalidade hidrológica exerce papel central na dinâmica ecológica local, regulando a

disponibilidade de combustível vegetal e a formação de barreiras naturais à propagação do fogo. A paisagem é composta predominantemente por campos alagáveis, regiões campestres, fragmentos de florestas estacionais, configurando um mosaico na estrutura da vegetação, no regime de inundação e na conectividade espacial. (Da Cunha et al., 2023).

A região apresenta histórico recorrente de queimadas, associadas tanto a condições climáticas extremas quanto ao uso do fogo como prática de manejo na pecuária extensiva, o que reforça seu potencial como área-chave para investigar interações entre clima, paisagem e regime de fogo (Barros Rosa et al., 2025; Melo et al., 2025; Marques et al., 2021) (Figura 1).

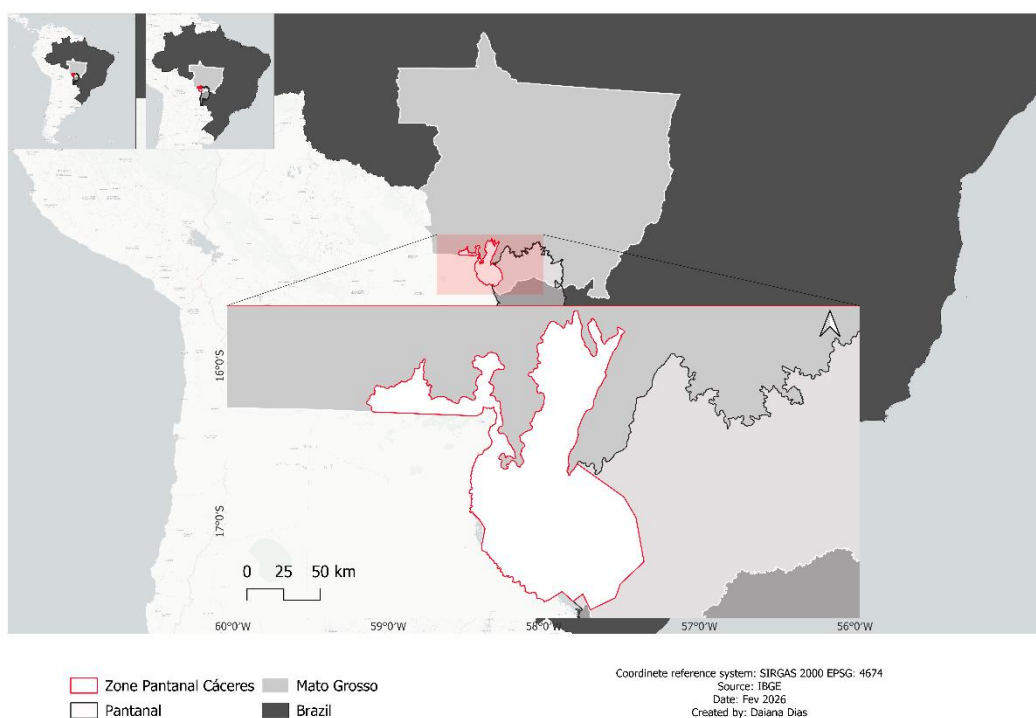


Figura 01: Localização da sub-região do Pantanal de Cáceres, Mato Grosso, Brasil. O mapa de localização posiciona a área de estudo (em destaque) no contexto regional e nacional. A sub-região do Pantanal de Cáceres (zona interna destacada) está inserida no bioma Pantanal, estado de Mato Grosso, com referência aos limites do Brasil e da América do Sul.

2.2 Período de estudo e obtenção de dados

O estudo abrange o período de 1985 a 2023, permitindo a análise de longo prazo da variabilidade climática e do regime de fogo no Pantanal. A área queimada foi obtida a



partir dos produtos do *MapBiomias* Fogo coleção 3, baseados em imagens *Landsat* com resolução espacial de 30 m.

As informações de área queimada foram integradas às classes de uso e cobertura da terra do *MapBiomias*, possibilitando a quantificação da área queimada por tipo de paisagem de forma padronizada (Tabela 01).

Tabela 01: Classes de uso e cobertura da terra utilizadas na análise. A categorização é baseada na legenda da Coleção 10 do MapBiomias, adaptada para destacar as características funcionais relevantes ao regime de fogo no Pantanal de Cáceres.

Formação	Descrição de acordo com a metodologia do mapbiomas
Formação Florestal	Cobertura dominada por dossel arbóreo contínuo (florestas estacionais, savanas florestadas), representa áreas com maior biomassa lenhosa.
Formação Savânica	Mosaico de vegetação lenhosa esparsa (árvores de pequeno porte e arbustos) sobre uma matriz contínua de estrato herbáceo-arbustivo. Característica de transição entre formações florestais e campestres.
Floresta alagável	Formações florestais adaptadas à sazonalidade hidrológica, tolerantes a solos encharcados por longos períodos. Inclui matas ciliares e outras florestas influenciadas pelo pulso de inundação.
Campo Alagado e Área Pantanosa	Fitofisionomias herbáceas dominantes em áreas sujeitas a alagamento sazonal ou permanente. Inclui campos úmidos, paratudais, cambarazais e áreas pantanosas com macrófitas. Corresponde às áreas de maior dinâmica hidrológica e combustível fino altamente inflamável na estação seca.
Formação Campestre	Dominância de estrato herbáceo, principalmente gramíneas nativas, com arbustos isolados. Inclui campos limpos e sujos, influenciados por gradientes edáficos e manejo pastoril. É a classe de vegetação campestre primária não permanentemente alagável.
Pastagem	Áreas com cobertura de gramíneas plantadas para atividade pecuária. Na região do Pantanal, esta classe indica conversão antrópica direta para uso agropecuário.
Rio, lago e ocano	Corpos d'água naturais e artificiais (rios, lagos, baías e reservatórios).

Fonte: Mapbiomas coleção 10 (2025). <https://brasil.mapbiomas.org/codigos-de-legenda/>

As variáveis climáticas foram extraídas de bases de reanálise atmosférica, assegurando cobertura espacial contínua ao longo da série histórica. As fases do El Niño–Oscilação Sul (El Niño, La Niña e fase neutra) foram identificadas com base nos registros do *Climate Prediction Center do National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2025)



2.2.1 Dados climáticos

Os dados climáticos da sub-região do Pantanal de Cáceres foram processados por meio da plataforma *Google Earth Engine* (GEE), utilizando a base de reanálise ERA5-Land no período de 1985 a 2023. O ERA5-Land é um produto do Serviço de Mudanças Climáticas do *Copernicus*, derivado do ERA5, desenvolvido especificamente para representar processos terrestres com maior acurácia, ao fornecer variáveis climáticas fisicamente consistentes e espacialmente contínuas sobre superfícies continentais (Copernicus, 2019).

As variáveis climáticas de precipitação, temperatura do ar, umidade do solo e radiação solar foram obtidas a partir do conjunto de dados ERA5-Land Hourly, disponibilizado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Esse produto possui resolução espacial aproximada de $0,1^\circ$ (~ 9 km) e fornece variáveis climáticas em escala horária.

Inicialmente, os dados horários foram agregados em valores diários. Para a precipitação, os valores horários foram somados para gerar a precipitação total diária. Para a temperatura do ar e a umidade do solo, foi calculada a média diária a partir dos registros horários. No caso da radiação solar descendente na superfície, os valores horários foram somados para obter o total diário de energia incidente.

Em seguida, os dados diários foram agregados para estatísticas anuais, incluindo médias, valores máximos e mínimos, dependendo da variável analisada. Essa etapa permitiu gerar uma série temporal anual de variáveis climáticas compatível com a escala temporal da série de área queimada utilizada como variável resposta.

Para representar as condições climáticas da sub-região do Pantanal de Cáceres, os dados *raster* foram agregados espacialmente por meio do cálculo da média dos pixels contidos dentro do limite da área de estudo, utilizando estatísticas zonais implementadas na plataforma *Google Earth Engine* (*reduceRegion*). Esse procedimento resultou em um valor anual representativo da sub-região para cada variável climática analisada (Material complementar 1).

2.3 Organização e pré-processamento dos dados

A análise foi conduzida a partir de séries temporais anuais de área queimada por paisagem e variáveis climáticas para a sub-região do Pantanal de Cáceres. Os dados foram



organizados e analisados no ambiente R (versão 4.4.2), utilizando principalmente os pacotes tidyverse, MuMIn, ggeffects, performance e car.

A área total queimada por ano e por tipo de paisagem foi a variável escolhida para medir o impacto do fogo. Essa métrica foi selecionada por três razões principais: (1) ela representa diretamente a magnitude do impacto ecológico no sentido de extensão; (2) permite uma comparação ao longo de todo o período estudado (1985–2023); e (3) é possível para identificar e analisar os grandes eventos de fogo, que são o foco desta pesquisa.

2.4 Avaliação da distribuição dos dados

A normalidade da variável resposta (área queimada) foi avaliada separadamente para cada classe de paisagem por meio do teste de Shapiro–Wilk. Para as paisagens com tamanho amostral suficiente ($n \geq 3$), os resultados indicaram rejeição sistemática da hipótese de normalidade ($p < 0,05$), mostrando distribuições fortemente assimétricas. Paisagens com número reduzido de observações foram classificadas como amostras insuficientes.

2.5 Influência de variáveis climáticas e fases do ENSO

Para avaliar a influência das variáveis climáticas e das fases do El Niño–Oscilação Sul (ENSO) sobre a área queimada agregada, foi ajustado um Modelo Linear Generalizado (GLM) com distribuição Gamma e função de ligação log.

A classificação das fases do ENSO foi baseada no Oceanic Niño Index (ONI), disponibilizado pelo *Climate Prediction Center* da NOAA. O ONI corresponde à anomalia da temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4 (5°N – 5°S , 120° – 170°W), calculada como média móvel trimestral. Seguindo o critério estabelecido pela NOAA, anos foram classificados como El Niño quando o ONI foi $\geq +0,5^{\circ}\text{C}$, La Niña quando $\leq -0,5^{\circ}\text{C}$ e Neutro quando os valores permaneceram entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $+0,5^{\circ}\text{C}$. A série temporal utilizada neste estudo foi obtida diretamente do *Climate Prediction Center* (NOAA).

O modelo incluiu como variáveis preditoras a fase climática do ENSO (La Niña, Neutro e El Niño), a precipitação total anual, a temperatura média máxima anual e a umidade média mínima do solo. A distribuição Gamma foi adotada por ser apropriada para modelar variáveis contínuas estritamente positivas e com distribuição assimétrica à



direita, características típicas de séries de área queimada em escala regional (Guo et al., 2015).

As fases do ENSO foram classificadas a partir da variável categórica “fase_climática”, sendo posteriormente convertidas em fator ordenado. Apenas observações com área queimada positiva foram consideradas. A adequação do modelo foi avaliada por meio da inspeção gráfica dos resíduos e do critério de informação de Akaike (AIC).

Efeitos marginais das variáveis climáticas foram estimados utilizando o pacote *ggeffects*, permitindo visualizar a resposta da área queimada ao longo dos gradientes ambientais sob diferentes fases do ENSO.

2.6 Controles paisagísticos

A influência da paisagem e do clima sobre a área queimada foi avaliada por meio de Modelos Lineares Generalizados (GLMs) com distribuição Gamma e função de ligação log, adequados para dados contínuos, positivos e assimétricos. A variável resposta foi a área queimada anual por tipo de paisagem, e os preditores incluíram classes de paisagem e variáveis climáticas agregadas em escala anual. Foram ajustados modelos concorrentes para representar diferentes hipóteses sobre os controles do fogo: (i) Modelo base: efeitos aditivos da paisagem e da temperatura média máxima anual; (ii) Modelo com interação: interação entre paisagem e temperatura máxima anual; (iii) Modelo climático: apenas variáveis climáticas (temperatura máxima, precipitação total, umidade mínima do solo, radiação solar média e fase do ENSO); (iv) Modelo completo: interação paisagem $\times$ temperatura máxima combinada com as demais variáveis climáticas.

A seleção de modelos foi realizada com base no Critério de Informação de Akaike corrigido para amostras pequenas (AICc), considerando Δ AICc e pesos de Akaike para avaliar parcimônia e suporte relativo. A multicolinearidade foi avaliada por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF), não sendo observados valores indicativos de dependência excessiva entre os preditores.

O modelo mais parcimonioso foi utilizado para estimar os efeitos parciais dos preditores. Esses efeitos foram calculados com a função *ggeffects* e representados graficamente em conjunto com os dados observados, permitindo avaliar como a área queimada responde ao gradiente climático em diferentes paisagens.



3 RESULTADO

3.1 Caracterização da área queimada por tipo de paisagem

A Formação Campestre foi a paisagem mais impactada pelo fogo, com média anual de $3580,57 \pm 5813,99$ hectares, representando 1,72 vezes a área queimada média da segunda paisagem mais afetada. Em ordem decrescente, seguiram-se, Campos Alagados ou Áreas Pantanosas ($2079,86 \pm 1934,88$ ha), Corpos D'água ($549,34 \pm 570,35$ ha), Formações Savânica ($442,46 \pm 596,62$ ha), Formação de Pastagem ($321,12 \pm 469,77$ ha) e Formação Florestal ($87,67 \pm 154,18$ ha) (Figura 02).

A variabilidade interanual foi mais acentuada nas formações campestres e formações campo alagável/pantanosos, com coeficientes de variação de 279,53% e 93,02%, respectivamente. Em contraste, formações florestais apresentaram menor oscilação ($CV = 7,41\%$), mantendo valores consistentemente baixos ao longo da série. Corpos d'água e pastagem demonstraram comportamento variações semelhantes ($CV = 27,42$ e $28,68\%$).

O período de 2020–2023 configurou-se como o mais crítico da série histórica, apresentando médias quinquenais de área queimada 6,8 vezes superiores às registradas no período anterior (2015–2019) em todas as formações de paisagem analisadas. Os maiores valores ocorreram nas formações campestres, com destaque para os anos de 2020 (25.012 ha) e 2021 (28.009 ha).

Os Corpos d'Água, que normalmente atuam como elementos de descontinuidade na propagação do fogo, também apresentaram registros de área queimada em anos específicos, com máximos observados em 1999 (2.550 ha) e 2007 (2.161 ha).

A ocorrência de áreas queimadas nessa classe sugere a exposição temporária de superfícies normalmente inundadas, indicando períodos de retração hídrica ou seca mais pronunciada nesses anos. Em contraste, as Florestas Alagáveis apresentaram valores extremamente reduzidos de área queimada ao longo de toda a série temporal ($\leq 0,01$ ha), o que limita sua contribuição absoluta para a área total queimada.

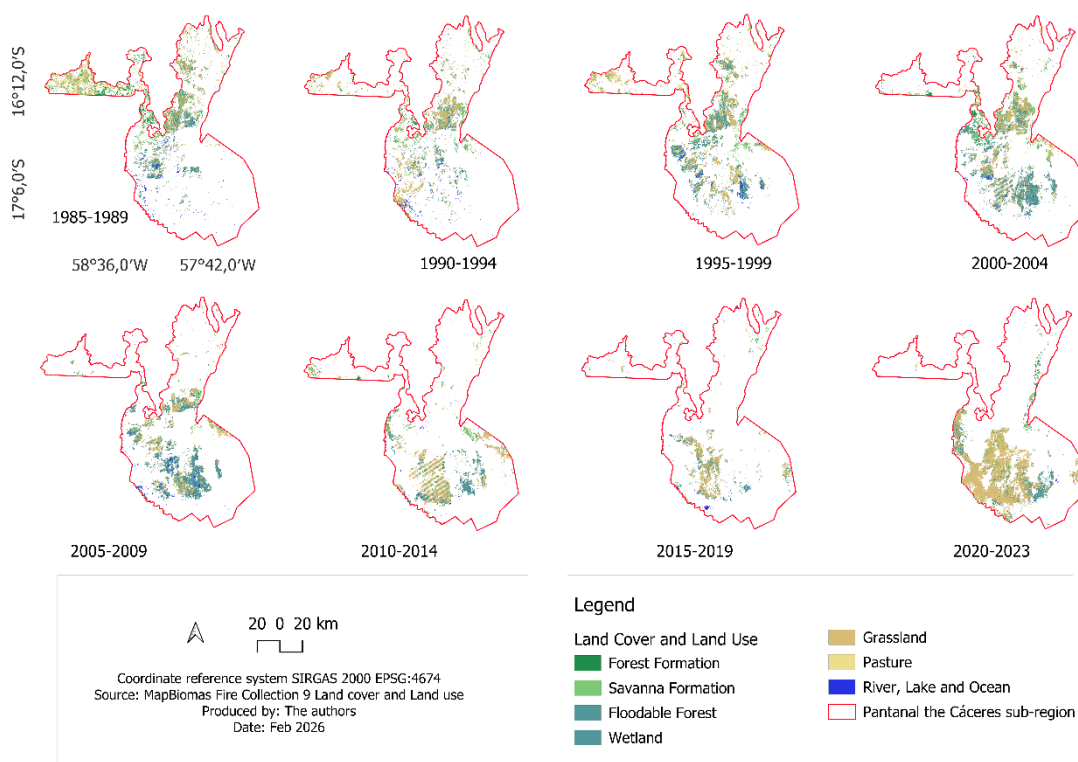


Figura 02. Dinâmica espacial e temporal da área queimada por tipo de paisagem no Pantanal de Cáceres (1985–2023). Cada mapa representa intervalo de 5 anos de tipos de paisagens queimadas. As informações por cobertura anual, encontra-se no material suplementar 2.

3.2 Influência das variáveis climáticas e do ENSO

As variáveis climáticas de larga escala mostraram capacidade limitada para prever a área queimada anual no Pantanal (1985-2023). Modelos que incluíram precipitação, temperatura, umidade do solo, radiação solar e fases do ENSO explicaram apenas 28% da variância observada, com nenhuma dessas variáveis alcançando significância estatística individual ($p > 0,20$).

Apesar da baixa significância estatística de algumas variáveis, as direções das relações foram consistentes com os mecanismos ecológicos esperados. Anos mais quentes e secos apresentaram tendência de maior área queimada, enquanto maiores valores de precipitação e umidade do solo estiveram associados à redução das predições do modelo. Os coeficientes negativos para precipitação ($\beta = -9,1 \times 10^{-5}$) e umidade do solo ($\beta = -31,4$), bem como o coeficiente positivo para temperatura máxima ($\beta = 0,196$), indicam respostas coerentes com o papel dessas variáveis na modulação da disponibilidade e da inflamabilidade do combustível vegetal.

Interações entre ENSO e variáveis climáticas não foram significativas ($p > 0,37$), revelando que os efeitos climáticos não diferem entre fases do El Niño, La Niña ou condições neutras, já a comparação entre períodos (1985-2004 vs 2005-2023) mostrou coeficientes estáveis sem diferenças significativas, e a exclusão dos anos extremos 2020-2021 reduziu o poder explicativo dos modelos (R^2 de 28% para 13%), destacando que há fraca associação climática depende criticamente destes eventos excepcionais.

A Figura 3 destaca três limiares práticos onde as predições de área queimada aumentam consideravelmente abaixo de 1.200 mm de precipitação anual, abaixo de $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de umidade do solo, ou acima de 32°C de temperatura máxima. Entre as fases do ENSO, a La Niña apresentou maior sensibilidade à temperatura, enquanto o El Niño não produziu os maiores extremos de queimada, sugerindo respostas complexas além da simples redução de chuva. A ampla sobreposição dos intervalos de confiança entre fases, entretanto, evidencia que o sinal climático de larga escala permanece fraco e inconsistente na escala anual do Pantanal.

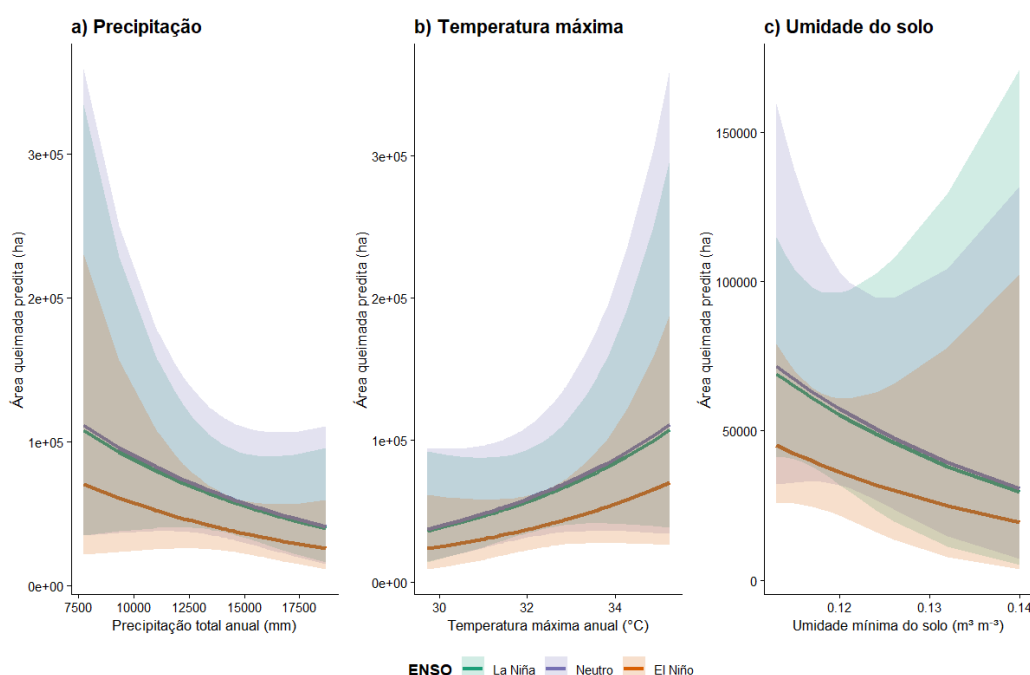


Figura 03: Cada painel mostra a relação predita entre a variável climática (eixo X) e a área queimada (eixo Y), com linhas sólidas representando os valores médios e áreas sombreadas indicando os intervalos de confiança de 95%. As cores distinguem as fases do ENSO: La Niña (verde), Neutro (roxo) e El Niño (laranja).



3.3 Controles paisagísticos e temperatura como modulador

A seleção por AICc identificou o modelo combinando paisagem e temperatura como o mais parcimonioso para explicar a área queimada no Pantanal ($\Delta AICc = 0,00$; peso AICc = 0,746). Modelos mais complexos, incluindo interações paisagem $\times$ temperatura ou variáveis climáticas adicionais (precipitação, umidade, radiação e ENSO), não melhoraram substancialmente o ajuste ($\Delta AICc > 2,97$). Notavelmente, o modelo puramente climático (sem paisagem) apresentou o pior desempenho ($\Delta AICc = 196,87$), confirmando que a estrutura da paisagem captura mais variância do que o clima isoladamente (Tabela 01).

Modelo	AICc	ΔAIC	Peso
m_base	3435.3	0	0.746
m_interacao	3438.2	2.97	0.169
m_completo	3439.6	4.35	0.085
m_clima	3632.1	196.87	0

Tabela 01: Descrição dos modelos avaliados. *m_base*: paisagem + temperatura máxima; *m_interacao*: paisagem $\times$ temperatura máxima; *m_clima*: ENSO + precipitação + temperatura máxima + umidade do solo + radiação solar; *m_completo*: paisagem $\times$ temperatura máxima + ENSO + variáveis climáticas.

Dentro do modelo selecionado, a temperatura máxima anual apresentou efeito positivo significativo ($\beta = 0,289 \pm 0,031$; $p < 0,001$) sobre a área queimada em todas as paisagens (Figura 4a). A magnitude dessa resposta, entretanto, variou entre tipos de cobertura vegetal, formações campestres e campos alagáveis mostraram as respostas mais acentuadas, com incrementos preditos de 1.500–2.000 ha por grau Celsius adicional. Formações florestais e corpos d'água apresentaram respostas moderadas (500-800 ha/°C), enquanto campos alagados e pastagens ocuparam posição intermediária.

Os gráficos de efeitos marginais (Figuras 4b e 4c) revelaram limiares hidrológicos críticos que modulam a suscetibilidade ao fogo. Abaixo de 1.200 mm de precipitação anual ou 0,12 m³ m⁻³ de umidade do solo, as predições de área queimada aumentaram exponencialmente em paisagens abertas e campestres.

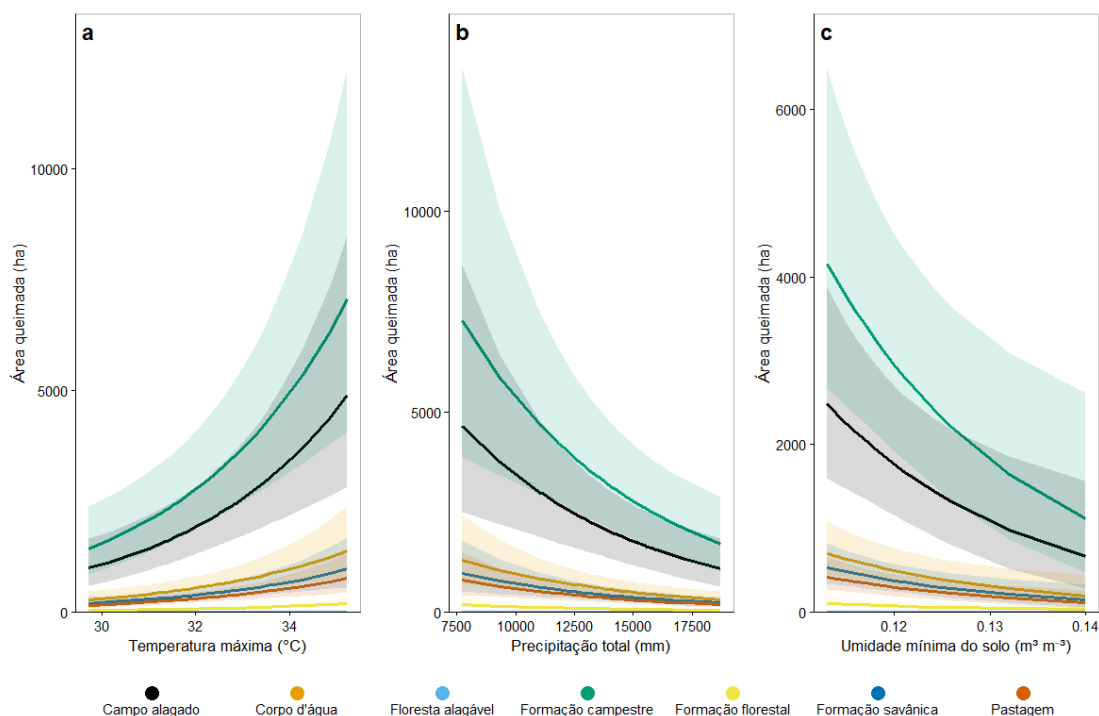


Fig. 04. Efeitos dos gradientes climáticos na área queimada por paisagem no Pantanal. (a) Temperatura, (b) precipitação, (c) umidade do solo. Linhas sólidas = previsões médias; faixas sombreadas = IC 95%. Cores diferenciam paisagens (legenda inferior). Modelo selecionado: paisagem + temperatura (AICc peso = 0,746).

4. DISCUSSÃO

4.1. Papel da paisagem com modulador do fogo

O principal achado deste estudo é que a paisagem exerce papel mais determinante sobre a extensão das queimadas no Pantanal de Cáceres do que as variáveis climáticas e fenômenos (ENSO) de larga escala, propondo a forma como a relação clima e fogo deve ser interpretada em sistemas úmidos tropicais em pequena escala. Embora temperatura, precipitação e umidade do solo sejam importantes para a inflamabilidade do combustível, nossos resultados demonstram que esses fatores atuam de forma dependente, tendo seus efeitos amplificados ou moderado conforme a estrutura e a funcionalidade da paisagem.

Esse resultado ajuda a explicar por que modelos exclusivamente climáticos apresentaram baixo desempenho explicativo ($\Delta AICc = 196,87$), mesmo em uma região fortemente influenciada por secas extremas e anomalias térmicas recentes (Miranda et al., 2025; Santos et al., 2023). Estudos anteriores no Pantanal frequentemente enfatizaram o papel do clima e de fenômenos como o ENSO na intensificação dos incêndios (Libonati et al., 2022; Marengo et al., 2021). No entanto, ao tratar o clima como fator dominante e



relativamente similar no espaço, essas abordagens tendem a subestimar o papel da diversidade paisagística como modulador do regime de fogo.

O clima atua principalmente como gatilho do fogo, enquanto a paisagem define sua suscetibilidade de propagação. Nossos resultados mostram que formações campestres e campos alagáveis responderam de forma mais intensa ao aumento da temperatura. Esse padrão pode ser explicado pela alternância dessas paisagens entre estados úmidos e secos, que permite sua rápida conversão em ambientes dominados por combustível fino altamente inflamável, conforme descrito para sistemas sazonalmente inundáveis (Whitney et al., 2026). Esse efeito é compatível com o conceito de filtro de paisagem dinâmico, no qual a vegetação e a hidrologia local modulam as variáveis climáticas em distúrbios ecológicos efetivos (Bowman et al., 2009). Em sistemas tropicais e subtropicais, a resposta do fogo a extremos climáticos está fortemente condicionada à configuração da paisagem e à conectividade do combustível, fatores que modulam a propagação e a magnitude dos incêndios (Kumar et al., 2022; Vidal-Rivieros et al., 2024).

A fragmentação entre clima e fogo observada neste estudo dialoga com trabalhos que indicam uma reconfiguração do regime de fogo em paisagens submetidas a crescente pressão antrópica. Na Amazônia, a fragmentação florestal, a abertura de áreas e o acúmulo de combustível seco têm enfraquecido a relação histórica entre a seca climática e a área queimada (Aragão et al., 2018; Andrade et al., 2020; Silvério et al., 2021). Nessas paisagens, a ocorrência de incêndios em florestas tropicais tem se mostrado cada vez mais associada a processos de desmatamento e degradação do que às condições meteorológicas propriamente ditas (Jones et al., 2022).

4.2. Implicações ecológicas e para o manejo adaptativo do fogo

As respostas contrastantes entre tipos de paisagem observadas neste estudo têm implicações diretas para o manejo do fogo no Pantanal. Formações campestres e campos alagáveis emergem como núcleos estruturais de propagação de incêndios, especialmente em anos quentes e secos, funcionando como vetores de expansão espacial do fogo em larga escala. Essas paisagens combinam alta produtividade herbácea com rápida secagem do combustível, criando condições favoráveis a incêndios extensos quando a conectividade hidrológica é reduzida, como já documentado para diferentes sub-regiões do Pantanal (Lázaro et al., 2020; Miranda et al., 2018; Ferreira Neto et al., 2024; Marques et al., 2022).



A recorrência de grandes queimadas atua como um filtro ecológico, selecionando espécies tolerantes ao fogo e alterando a trajetória natural da vegetação. Esse processo pode levar a ciclos de fogo auto-reforçados, em que incêndios frequentes mantêm a paisagem mais inflamável e homogênea, reduzindo sua resiliência ecológica e hidrológica a longo prazo, um fenômeno já previsto em estudos clássicos sobre o papel do fogo no sistema terrestre (Bowman et al., 2009; Whitney et al., 2026)

Sob a perspectiva do manejo, ações preventivas devem ser espacialmente direcionadas, priorizando paisagens abertas durante períodos de maior estresse climático, conforme indicado também por Ferreira et al, (2024). A centralidade da hidrologia como reguladora do fogo reforça a importância do conceito do pulso de inundação como eixo estruturante do Pantanal (Junk & Wantzen, 2004). A supressão ou encurtamento das cheias não apenas afeta a biodiversidade, mas também reduz a eficácia das barreiras naturais ao fogo.

Nesse contexto, a conservação de áreas alagáveis (preservadas), e corpos d'água assume um papel funcional na dinâmica regional do fogo (Graves et al., 2019). Essas formações atuam como elementos de descontinuidade na paisagem, interrompendo a conectividade do combustível e limitando a propagação de incêndios em larga escala (Whitney et al., 2026). A manutenção do regime hidrológico natural contribui para preservar essas zonas de amortecimento, reduzindo a continuidade espacial da vegetação seca durante a estação seca (Garcia et al., 2021; Lázaro et al., 2020). Assim, a integridade hidrológica da planície de inundação não apenas sustenta processos ecológicos fundamentais, mas também desempenha um papel indireto na regulação do regime de fogo, ao modular a disponibilidade e a conectividade do combustível na paisagem.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo central investigar como a configuração da paisagem e os gradientes climáticos interagem para moldar o regime de queimadas na sub-região do Pantanal de Cáceres entre 1985 e 2023. Como resultado, demonstramos que há uma hierarquia de fatores que explica essa dinâmica.

Como principais achados, elencamos que a paisagem é o principal estruturador espacial da área queimada, superando a influência direta do clima e de fenômenos como



o ENSO, que não se mostrou um causador direto. A variável climática de maior interação foi a temperatura, enquanto modelos compostos apenas por variáveis climáticas (ENSO, precipitação, temperatura e umidade) apresentaram desempenho preditivo baixo, indicando que o clima, isoladamente, é um preditor insuficiente para a magnitude das queimadas.

A interpretação desses resultados conduz à discussão de que o clima funciona como um gatilho condicional, predispondo a região ao fogo, mas a carga e a configuração do combustível inflamável, definidas pela paisagem que são o que efetivamente determinam a magnitude da área queimada. Teoricamente, nosso trabalho defende que a análise do fogo no Pantanal deve deslocar o foco para escalas regionais e processos paisagísticos.

Reconhecemos, contudo, as limitações deste estudo. A escala temporal anual, embora adequada para identificar padrões de longo prazo, não captura dinâmicas sazonais que governam a ignição e a propagação do fogo. Adicionalmente, variáveis antrópicas explícitas, como densidade de estradas, uso do fogo na pecuária e histórico de queimadas, não foram incorporadas aos modelos, representando uma fonte de variância não explicada que pode ser chave para entender a ignição inicial.

Portanto, indicamos para pesquisas futuras investigações em alta resolução temporal (sazonal), integração de influências antrópicas diretas, como desmatamento, barragens, proximidade a estradas e propriedades rurais, e o marco legal do uso do fogo; a criação de cenários prospectivos de *hotspots* para antecipar possíveis pontos de inflexão no regime de fogo.

Este estudo demonstra que, em escala de sub-região, os incêndios são primariamente moldados pela dinâmica não linear da paisagem. A principal estratégia de defesa contra mega-incêndios, portanto, é o monitoramento constante baseado na realidade biofísica e social local. Reforçamos, ainda, a importância fundamental do regime hidrológico como indicador-chave para a manutenção das características do bioma. Por fim, defendemos que programas de restauração e recomposição da vegetação nativa em locais estratégicos, como cabeceiras de drenagem e zonas de amortecimento são ações urgentes para restaurar a resiliência hídrica e garantir que as gerações futuras conheçam o Pantanal em sua singularidade.



6. REFERENCIAS

ALHO, C. J. R. Biodiversity of the Pantanal: Response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4 (Suppl.), p. 957-966, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842008000500005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/cTbDFzkGmpNjD4RKnsxfTwn/?lang=en>. Acesso em: 6 out. 2025.

ANDRADE, C. F. et al. Fire regime in Southern Brazil driven by atmospheric variation and vegetation cover. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 295, 108198, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108194>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192320302963?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02771-y>. Acesso em: 6 out. 2025

ARIEIRA, J. et al. Phenological cycles in the Pantanal woody communities: Responses to climate and soil moisture seasonality. **PLoS ONE**, 20(2): e0316011, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316011>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0316011>. Acesso em: 6 out. 2025.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. Fire in the Earth System. **Science**. 324,481-484, 2009. Doi: [10.1126/science.1163886](https://doi.org/10.1126/science.1163886). Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1163886>. Acesso em: 6 Fev. 2026

CHIARAVALLOTI, R. M et al. Achieving conservation through cattle ranching: The case of the Brazilian Pantanal. **Conservation Science and Practice**, v. 5, n. 10, e13006, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1111/csp2.13006>. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/csp2.13006>. Acesso em: 6 out. 2025.

CLIMATE PREDICTION CENTER. Oceanic Niño Index (ONI). 2025. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 6 out. 2025.

Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019 DOI: [10.24381/cds.e2161bac](https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac) . Acesso em: 6 out. 2025.

CORREA, D. B et al. Increased burned area in the Pantanal over the past two decades. **Science of The Total Environment**. v. 835, 155386, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155386>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722024792?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

FERREIRA NETO, J. B. F. et al. Bioclimatic zoning of the Pantanal. **Ra’e Ga**, v. 61, n. 1, p. 173–191, 2024. Doi: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.97357>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/97357>. Acesso em: 6 out. 2025.



FERREIRA NETO, J. M. et al. Emissões de CO e CH₄ durante incêndios extremos no Pantanal. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 1-20, 2022. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/18012/10267>. Acesso em: 6 out. 2025.

FERREIRA, B. H. S et al. Flooding and fire frequency promotes beta diversity in tree and non-tree species in tropical wetlands. **Forest Ecology and Management**, v. 569, 122175, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122175>. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/18012/10267>. Acesso em: 6 out. 2025.

GARCIA, L. C et al. Record-breaking wildfires in the world's largest continuous tropical wetland: Integrative fire management is urgently needed for both biodiversity and humans. **Journal of Environmental Management**. v, 293, 112870. 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112870>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721009324?via%3Dihub>. Acesso em: 02 Fev. 2026

GRAVES, B.P et al. Macro-charcoal accumulation in floodplain wetlands: Problems and prospects for reconstruction of fire regimes and environmental conditions. **PLoS ONE** 14(10): e0224011, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224011>. Disponível: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0224011>. Acesso em: 14 mar. 2026.

GUO, F et al. Gamma generalized linear model to investigate the effects of climate variables on the area burned by forest fire in northeast China. **J. Journal of Forestry Research**. v 26, 545–555, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0084-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-015-0084-2>. Acesso em: 14 mar. 2026.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2021. Doi: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2021-the-physical-science-basis/415F29233B8BD19FB55F65E3DC67272B>. Acesso em: 7 out. 2025.

JONES, M.W et al. Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. **Reviews of Geophysics**, v. 60, e2020RG000726, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020RG000726>. Acesso em: 10 Fev 2026.

JUNK, W. J.; WANTZEN, K. M. The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications – an update. In: WELCOMME, R. L.; PETR, T. (ed.). Proceedings of the Second International Symposium on the Management of Large Rivers for Fisheries. Bangkok: FAO; Mekong River Commission, 2004. p. 117-149. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274511459_The_Flood_Pulse_Concept_New_Aspects_Approaches_and_Applications-An_Update. Acesso em: 09 Fev. 2025

JUSTINO, S. T.P. et al. Monitoring Environmental Degradation and Spatial Changes in Vegetation and Water Resources in the Brazilian Pantanal. **Sustainability**, v. 17, n. 1, p.



51, 2025. Doi: <https://doi.org/10.3390/su17010051>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/1/51>. Acesso em: 6 out. 2025.

KUMAR, S. et al. Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. **Scientific Reports**. v. 12, n. 1, 5130, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05130-0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-05130-0>. Acesso em: 6 out. 2025.

LÁZARO, W. L. et al. Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica Brasiliensia**. v. 32, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X7619>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/alb/a/6WY69WMrd8CDsycNgWSwF5j/?lang=en>. Acesso em: 31 jul. 2025.

LAZZARI, D. et al. Identification of extreme weather events and impacts of the disasters in Brazil. **arXiv**, 11 set. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2409.16309>. Acesso em: 6 out. 2025.

LIBONATI, R. et al. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 4, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac462e>. Acesso em: 6 out. 2025.

MARENGO, J. A. et al. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. **Frontiers in Water**. v. 4, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.942068>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2022.942068/full>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MARQUES, J. F. et al. Fires dynamics in the Pantanal: Impacts of anthropogenic activities and climate change. **Journal of Environmental Management**, v. 299, 113586, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113586>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721016480?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

MARTINS, P. I. et al. Fire-sensitive and threatened plants in the Upper Paraguay River Basin, Brazil: Identifying priority areas for Integrated Fire Management and ecological restoration. **Ecological Engineering**, v. 209, 107411, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107411>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857424002362?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

MARTINS, P. I. et al. Prioritising areas for wildfire prevention and post-fire restoration in the Brazilian Pantanal. **Ecological Engineering**. v. 176, 106517, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106517>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857421003724?via%3Dihub>. Acesso em: 05 Fev 2026

MELO, G. S. et al. Gado, fogo e fronteiras: dinâmicas fundiárias e ambientais no Pantanal de Cáceres. Campo-Território: **Revista de Geografia Agrária**. v. 20, n. 49, 2025. Doi: <https://doi.org/10.14393/RCT205977520>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/77520>. Acesso em: 31 jul. 2025.



Miranda, V. F. V.V; Jiménez, J. C; Trigo, I. Evapotranspiration anomalies over the Pantanal region during the 3 droughts 2018-2020. **Recent Advances** .v, 2 (3), 2025. Doi: <https://doi.org/10.62880/rars25003>. Disponível em: <https://www.recentadvancesin.com/remote-sensing/3020-6448-rars25003/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MOURA, M. M. et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**, v. 660, p. 707-717, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718336866?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.

NEVES, S. M. A. S. et al. Caracterização das condições climáticas de Cáceres - MT-Brasil, no período de 1971 a 2009: subsídio às atividades agropecuárias e turísticas municipais. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 31, n. 2, p. 69-82, 2011. Doi: <https://doi.org/10.5216/bgg.v31i2.16845>. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/index.php/bgg/article/view/16845>. Acesso em: 31 jul. 2025.

OLIVEIRA, J. E.; MILHEIRA, R. G. Etnoarqueologia de dois aterros Guató no Pantanal: dinâmica construtiva e história de lugares persistentes. **Mana**, v. 26, n. 2, p. 1-25, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1590/1678-49442020v26n3a208>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mana/a/bFQnz4rnKqw3r4mtCwJ9r4K/?lang=pt>. Acesso em: 6 out. 2025.

ROSA BARROS, L. et al. The ineffectiveness of current environmental and fire policies in the world's largest wetlands. **Environmental Research Letters**. 20, 034039, 2025. Doi: 10.1088/1748-9326/adb7f5. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/adb7f5>. Acesso em: 6 out. 2025.

SANTOS L.O.F et al. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. **Atmosphere**. 14(3), 426.2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/atmos14030426>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/3/426>. Acesso em: 6 out. 2025.

SOUZA, M, D. et al. Eventos de seca, variabilidade espacial e temporal da chuva no pantanal brasileiro. **Ra'e Ga**. v.63, n.2, p. 136–154. 2025. Doi: <https://doi.org/10.5380/raega.v63i2.99704>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/99704>. Acesso em: 6 out. 2025.

TOMAS, W. M. et al. Sustainability Agenda for the Pantanal Wetland: Perspectives on a Collaborative Interface for Science, Policy, and Decision-Making. **Tropical Conservation Science**. V. 12 , 2019. Doi: [10.1177/1940082919872634](https://doi.org/10.1177/1940082919872634). Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1940082919872634>. Acesso em: 6 out. 2025.

VIDAL-RIVEROS, C. et al. Spatiotemporal analysis of wildfires and their relationship with climate and land use in the Gran Chaco and Pantanal ecoregions. **Science of the Total Environment**, v. 955, 176823, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176823>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969724069808?via%3Dihub>. Acesso em: 6 out. 2025.



WHITNEY, B. S. et al. Millennial-scale fire and climate dynamics in the world's largest tropical wetland show emerging fire threat to flooded ecosystems. **Global and Planetary Change**, v.259, 2026. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2026.105318>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818126000391?via%3Dihub>.

Acesso em: 7 jan. 2026.



Material suplementar 1 – Script das variáveis ambientais

```
// CLIMA ANUAL - ERA5-LAND
// =====
// Área de interesse
var aoi = ee.FeatureCollection('users/daianadias/subcaceres');

// Configurações
var CONFIG = {
  anoInicio: 1985,
  anoFim: 2023,
  escala: 1000,
  pasta: 'Clima_Subcaceres_ERA5_1985_2023'
};
// =====
// Função para calcular estatísticas anuais
// =====
function carregarDadosAno(ano) {
  var start = ee.Date.fromYMD(ano, 1, 1);
  var end = ee.Date.fromYMD(ano, 12, 31);
  var dias = ee.List.sequence(0, end.difference(start, 'day').subtract(1));

  // -----
  // PRECIPITAÇÃO (total, mínima e máxima)
  // -----
  var precipHourly = ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY')
    .filterDate(start, end)
    .select('total_precipitation');
  var precipDaily = ee.ImageCollection.fromImages(
    dias.map(function(d) {
      var dia = start.advance(d, 'day');
      var diaFim = dia.advance(1, 'day');
      return precipHourly.filterDate(dia, diaFim)
        .sum()
        .multiply(1000) // m → mm
        .rename('precip_mm')
        .set('system:time_start', dia.millis());
    })
  );
  var precipTotal = precipDaily.sum().rename('precip_total_mm');
  var precipMin = precipDaily.min().rename('precip_min_mm');
  var precipMax = precipDaily.max().rename('precip_max_mm');
  // -----
  // TEMPERATURA (média, mínima e máxima)
  // -----
  var tempHourly = ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY')
    .filterDate(start, end)
    .select('temperature_2m');
  var tempDaily = ee.ImageCollection.fromImages(
    dias.map(function(d) {
      var dia = start.advance(d, 'day');
      var diaFim = dia.advance(1, 'day');
      return tempHourly.filterDate(dia, diaFim)
        .mean()
        .subtract(273.15) // K → °C
        .rename('temp_C')
        .set('system:time_start', dia.millis());
    })
  );
  var tavg = tempDaily.mean().rename('temp_media_C');
  var tmin = tempDaily.min().rename('temp_min_C');
  var tmax = tempDaily.max().rename('temp_max_C');
  // -----
  // UMIDADE DO SOLO (mínima e máxima)
  // -----
  var soilHourly = ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY')
    .filterDate(start, end)
    .select('volumetric_soil_water_layer_1');

  var soilDaily = ee.ImageCollection.fromImages(
    dias.map(function(d) {
      var dia = start.advance(d, 'day');
      var diaFim = dia.advance(1, 'day');
```



GOVERNO DO ESTADO DE MATO GROSSO
SECRETARIA DE ESTADO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MATO GROSSO – CARLOS ALBERTO REYS MALDONADO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CÁCERES “JANE VANINI”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



```
return soilHourly.filterDate(dia, diaFim)
    .mean()
    .rename('umidade_m3m3')
    .set('system:time_start', dia.millis());
})
);

var umax = soilDaily.max().rename('umidade_max_m3m3');
var umin = soilDaily.min().rename('umidade_min_m3m3');

// -----
// RADIAÇÃO SOLAR (média anual)
// -----
var radHourly = ee.ImageCollection('ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY')
    .filterDate(start, end)
    .select('surface_solar_radiation_downwards');

var radDaily = ee.ImageCollection.fromImages(
    dias.map(function(d) {
        var dia = start.advance(d, 'day');
        var diaFim = dia.advance(1, 'day');
        return radHourly.filterDate(dia, diaFim)
            .sum() // soma horária → diária
            .rename('rad_Jm2_dia')
            .set('system:time_start', dia.millis());
    })
);

var radMean = radDaily.mean().rename('radiacao_media_Jm2dia');

// -----
// Combinar todas as bandas
// -----
return precipTotal
    .addBands([
        precipMin, precipMax,
        tavg, tmin, tmax,
        umin, umax,
        radMean
    ])
    .set('ano', ano);
}

// =====
// Gerar coleção anual e reduzir para a área
// =====
var anos = ee.List.sequence(CONFIG.anoInicio, CONFIG.anoFim);

var imgs = ee.ImageCollection(anos.map(function(a){
    return carregarDadosAno(ee.Number(a));
}));

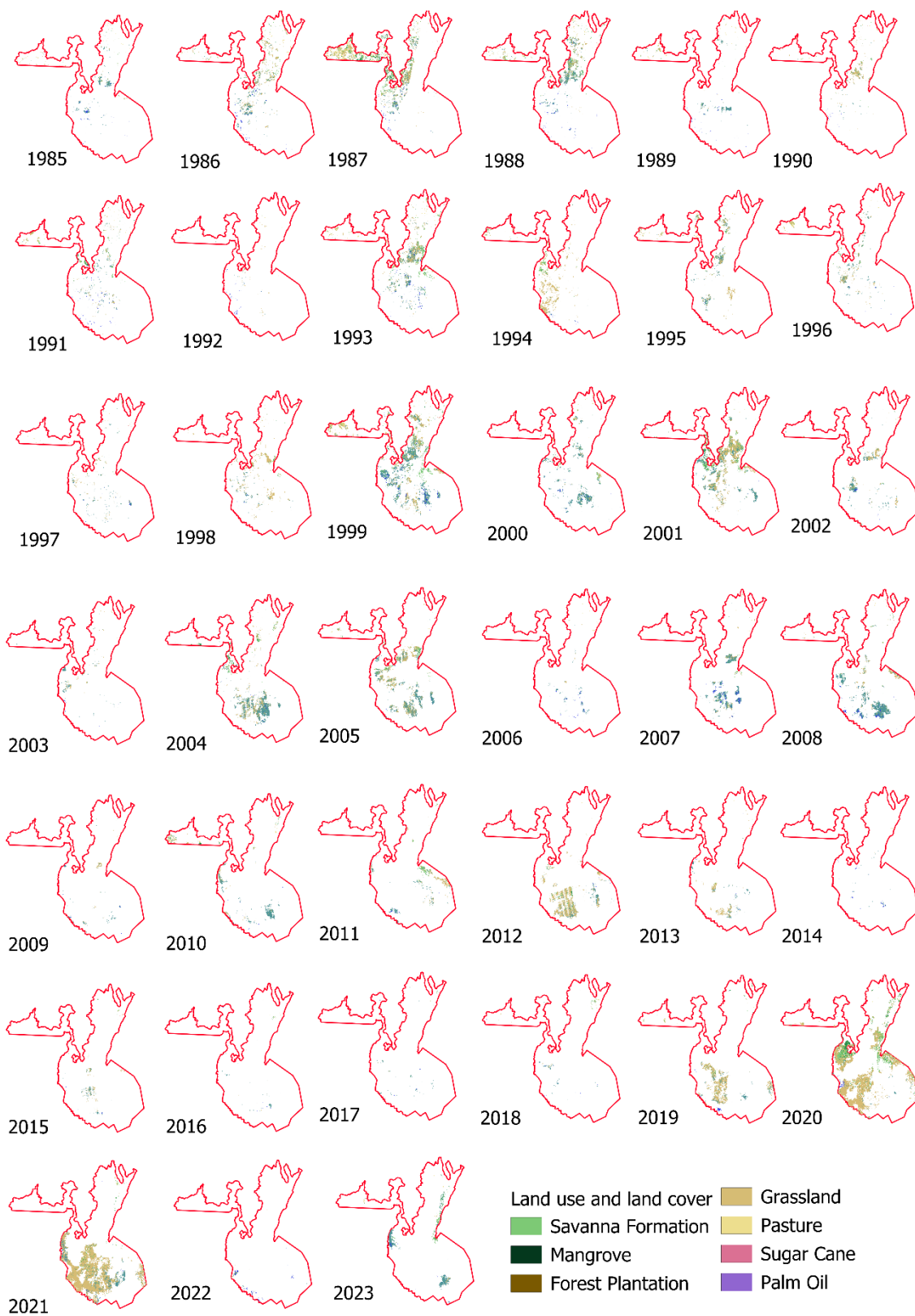
var features = imgs.map(function(img){
    var stats = img.reduceRegion({
        reducer: ee.Reducer.mean(),
        geometry: aoi.geometry(),
        scale: CONFIG.escala,
        maxPixels: 1e13
    });
    return ee.Feature(null, stats.set('ano', img.get('ano')));
});

// =====
// Exportar tabela
// =====
Export.table.toDrive({
    collection: features,
    description: 'Clima_Subcaceres_ERA5_1985_2023',
    folder: CONFIG.pasta,
    fileFormat: 'CSV'
});

print('Exportação iniciada! Verifique no Drive:', CONFIG.pasta);
```



Material suplementar 2 - Distribuição espacial e anual por classe de uso e cobertura na sub-região do Pantanal de Cáceres (1985-2023).





CONSIDERAÇÕES FINAIS GERAIS

Esta dissertação partiu da seguinte pergunta científica: como a configuração da estrutura fundiária e da paisagem, modulada pela hidrologia, controla a suscetibilidade e a magnitude das queimadas na sub-região do Pantanal de Cáceres, para além das variáveis climáticas de larga escala? Para respondê-la, o trabalho teve como objetivo geral analisar de forma integrada a interação entre clima, território rural e paisagem na organização do regime de fogo, com ênfase nos padrões espaciais e temporais das queimadas entre 1985 e 2023.

Os resultados obtidos ao longo dos dois artigos que compõem esta dissertação convergem para um achado central, o fogo no Pantanal de Cáceres não pode ser explicado apenas como resposta direta a extremos climáticos, mas como expressão de um sistema socioecológico em reorganização, no qual o território e a paisagem exercem papel estruturante. O primeiro artigo demonstrou que a estrutura fundiária atua como um elemento organizador da recorrência e da concentração espacial das queimadas. Observou-se uma mudança histórica na distribuição do fogo, marcada pela chamada “inversão das chamas”, na qual as maiores áreas queimadas deixam de estar associadas a pequenas propriedades nas bordas do bioma e passam a se concentrar em grandes imóveis rurais no Pantanal central. Esse deslocamento não é aleatório, mas reflete transformações fundiárias, a retração das áreas alagáveis e a consolidação de práticas produtivas que favorecem a continuidade do combustível vegetal.

O segundo artigo aprofundou essa análise ao destacar que a paisagem funciona como principal mediadora entre clima e área queimada. Os modelos estatísticos indicaram que combinações específicas de classes de uso e cobertura do solo, especialmente campos alagáveis e formações campestres, explicam a maior parte da variação da área queimada, superando a capacidade de variáveis climáticas isoladas e de fenômenos de grande escala, como El Niño e La Niña. Esses resultados reforçam a ideia de que o clima estabelece o contexto de risco, mas é a configuração da paisagem que define a magnitude efetiva das queimadas.

A articulação entre os dois artigos permite avançar para uma interpretação integrada, a estrutura fundiária influencia a organização espacial da paisagem, ao favorecer grandes áreas contínuas de pastagem e formações campestres e reduzir



descontinuidades naturais ao fogo, enquanto a paisagem, por sua vez, traduz as forçantes climáticas em distúrbios ecológicos concretos. Assim, o regime de fogo observado no Pantanal de Cáceres emerge da interação entre decisões territoriais, dinâmica hidrológica e transições ecológicas, e não de um único fator isolado. Essa leitura integrada contribui para deslocar o debate do fogo de uma abordagem predominantemente climática para uma perspectiva territorial e paisagística.

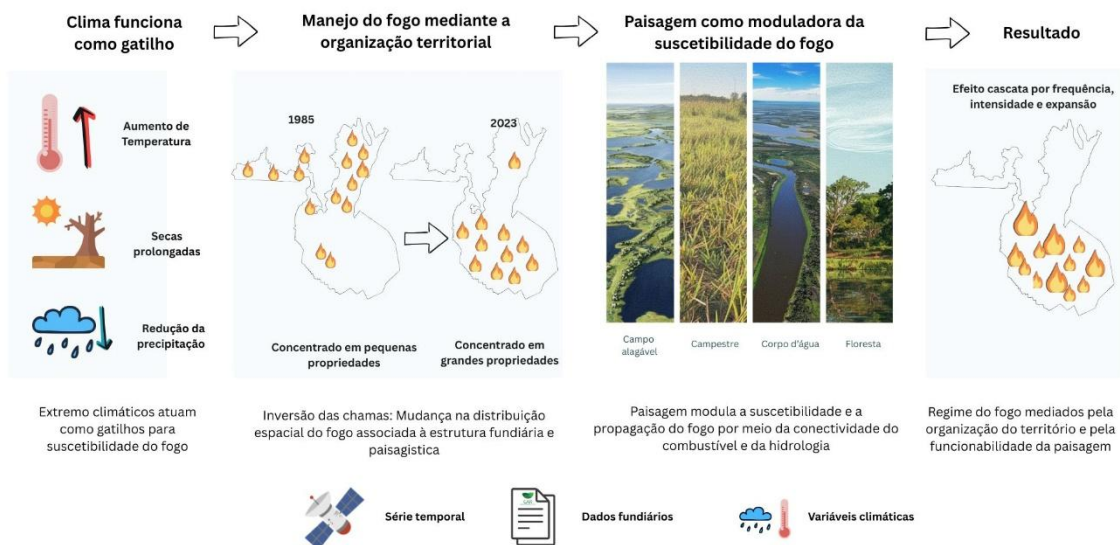
Apesar dos padrões identificados, este estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas. A utilização de dados fundiários atuais para análises retrospectivas impõe restrições à reconstrução precisa da configuração histórica dos imóveis rurais. Além disso, a escala temporal anual, embora adequada para capturar tendências de longo prazo, não permite analisar processos sazonais de ignição e propagação do fogo. Variáveis antrópicas diretas, como o uso intencional do fogo, a presença de aceiros, a densidade de estradas e a atuação local de brigadas, também não foram incorporadas aos modelos, o que pode explicar parte da variabilidade não capturada.

Essas limitações apontam caminhos relevantes para pesquisas futuras. Estudos que integrem dados fundiários históricos, análises em escala intra-anual e informações mais detalhadas sobre práticas de manejo podem aprofundar a compreensão dos mecanismos de ignição e recorrência do fogo. Além disso, a incorporação de indicadores de governança territorial e de políticas públicas permitiria avaliar de forma mais direta a eficácia de instrumentos como o Manejo Integrado do Fogo em diferentes contextos fundiários e paisagísticos.

Como conclusão geral, esta dissertação sustenta que entender o regime do fogo no Pantanal de Cáceres é também compreender como o território é organizado e como a paisagem responde às pressões climáticas e antrópicas. O fogo não surge aqui como um fenômeno neutro ou exclusivamente natural, mas como resultado de escolhas históricas de uso da terra que reconfiguram a paisagem e amplificam vulnerabilidades socioambientais. Ao integrar estrutura fundiária e paisagem em uma mesma estrutura analítica, o estudo oferece uma base científica para repensar estratégias de prevenção, manejo e conservação, contribuindo para a defesa do Pantanal como patrimônio socioecológico cuja resiliência depende da manutenção de sua dinâmica hidrológica, territorial e paisagística.



O fogo no Pantanal de Cáceres: Interação entre clima, território e paisagem



Resumo gráfico dos resultados da dissertação, integração entre o artigo 01 e artigo 02.