

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade

**DETERMINANTES BIÓTICOS E ABIÓTICOS DE ATRIBUTOS  
DO MATERIAL COMBUSTÍVEL EM CAMPOS E SAVANAS DO  
CERRADO**

Waleska Barbosa Ferreira Manzan

Orientador: Vinícius de Lima Dantas

**Uberlândia**

Setembro 2023

WALESKA BARBOSA FERREIRA MANZAN

**DETERMINANTES BIÓTICOS E ABIÓTICOS DE ATRIBUTOS  
DO MATERIAL COMBUSTÍVEL EM CAMPOS E SAVANAS DO  
CERRADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade, para obtenção do título de Mestrado.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius de Lima Dantas

**Uberlândia**

Setembro 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

M296d      Manzan, Waleska Barbosa Ferreira, 1997-  
2023            Determinantes bióticos e abióticos de atributos do material  
                  combustível em campos e savanas do Cerrado [recurso eletrônico] /  
                  Waleska Barbosa Ferreira Manzan. - 2023.

Orientador: Vinícius de Lima Dantas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e  
Biodiversidade.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.8087>

Inclui bibliografia.

1. Ecologia. I. Dantas, Vinícius de Lima, 1982-, (Orient.). II.  
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em  
Ecologia, Conservação e Biodiversidade. III. Título.

CDU: 574

---

André Carlos Francisco  
Bibliotecário - CRB-6/3408



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e  
Biodiversidade

Av. Pará, 1720, Bloco 2D, Sala 26 - Bairro Umuarama, Uberlândia-MG, CEP 38405-320  
Telefone: (34) 3225-8641 - www.ppgeco.ib.ufu.br - ecologia@umuarama.ufu.br



**ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO**

Programa de Pós-Graduação em:	Ecologia, Conservação e Biodiversidade				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, número 327, PPGECEB				
Data:	treze de julho de dois mil e vinte e três	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:20
Matrícula do Discente:	12122ECR014				
Nome do Discente:	Waleska Barbosa Ferreira Manzan				
Título do Trabalho:	Determinantes bióticos e abióticos de atributos combustíveis em campos e savanas do Cerrado				
Área de concentração:	Ecologia				
Linha de pesquisa:	Ecologia de comunidades e biodiversidade				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Fitogeografia de biomas tropicais: ecologia funcional, origem e dinâmica espaciotemporal				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade assim composta pelos doutores: Diego Raymundo Nascimento - Pós-doc INBIO/UFU; Giselda Durigan - Instituto de Pesquisas Ambientais; e Vinícius de Lima Dantas - IGUFU/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Vinícius de Lima Dantas, apresentou a Comissão Examinadora e agradeceu a presença do público e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Diego Raymundo Nascimento, Usuário Externo**, em 01/08/2023, às 13:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Giselda Durigan, Usuário Externo**, em 01/08/2023, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius de Lima Dantas, Professor(a) do Magistério Superior**, em 01/08/2023, às 14:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4571094** e o código CRC **064E8C78**.

---

Dedico esse trabalho ao meu pai Jean, por ser a minha força e sempre me proteger. Você é a minha maior inspiração e o seu carinho e apoio foram essenciais para que eu pudesse chegar até esta etapa da minha vida e alcançar os meus sonhos. Obrigada por sempre acreditar em mim.

Dedico esse trabalho à minha mãe Valéria (in memoriam), por por ter me guiado, me incentivado e por tudo que fez por mim ao longo da sua vida. Minha gratidão é eterna.

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha avó Neide e ao meu avô Rodolpho por me apoiarem e estarem comigo sempre, mesmo sem entender muito bem o porquê de eu estar tão longe agora. Nossa união é muito mais forte do que qualquer distância. Obrigada por tudo e por sempre me acolherem e me receberem em sua casa quando vou fazer uma visita para descansar. Eu amo vocês.

Agradeço ao meu orientador Vinícius, por ter sido uma luz no fim do túnel e ter me estendido a mão quando eu mais precisei e por ter sempre me recebido com muita atenção. Graças a você, tive a oportunidade de realizar um grande sonho meu de conhecer a Serra da Canastra, e viver isso como pesquisadora foi uma experiência única. Obrigada pelos ensinamentos e momentos vividos, você é um grande amigo.

Agradeço às minhas queridas amigas Thamires e Ana Clara por sempre estarem presentes na minha vida, mesmo com a imensa distância entre nós. Vocês são essenciais desde a graduação. Sinceramente, não sei como eu estaria hoje se não fosse o apoio de vocês desde o início dessa história. Este parágrafo é o mínimo que posso fazer para retribuir todo o carinho e força que vocês me dão até hoje. Nunca duvidem do potencial de vocês.

Agradeço aos meus camaradas Lucas, Paulo e Wilson, os três presentes que ganhei nessa nova caminhada. Sou muito grata pela companhia que vocês me fazem e pelos momentos de distração depois de uma semana difícil. Obrigada pelo apoio que me dão e pelo respeito que vocês tem por mim. Essa conquista é nossa.

Agradeço o Laboratório de Macroecologia e Saúde Ambiental (MASA) pela infraestrutura e aos colegas de laboratório Roberta, Karyna, Bruna, Pablo, Bárbara e Murilo pela ajuda com as coletas, com sugestões e com fornecimento de material, agregando ao desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio para a realização deste trabalho e ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade pelo auxílio com as minhas solicitações e pelas oportunidades. Agradeço também ao Instituto de Biologia pelo apoio e ajuda com a realização deste trabalho.

Agradeço a turma 24 do mestrado pelas pessoas que conheci, pelas amizades novas e pela experiência compartilhada durante o curso da pós-graduação.

Agradeço o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) que permitiu que o presente estudo fosse realizado.

E, por fim, agradeço à todos que aqui não foram mencionados, mas que ajudaram e acreditaram em mim durante todo esse processo e que agora podem comemorar essa conquista.

## ÍNDICE

1. RESUMO .....	
2. ABSTRACT .....	
3. INTRODUÇÃO .....	1
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	4
4.1. Área de estudo .....	4
4.2. Desenho amostral .....	5
4.3. Coleta de dados no Campo.....	7
4.4. Métodos de laboratório .....	8
4.5. Análise de dados.....	9
5. RESULTADOS .....	10
5.1. Determinantes bióticos dos atributos combustíveis .....	10
5.2. Determinantes abióticos dos atributos combustíveis.....	12
6. DISCUSSÃO .....	13
7. CONCLUSÃO .....	19
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	20

## RESUMO

Manzan, W. B. F. 2023. Determinantes bióticos e abióticos de atributos do material combustível em campos e savanas do Cerrado. Dissertação de Mestrado em Ecologia, Conservação e Biodiversidade. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG. 18p.

O fogo é um direcionador chave da estrutura e funcionamento das savanas tropicais. As características do material combustível superficial determinam, em grande parte, o comportamento do fogo nessas comunidades, sendo estas influenciadas por fatores bióticos e abióticos. Dentre as variáveis bióticas, o tipo, a biomassa, a densidade a altura e o conteúdo de água do material combustível são determinantes dos regimes de fogo e, assim, de seu impacto no ecossistema. O presente estudo tem como objetivo entender as interrelações entre os atributos do material combustível e de que forma esta responde às condições ambientais e ao histórico de queimadas. As hipóteses testadas foram de que os atributos do material combustível são determinados tanto por fatores bióticos (isto é, os atributos estão interrelacionados entre si) como abióticos (textura do solo, incidência luminosa, clima e histórico de queimadas) e de que a variação espacial em tais atributos explica o histórico de queimadas. O presente estudo foi realizado no Parque Nacional da Serra da Canastra – MG, onde foram feitas coletas em 31 parcelas distribuídas em 5 diferentes classes de solo. Nestas coletas foram determinados os seguintes atributos do material combustível: tipo (composição do estrato herbáceo), altura média, continuidade, biomassa, densidade aparente e conteúdo de água. Também foram coletadas amostras de solo para análises físicas, e registradas as coordenadas geográficas para a obtenção de dados de histórico de fogo, cobertura arbórea, clima e topografia. Para testar as interrelações entre os atributos do material combustível foi utilizado um teste de correlação de Pearson e uma análise de componentes principais, e para entender seus determinantes abióticos e históricos usamos modelos lineares generalizados. Atributos do material combustível como densidade aparente, biomassa, continuidade, conteúdo de água e cobertura do solo por dicotiledôneas (incluindo serapilheira) apresentaram correlação positiva entre si. Os fatores que melhor explicaram a variação na continuidade e na altura do material combustível foram o conteúdo de argila do solo e o tempo desde a última queimada. Este último fator também se relacionou positivamente ao conteúdo de água do material combustível. A cobertura arbórea (NDVI) se relacionou positivamente com a cobertura do solo por dicotiledôneas e serrapilheira e negativamente com a altura

do material combustível. A precipitação média apresentou correlação positiva com a continuidade do material combustível ao passo que a estacionalidade da precipitação apresentou relação negativa com a altura dos combustíveis. O atributo do material combustível que melhor explicou a frequência de incêndios foi a densidade aparente a qual, junto à precipitação média anual, explicou 83% da variação na frequência de fogo nas parcelas. Os resultados evidenciaram que os atributos do combustível são influenciados pelas condições ambientais e, influenciam, por sua vez na ocorrência de queimadas e no comportamento do fogo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inflamabilidade, fogo, combustível, savana, queimadas, cerrado.

## **ABSTRACT**

Manzan, W. B. F. 2023. Drivers of fuel traits in grasslands and savanas of Cerrado. Master's thesis. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia – MG. 18p.

Fire is a key driver of the structure and composition of plant communities in tropical savannas. Surface fuel traits are important determinants of fire behavior in these communities and variation in these traits is influenced by both biotic and abiotic drivers. Fuel type, biomass, bulk density, height and moisture are essential fuel traits determining fire regimes and their impacts on savanna ecosystems. In this study, we analyzed the spatial variation in fuel traits, how they are intercorrelated and respond to environmental conditions and fire history. We also studied how they contribute to explain fire frequency in grasslands and savannas. We tested the hypothesis that fuel traits are determined by biotic factors (fuel traits are intercorrelated) and abiotic factors (vary in response to soil texture, vegetation cover, climate and fire history). We also hypothesized that spatial variation in fuel traits helps us to understand fire history in savanna landscapes. The present study was conducted in the Serra da Canastra National Park (SCNP), Brazil. We collected samples in 31 plots in 5 different soil classes and analyzed the following fuel traits: type (ground-layer cover composition), mean height, continuity, biomass, bulk density and moisture. In each plot, soil samples were collected for physical analysis. We also collected fire history, climate and topography data using the geographical coordinates of the plots. To test for correlations among fuel traits, we used a Pearson correlation test and a principal component analysis, and for abiotic factors we used generalized linear models. Fuel traits, such as bulk density, biomass, continuity, moisture content and ground-layer cover by dicotyledons (including leaf litter) were positively intercorrelated. The variation in fuel height and continuity was explained by soil clay content and time since the last fire (positive correlation). This last factor also predicted fuel moisture content. Tree cover was positively correlated to dicotyledons and leaf litter ground-layer cover and was negatively correlated to fuel height. Mean annual precipitation showed a positive correlation to fuel continuity whereas rainfall seasonality showed a negative correlation to fuel height. Fire frequency was explained by fuel bulk density and mean annual precipitation (both associations were positive), explaining 83% of fire frequency variation in these plots. Our results demonstrated that fuel traits and environmental conditions show strong control over fire regimes and vary predictability in space.

**KEYWORDS:** Flammability, fuel traits, savanna, cerrado.

## **Introdução**

O fogo é um fator ecológico importante para a manutenção, equilíbrio e estruturação de diversos ecossistemas e é considerado uma das maiores forças evolutivas nas comunidades vegetais. Além disso, o fogo desempenha uma função essencial na distribuição de biomas, causando impactos na composição de espécies, na estrutura e no funcionamento da vegetação (Pyne, 1997; Morgan, *et al.*, 2001; Hoffman, *et al.*, 2012; Newberry, *et al.*, 2020). Ademais, os regimes de incêndios fazem com que muitas plantas evoluam traços adaptativos que permitem sua reprodução e sobrevivência pós-fogo, como germinação e floração estimulada pelo fogo, além de outras características morfológicas de resistência, como a capacidade de rebrotar, folhas pouco inflamáveis e cascas espessas (Hoffmann, *et al.*, 2012; Brando, *et al.*, 2012).

Quase todos os tipos de vegetação do mundo estão sujeitos a algum regime de fogo. Esses regimes são responsáveis pela caracterização de ecossistemas propensos a incêndios e são descritos pela frequência, estação, intensidade e tipo de fogo (ex. de superfície ou de copa) (Gill, 1975). A determinação dessas características é, por sua vez, dependente de características como umidade e distribuição espacial do material combustível (Biswell, 1989). Plantas individuais e vegetações inteiras possuem graus de inflamabilidade, onde um grupo de atributos podem influenciar no comportamento do fogo (e.g., intensidade do fogo, taxa de propagação, a altura das chamas, o tempo de queima e temperatura da superfície) e nas consequências do impacto do fogo na vegetação (Williams, *et al.*, 1998; Savadogo, *et al.*, 2007; Fontaine, *et al.*, 2012, Pausas, *et al.*, 2017). O comportamento do fogo e a inflamabilidade ao nível de comunidade são influenciados por características do material combustível como tipo, a umidade, altura e biomassa combustível, os quais determinam sua propensão a queima. Atributos do material combustível, dependem de fatores bióticos, como as características da vegetação (e.g. tipo de cobertura do solo), abióticos, como o clima, o tempo e a incidência luminosa e, históricos, como o histórico de queima. Esses fatores podem estar interrelacionados entre si, de modo que, todos eles serão determinantes das características do material combustível. (Bradstock, *et al.*, 2010; Cardoso, *et al.*, 2018)

Algumas comunidades vegetais são consideradas inflamáveis e dependentes do fogo, como as savanas tropicais (Bond e Keeley, 2005; Pausas e Keeley, 2009). As savanas apresentam um estrato herbáceo-arbustivo contínuo e elementos arbóreos esparsos, sendo um dos tipos de vegetação mais propensos a ocorrência de fogo (Scholes e Hall, 1996; Mouillot e Field, 2005; Simpson, *et al.*, 2022). Esses ecossistemas são

caracterizados por incêndios de superfície, de maneira que atributos do estrato-herbáceo são um determinante chave da inflamabilidade e, assim, dos regimes de incêndios (Bailey e Anderson, 1980; Simpson, *et al.*, 2022). Por exemplo, estudos mostram que a biomassa de combustíveis finos, especialmente de gramíneas, é um importante determinante dos componentes da inflamabilidade, como a combustibilidade (taxa de queima do material), ignitabilidade (propensão a iniciar um incêndio), sustentabilidade (tempo de sustento da queima) e consumabilidade (proporção do combustível consumida) (Pausas, *et al.*, 2016; Newberry, *et al.*, 2020).

Quanto aos regimes de fogo, a frequência e intensidade dos incêndios variam de acordo com interações complexas entre clima, vegetação e do manejo da paisagem (Simpson, *et al.*, 2022). Sob condições naturais, os principais determinantes dos regimes de fogo em sistemas savânicos são, por um lado a sazonalidade da precipitação, com maior inflamabilidade em climas onde é possível observar uma estação do ano seca e outra chuvosa tendem a queimar mais frequentemente, e, por outro, os atributos do material combustível superficial (Archibald, *et al.*, 2009; Takacs, *et al.*, 2021). A estacionalidade influencia escalas maiores, de grandes regiões (e.g. biomas), e os atributos do material combustível influenciam a escala local, ao longo de uma paisagem. Além disso, quando o clima é suficientemente sazonal para que incêndios sejam frequentes, a frequência de fogo em savanas tende a aumentar com o aumento na precipitação média anual (Bernardino, *et al.*, 2021). Considerando a importância dos atributos do material combustível como determinantes dos regimes de fogo a escala local, compreender seus determinantes espaciais é de fundamental importância para fazer previsões sobre de que forma incêndios vão impactar diferentes ecossistemas (Simpson, *et al.*, 2022).

Atributos do material combustível, ao mesmo tempo, influenciam e são influenciados pelo histórico de fogo. Em ecossistemas inflamáveis, como as savanas tropicais, a cobertura e a biomassa de gramíneas são alguns dos principais determinantes da inflamabilidade e, conseqüentemente, do comportamento do fogo (Bond, 2008; Hoffmann, *et al.*, 2012; Pausas e Ribeiro, 2013). Incêndios, por sua vez, reduzem ou limitam o desenvolvimento da cobertura arbórea, o que favorece a expansão de gramíneas inflamáveis, dada a frequente intolerância à sombra destas (D'Odorico, *et al.*, 2006). Por outro lado, o aumento na densidade de árvores resulta na diminuição na cobertura por espécies de gramíneas C4 (que, por serem intolerantes ao sombreamento, não resistem e são excluídas do sistema), aumentando, assim, a cobertura por serapilheira (Prior, *et al.*,

2017). As gramíneas geram um tipo de combustível mais inflamável e o qual é consumido rapidamente, produzindo incêndios de maior intensidade, temperatura e velocidade de propagação, porém de curta duração, quando comparados aos de serrapilheira (Simpson, *et al.*, 2016; Prior, *et al.*, 2017).

As características do fogo e os atributos relacionados com a inflamabilidade são, também, fortemente influenciados por propriedades do material combustível. Essas propriedades são a altura do material combustível (que é um preditor da intensidade dos incêndios), a densidade aparente do material combustível (influenciando na intensidade e temperatura do fogo) (Burger e Bond, 2015; Gao e Schwilk, 2022), a continuidade do material combustível (o fogo só se espalha se o combustível estiver bem conectado horizontalmente) (Cornwell, *et al.*, 2015; Prior, *et al.*, 2017; Cardoso, *et al.*, 2022) e a umidade do material combustível (que diminui a ignitabilidade e a probabilidade que o fogo se espalhe) (Behm, *et al.*, 2004; Alessio, 2008; Simpson, *et al.*, 2016; Alam, *et al.*, 2020; Kraaij, 2022). Além disso, já se sabe que variáveis como a biomassa de gramíneas e a densidade aparente do material combustível são importantes preditores da inflamabilidade em savanas (Newberry, *et al.*, 2020). Sabe-se, também, que o sombreamento é um fator determinante de vários desses indicadores de inflamabilidade, onde o efeito da sombra determina a distribuição das espécies vegetais, gerando heterogeneidade do material combustível (Pilon, *et al.*, 2020; Gao e Schwilk, 2022). No entanto, não sabemos em que medida fatores geográficos, como as características do solo, topográficas e climáticas, e fatores bióticos, como a composição do estrato herbáceo, influenciam atributos combustíveis. De uma forma geral, acredita-se que solos mais férteis e climas mais úmidos tendem a favorecer o adensamento arbóreo e a supressão de gramíneas (Hoffman, *et al.*, 2012; Newberry, *et al.*, 2020). Nesse sentido, espera-se que a inflamabilidade diminua sob uma maior disponibilidade de recursos, via aumento na cobertura arbórea e arbustiva. No entanto, gramíneas também podem aumentar sua produtividade sob maior disponibilidade de recursos, o que poderia gerar incêndios mais frequentes e intensos, especialmente se algum outro fator limitar a cobertura arbórea. Em que medida a variação espacial na distribuição de recursos influencia o comportamento do fogo em comunidades ainda é pouco conhecido. Tal conhecimento pode auxiliar na compressão da distribuição de vegetações sensíveis ao fogo ao longo da paisagem.

Na América do Sul, principalmente no Brasil, a presença de fogo é documentada no bioma Cerrado há pelo menos 32 mil anos (Coutinho, 1982; Miranda, *et al.*, 2004). No entanto, estudos baseados em métodos moleculares estimam que a diversificação de

espécies vegetais do Cerrado, caracterizadas por adaptações chave para resistir ao fogo, ocorreu a cerca de 3 milhões de anos, em várias linhagens, indicando uma presença mais antiga do fogo nas savanas sul-americanas (Simon, *et al.*, 2009). As savanas apresentam clima com duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, que abrange um gradiente de fitofisionomias tipicamente savânicas, que se distinguem pela composição da cobertura do estrato herbáceo, composto por gramíneas, herbáceas e lenhosas e pequeno porte, formando diferentes tipos de combustíveis (Filgueiras, 2002; Meirelles, *et al.*, 2002; Munhoz, 2004; Giroldo, 2016), e que vão apresentar diferentes graus de inflamabilidade.

O presente estudo tem como objetivo avaliar em que medida atributos do material combustível relacionados à inflamabilidade estão relacionados entre si e são determinados por fatores geográficos e históricos. Testamos a hipótese de que as diferentes dimensões da inflamabilidade estão positivamente correlacionadas por meio dos atributos do material combustível e que estes variam de forma determinística no espaço, sendo influenciados pela variação climática, edáfica e o histórico de incêndios. Esperamos que os atributos do material combustível associados a uma maior inflamabilidade se mostrem positivamente relacionados à presença de gramíneas, com a produtividade do ecossistema (solos mais argilosos e climas mais úmidos) e com o tempo desde a última queimada, e diminuirão com a cobertura arbórea. Esperamos também que a variação espacial no clima e nos atributos do material combustível, como a densidade aparente e a continuidade do material combustível, ajudem a explicar a variação na frequência de incêndios em campos e savanas.

## **Material e métodos**

### *Área de Estudo*

O presente estudo foi conduzido no Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), em Minas Gerais, Brasil (20° 20' 58" S, 46° 38' 18" O). O Parque foi criado em 3 de abril de 1972, por meio do Decreto nº 70.355 e está situado no bioma Cerrado, ocupando uma área de 50.000 hectares (Vasconcelos, *et al.*, 2015). Ele se situa no divisor de águas dos rios São Francisco e Paraná, dois dos mais importantes cursos d'água do Brasil. O parque é caracterizado por áreas de chapada, delimitadas por escarpas íngremes, e separadas por um grande vale. As chapadas do Parque apresentam altitudes que variam entre 778 e 1464 m (IBGE, 2002) e, segundo dados da base de dados do WorldClim

(dados de 1970 a 2000; Fick e Hijmans, *et al.*, 2017), o Parque apresenta precipitação média anual de 1638 mm e temperatura média anual de 18,7°C, tendo períodos secos no inverno, de maio a setembro, e verões chuvosos de outubro a abril. A estrutura de vegetação é caracterizada sobretudo por fitofisionomia campestre, com manchas de florestas e cerrado *sensu stricto* (savana típica). O PNSC é formado por três grandes platôs: Negra, Babilônia e Canastra (Vasconcelos, *et al.*, 2015). Por questões logísticas e práticas, o estudo foi conduzido apenas no platô Canastra. Os regimes de fogo no Parque são caracterizados por queimadas naturais frequentes, em larga escala, ocorrendo geralmente durante a estação seca em rotação bienal (Batista, *et al.*, 2018). Além disso, o Parque já adota o “Manejo Integrado do Fogo” desde 2017, onde são realizadas queimas prescritas durante o período chuvoso, como ferramenta para criação de mosaicos, diminuindo a homogeneidade da paisagem e restringindo a ocorrência de grandes incêndios e a propagação do fogo (ICMBio, 2023).

#### *Desenho Experimental*

Utilizando mapas das principais estradas do platô da Canastra, delimitamos áreas a uma distância de até 200 m das estradas, usando ferramentas de geoprocessamento (pacote “raster” do R). Dentro dessas áreas, determinamos os tipos de solos existentes usando o mapa de solos do Estado de Minas Gerais (UFV – CETEC – UFLA – FEAM, 2011). Foram identificadas cinco classes de solo (Neossolos, Latossolos, Planossolos, Cambissolos e uma classe contendo Afloramento Rochoso, Cambissolo Haplíco e Neossolo Litólico). Em seguida, 31 pontos foram sorteados seguindo uma amostragem aleatória estratificada: 6 pontos sorteados aleatoriamente dentro de cada classe de solo (7 para Planossolo).

Tabela 1: Coordenadas geográficas, classes de solo e fitofisionomias de cada ponto de coleta.

<b>Parcela</b>	<b>Longitude</b>	<b>Latitude</b>	<b>Classe Solo</b>	<b>Fitofisionomia</b>
1	-46:48:31.8	-20:08:11.4	Afloramento rochoso	Campo sujo
2	-46:39:52.8	-20:10:47.5	Afloramento rochoso	Campo sujo
3	-46:46:18.4	-20:08:18.4	Cambissolo	Campo limpo
4	-46:49:13.6	-20:09:10.6	Afloramento rochoso	Campo sujo

5	-46:42:42.6	-20:09:45.5	Afloramento rochoso	Campo limpo
6	-46:54:26.8	-20:08:23.9	Afloramento rochoso	Campo limpo
7	-46:53:55.9	-20:08:40.3	Afloramento rochoso	Cerrado sensu stricto
8	-46:52:06.5	-20:08:16.7	Afloramento rochoso	Campo sujo
9	-46:55:23.8	-20:08:12	Latossolo	Cerrado sensu stricto
10	-46:52:15.9	-20:08:40.1	Latossolo	Campo sujo
11	-46:55:01.1	-20:08:15.1	Latossolo	Campo limpo
12	-46:47:45.8	-20:08:34.6	Latossolo	Campo limpo
13	-46:52:42.2	-20:08:35.5	Latossolo	Campo sujo
14	-46:48:06.8	-20:08:32.5	Latossolo	Campo limpo
15	-46:37:02.7	-20:13:51.6	Plintossolo	Campo sujo
16	-46:36:52.6	-20:13:48.1	Plintossolo	Campo limpo
17	-46:36:47.2	-20:13:53.1	Plintossolo	Campo limpo
18	-46:35:29.2	-20:14:16	Plintossolo	Campo limpo
19	-46:34:34.4	-20:14:41.9	Plintossolo	Campo limpo
20	-46:34:22.1	-20:14:57.1	Plintossolo	Campo limpo
21	-46:34:33	-20:11:59.4	Neossolo	Cerrado sensu stricto
22	-46:28:18.1	-20:13:16.4	Neossolo	Campo limpo
23	-46:26:05.7	-20:15:12.1	Neossolo	Campo limpo
24	-46:27:05.4	-20:13:34.3	Neossolo	Campo limpo
25	-46:31:55.5	-20:14:41.6	Neossolo	Campo sujo
26	-46:46:36.9	-20:08:18.7	Cambissolo	Campo sujo
27	-46:37:53.4	-20:10:38.4	Neossolo	Campo sujo
28	-46:46:11.1	-20:08:32.6	Cambissolo	Campo sujo
29	-46:45:57.9	-20:08:24.12	Cambissolo	Campo limpo
30	-46:37:28.3	-20:10:01	Cambissolo	Campo sujo

31	-46:37:30.3	-20:10:16.9	Cambissolo	Campo sujo
----	-------------	-------------	------------	------------

### *Coleta de dados no Campo*

Entre os dias 2 e 9 de outubro de 2021, os pontos sorteados foram localizados no campo utilizando um GPS. Nos locais de coleta, foi delimitada uma parcela de 10 x 10m e, em cada um dos cantos dentro da parcela, foi delimitada uma subparcela de 0,50 x 0,50 m. Nessas subparcelas, foi coletada toda a biomassa combustível na superfície do solo, sendo, assim, coletadas 4 amostras por parcela. As amostras foram armazenadas em sacos de papel para determinação da massa úmida e seca. Quando indivíduos lenhosos com mais de 1 cm de diâmetro (a altura do solo) ou mais que um metro de altura ocorriam nos cantos das parcelas, as parcelas foram alocadas de forma a excluí-los da amostragem.

As parcelas de 10 x 10 m foram posicionadas obedecendo o sentido do declive, ou seja, com duas arestas paralelas, e duas arestas perpendiculares ao sentido do declive. Aproximadamente dois metros de cada uma das duas das arestas paralelas ao declive, foi lançada, no interior da parcela, uma subparcela de 1 x 1 m. Esta, por sua vez, era subdividida em 4 quadrantes de 0,25 m<sup>2</sup> nos quais foi observado o tipo de material cobrindo o solo. Especificamente, foi estimado, por visualização, a porcentagem de cobertura dos seguintes componentes: gramíneas, arbustos, herbáceas, serapilheira, afloramento rochoso, cascalho e solo exposto. Além disso, foram feitas dez medidas com prato medidor de pastagens (Rayburn e Lozier, 2003) no interior da parcela de 10 x 10 m (excluindo os locais das subparcelas) para determinar a altura (comprimida pelo peso do prato) do material combustível.

Para análise de determinantes abióticos, foram realizadas coletas de amostras de solo. As amostras de solo foram coletadas nos quatro cantos e no centro de cada parcela (5 sub-amostras), em uma profundidade de até 5 cm, após a remoção da serapilheira. As amostras foram misturadas em um saco plástico, sendo, assim, uma amostra composta por parcela (31 amostras, no total). O material coletado foi submetido a análise física em laboratório para determinação dos percentuais da massa de argila, silte e areia. Além disso, foi registrada a classe fitofisionômica da vegetação no local e se havia vestígios de incêndios recentes.

### *Métodos de Laboratório*

Com base nas medidas feitas no campo foram calculadas as seguintes características do material combustível superficial, como indicadores da inflamabilidade da comunidade: biomassa, umidade, altura comprimida, continuidade, densidade aparente e tipo de material combustível superficial. Para o cálculo da biomassa e da umidade do combustível superficial por parcela, efetuou-se, após a coleta, a pesagem das quatro sub-amostras de biomassa. As amostras foram então secas em estufa a 80°C por 48h. A umidade do material combustível ao nível de parcela foi calculada como a média percentual da diferença entre a massa úmida e seca para cada sub-amostra. A biomassa de material combustível foi calculada como a média da biomassa seca nas quatro subparcelas. A altura comprimida do combustível superficial foi calculada como a média das dez medidas com disco de queda. Para calcular a continuidade do material combustível, primeiramente, foi calculado, para cada quadrante da subparcela de 1 x 1 m, a soma do percentual de cobertura do solo que consistia em material combustível vegetal (gramíneas, arbustos, herbáceas, serapilheira). Em seguida, foi calculada a média para os oito quadrantes (4 quadrantes por subparcela). A densidade aparente do combustível consiste em dividir a massa média de biomassa pelo volume que ela ocupa. A densidade aparente foi calculada como  $400 \times$  biomassa seca, em gramas, dividido pela altura, estimada como a altura média das dez medidas com o prato de queda. Finalmente, para a variável tipo de combustível foram utilizados os dois primeiros eixos de uma Análise de Componentes Principal (PCA) sobre as médias de cobertura gramíneas, arbustos, herbáceas e serapilheira, já que essas variáveis eram frações da cobertura total, não sendo, portanto, independentes entre si.

Com base nas coordenadas geográficas de cada parcela, foram obtidos dados de frequência de fogo, clima e cobertura vegetal. Para a cobertura vegetal, foram obtidas imagens do satélite Landsat 8 (30 m de resolução espacial), dos dias 07 e 14 de setembro de 2021 (imagens sem nuvens mais próximas ao início de início das coletas), a partir das quais foi calculado os valores do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), do pixel contendo a coordenada da parcela, como um indicador equivalente da incidência luminosa. As variáveis climáticas utilizadas foram temperatura e precipitação média anual e estacionalidade da precipitação, tendo sido extraídas da base de dados WorldClim2 (1 km de resolução espacial; dados climáticos de 1970 a 2000; Fick e Hijmans, *et al.*, 2017). Dados de frequência de incêndios e de tempo desde a última

queimada (em anos) foram obtidos da base de dados MapBiomas (<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>; Souza, *et al.*, 2020; He e Lamont, 2018), a qual tem como base cicatrizes de incêndios em imagens Landsat entre os anos de 1985 e 2020. Para o tempo desde a última queimada, utilizou-se também os registros feitos em campo. As parcelas com evidência de campo de incêndio recente foram definidas como estando a zero anos sem queimar.

#### *Análise dos dados*

Para analisar as interações entre os atributos do material combustível, foram feitas correlações de Pearson. Também foi utilizada uma Análise de Componentes Principais para acessar essas correlações de uma perspectiva multivariada. Para analisar a existência de algum efeito das variáveis abióticas (solo, clima, histórico de incêndio) e da cobertura arbórea (NDVI) sobre os atributos do material combustível foram usadas regressões com cada atributo do material combustível como variável resposta e as seguintes variáveis como preditoras: precipitação média anual, sazonalidade da precipitação, temperatura média anual, conteúdo de argila no solo, frequência de queimada e tempo desde a última queimada. Para as variáveis descritoras do material combustível como altura, biomassa seca, densidade aparente, conteúdo de água e continuidade, isto é, as variáveis cujos valores são sempre positivos, foram utilizados modelos lineares generalizados com a família “quasipoisson”. Já para os tipos de combustíveis, por serem eixos de uma análise de componentes principais, assumem valores negativos e positivos e, portanto, foram utilizados modelos lineares simples. Para testar a existência de algum efeito das variáveis bióticas na variação nas frequências históricas de fogo no parque, utilizamos modelos lineares generalizados, com frequência de fogo como variável resposta, e variáveis climáticas e combustíveis como variáveis explanatórias, e família “quasipoisson”.

O método da seleção reversa foi utilizado para simplificação de modelos. Antes de tal procedimento foram feitos testes de correlação entre as variáveis preditoras e quando duas variáveis apresentaram correlação acima de  $|0.70|$ , procedimentos de seleção de modelos separados foram feitos para cada uma das variáveis correlacionadas, sendo escolhido como melhor o modelo com menor desvio residual. Em todas as análises os resíduos foram testados para presença de autocorrelação espacial usando o teste de Moran. Quando uma autocorrelação espacial significativa foi encontrada, utilizou-se o diagnóstico do multiplicador de Lagrange para dependência espacial para selecionar entre

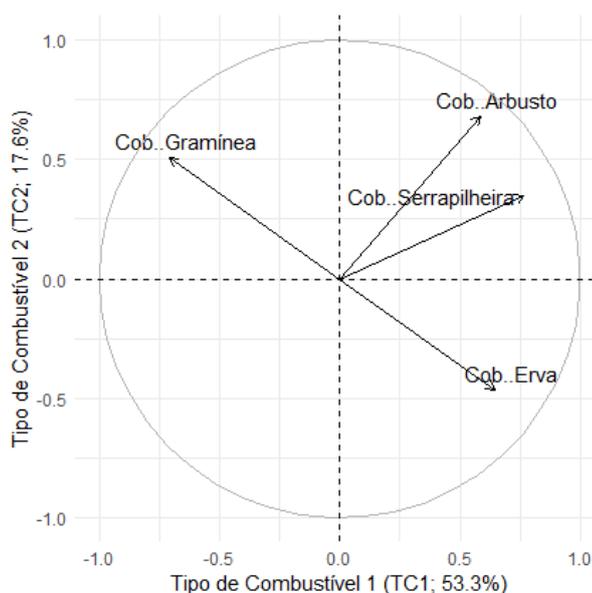
modelo espacial autorregressivo simultâneo de erro ou de defasagem (lag) utilizando-se, em seguida, o modelo indicado para a regressão com as previamente selecionadas. Todas as análises foram realizadas no programa RStudio, versão 4.1.2 (R Core Team 2021), usando os pacotes “effectsize”, “FactoMineR”, “lmtest”, “olsrr”, “parameters”, “raster”, “rgeos”, “rsq”, “spatialreg” e “spdep”.

## Resultados

### *Determinantes bióticos dos atributos do material combustível*

Os resultados da Análise de Componentes Principais (PCA) usada para obter as variáveis Tipo de Combustível 1 e 2 são mostrados na Figura 1. O primeiro eixo da PCA (Tipo de Combustível 1) explicou 53,3% da variação e foi positivamente relacionado à cobertura por dicotiledôneas e sua serapilheira e negativamente relacionado à cobertura por gramíneas. O segundo eixo (Tipo de Combustível 2) explicou 17,6% da variação e esteve positivamente correlacionado com a cobertura por arbustos e gramíneas e negativamente relacionado à cobertura por ervas não graminóides.

Figura 1: Resultado da Análise de Componentes Principais usada para criar as variáveis Tipo de Combustível 1 e 2.



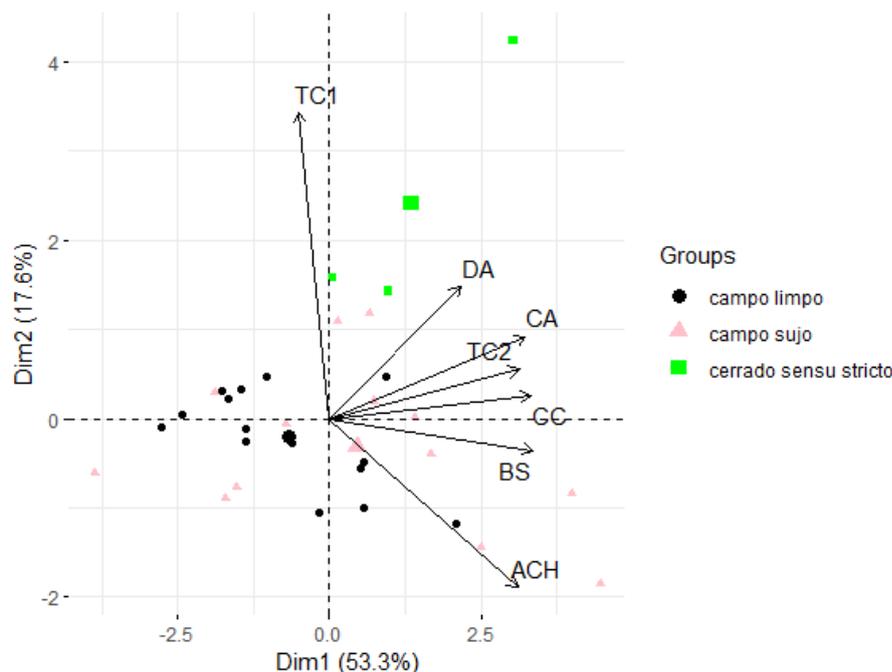
Os resultados dos testes de correlações entre os atributos do material combustível estão apresentados na Tabela 1. Essas correlações, bem como suas relações com as diferentes fitofisionomias amostradas também podem ser visualizadas na Figura 2. Tipo de Combustível 1 apresentou correlação negativa apenas com a variável altura do material combustível superficial ( $r = -0,38$ ;  $p = 0,033$ ). Tipo de combustível 2, apresentou correlação positiva com o conteúdo de água do material combustível ( $r = 0,67$ ,  $p < 0,001$ ) e com a continuidade do material combustível ( $r = 0,71$ ,  $p = 0,011$ ). A continuidade do combustível foi positivamente correlacionada com a altura do material combustível superficial ( $r = 0,70$ ,  $p = 0,011$ ), com a biomassa seca ( $r = 0,68$ ;  $p = 0,027$ ) e com o tipo de combustível 2 ( $r = 0,71$ ,  $p < 0,011$ ). A biomassa seca e a altura do material combustível superficial também apresentaram relação positiva significativa ( $r = 0,73$ ,  $p = 0,003$ ). A densidade aparente do material combustível apresentou correlação positiva com biomassa seca ( $r = 0,58$ ,  $p = 0,001$ ), e com conteúdo de água ( $r = 0,58$ ,  $p = 0,001$ ).

Tabela 2: Correlações entre características do material combustível.

	ACH	BS	CC	TC1	TC2	CA	DA
<b>Altura do componente herbáceo (ACH)</b>		<b>0,00</b> 3	<b>0,01</b> 1	<b>0,03</b> 3	<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	0,46 0
<b>Biomassa seca (BS)</b>	<b>0,73</b>		<b>0,02</b> 7	0,47 0	<b>0,002</b>	<b>0,001</b>	<b>0,00</b> 1
<b>Continuidade do material combustível (CC)</b>	<b>0,70</b>	<b>0,68</b>		0,64 0	<b>&lt;0,00</b> 1	<b>&lt;0,00</b> 1	0,15 6
<b>Tipo de combustível 1 (TC1)</b>	<b>-0,38</b>	- 0,13	0,09		1	0,973	0,98 4
<b>Tipo de combustível 2 (TC2)</b>	<b>0,50</b>	<b>0,54</b>	<b>0,71</b>	0		<b>&lt;0,00</b> 1	0,09 3
<b>Conteúdo de água (CA)</b>	<b>0,50</b>	<b>0,55</b>	<b>0,59</b>	- 0,01	<b>0,67</b>		<b>0,00</b> 1
<b>Densidade aparente (DA)</b>	0,14	<b>0,58</b>	0,27	0,01	0,31	<b>0,58</b>	

r de Pearson apresentados abaixo e valores de P acima da diagonal. Correlações significativas apresentadas em negrito. A altura do componente herbáceo (ACH), biomassa seca (BS) e continuidade do material combustível (CC) apresentaram correlação positiva entre si e o tipo de combustível 2 (TC2) apresentou correlação positiva com a continuidade do material combustível e com o conteúdo de água (CA). A densidade aparente do material combustível (DA) se correlacionou positivamente com a biomassa seca e com o conteúdo de água. O tipo de combustível 1 (TC1) não apresentou correlação significativa com nenhuma das variáveis analisadas.

Figura 2: Gráfico de ordenação mostrando Análise de Componentes Principais relacionando os diferentes atributos do material combustível superficial em 31 parcelas. O gráfico apresenta as parcelas separadas por fitofisionomia. Para legenda dos atributos combustíveis, ver Tabela 1.



#### *Determinantes abióticos dos atributos do material combustível*

Uma relação positiva significativa foi observada entre a continuidade do material combustível e a proporção de argila no solo, a precipitação média anual e o tempo desde a última queimada (pseudo- $R^2 = 0,53$ ;  $F = 8,87$ ;  $P < 0,001$ ; Tabela 2). A argila no solo também favoreceu a cobertura do solo por gramíneas e arbustos em detrimento das ervas (ver tipo de combustível 2;  $R^2_{adj} = 0,44$ ;  $F = 8,17$ ;  $P < 0,001$ ; Tabela 2; Figura 1) e a acumulação de biomassa (pseudo- $R^2 = 0,13$ ;  $F = 5,29$ ;  $P = 0,033$ ; Tabela 2). A altura do material combustível superficial, além de positivamente relacionada ao conteúdo de argila, também apresentou correlação positiva com o tempo desde a última queimada e uma relação negativa significativa com o NDVI e com a estacionalidade da precipitação (pseudo- $R^2 = 0,62$ ;  $F = 8,97$ ;  $P < 0,001$ ; Tabela 2). A cobertura de gramíneas também esteve negativamente relacionada ao NDVI (ver tipo de combustível 1;  $R^2_{adj} = 0,42$ ;  $F = 20,92$ ;  $P < 0,001$ ; Tabela 2; Figura 1). O conteúdo de água do material combustível esteve positivamente relacionado ao tempo desde a última queimada

(pseudo- $R^2 = 0,34$ ;  $F = 4,36$ ;  $P = 0,013$ ; Tabela 2). A densidade aparente não apresentou relação significativa com nenhuma das variáveis abióticas analisadas.

Apesar da frequência de queimada não ter sido selecionada como preditora de nenhum dos atributos do material combustível, indicando pouca influência de mecanismos de retroalimentação a essa escala, 83% da variação na frequência de fogo das parcelas foi explicada pelo efeito da precipitação média anual e da densidade aparente. Em ambos os casos, a relação com a frequência de fogo foi positiva (pseudo- $R^2 = 0,83$ ;  $F = 3,03$ ;  $P < 0,001$ ; Tabela 2).

Tabela 3: Regressões múltiplas entre características do material combustível e variáveis abióticas e bióticas.

Variável resposta	Variável explanatória	R <sup>2</sup>	P
<b>Continuidade do combustível</b>	+ Argila, + PMA, + Última queimada	0,53	<0,001
<b>Tipo de combustível 1</b>	+ NDVI	0,42	<0,001
<b>Tipo de combustível 2</b>	+ Argila	0,44	<0,001
<b>Conteúdo de água</b>	+ Última queimada	0,34	0,013
<b>Biomassa seca</b>	+ Argila	0,13	0,033
<b>Altura do combustível</b>	- NDVI, - EP + Argila + Última queimada	0,62	<0,001
<b>Densidade aparente</b>	~1	-	-
<b>Frequência de fogo</b>	+ Densidade aparente + PMA	0,83	<0,001

Os resultados são de modelos lineares generalizados para todas as variáveis, exceto Tipo de Combustível 1 e 2 (regressões múltiplas) e Frequência de Fogo (modelos espaciais autorregressivos de erro simultâneo). R<sup>2</sup> são R<sup>2</sup> ajustado para Tipo de Combustível 1 e 2, Nagelkerke Pseudo-R<sup>2</sup> para Frequência de Fogo e variance-function-based Pseudo-R<sup>2</sup> para as demais variáveis. PMA: precipitação média anual (mm); EP: Estacionalidade da precipitação (índice); Última queimada: tempo desde o último incêndio (anos).

## Discussão

Os resultados encontrados mostram que atributos do material combustíveis relacionados a uma maior inflamabilidade estão positivamente relacionados à cobertura de gramíneas, aumentam com a maior produtividade do ecossistema (relações positivas encontradas com o solo mais argiloso e com maiores médias de precipitação anual) e com o tempo desde a última queimada, corroborando a hipótese de que as diferentes dimensões da inflamabilidade vão estar positivamente correlacionadas por meio dos atributos combustíveis e que estes vão ser influenciados por variações climáticas e históricas

(incêndios). Também foi encontrada uma relação negativa entre a inflamabilidade e a cobertura arbórea, onde os atributos do material combustível associados a uma maior inflamabilidade diminuíram com a presença da cobertura arbórea e arbustiva, resultado também esperado pelas nossas hipóteses, pois o aumento da cobertura arbórea limita a expansão das espécies de gramíneas C4 inflamáveis, substituindo o material combustível por serapilheira (menos inflamável), diminuindo significativamente a inflamabilidade do sistema. Evidenciou-se, também, que atributos do material combustível como a densidade aparente e como a continuidade do material combustível explicaram a variação na frequência dos incêndios em campos e savanas, corroborando a hipótese de que a variação espacial no clima e nesses atributos determinariam os regimes de fogo do Parque.

A variável biótica que melhor explicou a variação na frequência de incêndios foi a densidade aparente. Nenhuma das variáveis abióticas analisadas explicou a variação na densidade aparente do material combustível. Porém, a densidade aparente é calculada a partir da biomassa e da altura do material combustível herbáceo. Além disso, a partir do conjunto de suas correlações com os demais preditores, é possível observar que essa variável é significativamente correlacionada com biomassa seca e com o conteúdo de água, que por sua vez, estavam positivamente correlacionados à altura e continuidade do material combustível herbáceo, e com a cobertura de gramas e arbustos. Assim, conclui-se que fatores influenciando essas variáveis, como a proporção de argila no solo, vão explicar, de forma indireta, a variação na densidade aparente do material combustível. A precipitação média anual é a variável abiótica que melhor explica a variação na densidade aparente, onde quanto maior é a média da precipitação anual, maior será a produtividade do sistema e mais contínuo será o material combustível, influenciando na densidade aparente e, conseqüentemente, levando a maior frequência de incêndios (Griffin, *et al.*, 1983; van Wilgen, *et al.*, 2000; van der Werf, *et al.*, 2008). A relevância da densidade aparente para as frequências de fogo no Parque é consistente com estudos prévios (Cornwell, *et al.*, 2015; Bowman, *et al.*, 2017; Newberry, *et al.*, 2020). No entanto, esses estudos encontraram uma relação negativa entre a densidade aparente e a ignitabilidade do material combustível, ao passo que nós encontramos uma relação positiva. Isso pode ser explicado pela correlação entre o conteúdo de água e a densidade aparente do material combustível, que reduz a ignição do material, resultando em menores frequências de incêndios. Uma possível causa desse efeito seria que, para o combustível ser inflamável, é necessário a presença de biomassa e oxigênio, então quando a biomassa é muito compacta, o nível de oxigênio é limitado, a capacidade do ar de secar o combustível é

reduzida e ocorre o acúmulo de umidade (Fernandes e Cruz, 2012; Schwilk, 2015). Assim, os resultados encontrados mostram que, todos esses fatores combinados determinam a variação da densidade aparente, de forma que, quando a densidade aparente é mais baixa (causada, por exemplo, pelo excesso de solo exposto causado pela baixa proporção de argila no solo ou pela baixa produtividade causada por baixa precipitação) o combustível se torna descontínuo, assim, se a densidade aparente é menor, a continuidade vai diminuir e, conseqüentemente, vai haver uma diminuição na frequência de incêndios (Whelan, 1995; Fidelis, *et al.*, 2012; Schwilk, 2015; Rodrigues e Fidelis, 2022).

A variação na continuidade do combustível foi mais bem explicada pela cobertura, tanto por arbustos, como por gramíneas, em relação a ervas não-graminóides (ver tipo de combustível 2 e TC2; Figura 1 e Tabela 2) e biomassa seca. A continuidade do combustível foi o fator que melhor explicou a altura do componente herbáceo e o conteúdo de água (que também é influenciado pela biomassa seca). As variáveis abióticas que melhor explicam a continuidade do combustível foram a argila, a precipitação média anual e o tempo desde a última queimada. A proporção de argila apresenta efeitos na continuidade do combustível onde observa-se que, quanto mais elevada a proporção de argila no solo e maior a retenção de água pelo solo, mais contínuo será o combustível, influenciando na densidade aparente e, conseqüentemente, levando a maior frequência de incêndios (Simpson, *et al.*, 2016). Já se sabe, também, que a precipitação média explica a produtividade do sistema, influenciando na continuidade do combustível (van der Werf, *et al.*, 2008), conseqüentemente exercendo influência na frequência de incêndios e na taxa de propagação do fogo na paisagem. Outro fator a ser considerado é de que a passagem do fogo remove uma parte considerável da cobertura de biomassa, deixando o solo mais exposto e resultando em uma descontinuidade do combustível (Bond e van Wilgen, 1996; Fidelis *et al.*, 2012; Rodrigues e Fidelis, 2022), levando a conclusão de que, quanto mais tempo se passar desde o último incêndio, mais biomassa será repostada e mais contínuo será o material combustível. Assim, podemos assumir também que, com a média de precipitação alta, a cobertura do material combustível tende ser mais conectada (influenciando diretamente no aumento da densidade aparente do combustível, resultando em incêndios mais frequentes) e a biomassa combustível acumulada será maior, tanto quanto a altura do componente herbáceo (o que irá resultar em uma maior frequência e intensidade dos incêndios).

A variação na altura do componente herbáceo apresentou relação negativa com a cobertura do solo por arbustos, serapilheira e ervas, em relação à cobertura de gramíneas (ver tipo de combustível 1 e TC1 na Tabela 2 e Figura 1) e positiva com o tipo de combustível 2, resultado já esperado, pois a cobertura de gramíneas é o principal determinante da variação na altura do material combustível, onde maiores valores de cobertura de gramíneas estão associados a maiores valores de altura, os quais estarão diretamente associados a maior frequência e intensidade de incêndios. Cada vez que ocorre um evento de fogo, as espécies de gramíneas se estabelecem mais rápido e em maior abundância na paisagem, (Govender, *et al.*, 2006) tornando uma determinada região mais propensa à ocorrência de incêndios. Podemos considerar, também, que quanto mais tempo se passar desde o último incêndio, mais biomassa se acumula, repondo aquela que foi consumida no último incêndio e, conseqüentemente, podemos observar um combustível mais alto (Bond e van Wilgen, 1996; Fidelis, *et al.*, 2012), resultando na maior intensidade do fogo. As variáveis bióticas que melhor explicaram a altura foram a continuidade do combustível, a biomassa seca, o conteúdo de água do combustível e, entre as variáveis abióticas, o tempo desde a última queimada e a proporção de argila no solo (positivamente correlacionados), a estacionalidade da precipitação e o NDVI (negativamente correlacionados). A relação positiva encontrada entre a proporção de argila no solo e a biomassa e altura do combustível indica que, quanto mais elevada a proporção de argila no solo, maior será a biomassa de gramíneas e mais propenso a incêndios será aquele sistema, pois sabe-se que as gramíneas são um tipo de combustível mais inflamável, são consumidas mais rápido pelo fogo, produzindo incêndios de alta intensidade e temperatura (Prior, *et al.*, 2017). A proporção de argila também é determinante da distribuição espacial das espécies vegetais, por apresentar particular menores e retendo mais água no solo (Munhoz, *et al.*, 2008), resultando no aumento da produção de biomassa e aumento da altura do combustível, o que vai influenciar nos regimes de fogo do Parque, tornando o sistema mais propenso a incêndios mais frequentes e mais intensos (Bowman, *et al.*, 2015). Outro fator que explicou a variação na altura foi a estacionalidade da precipitação, que se trata de um índice de distribuição de chuvas durante o ano, onde quanto maior é o valor da estacionalidade, mais compactas são as chuvas em uma determinada época do ano. Nesse caso, observa-se que, quanto maior a estacionalidade, menor será a biomassa combustível e o conteúdo de água, influenciando na altura do componente herbáceo e, conseqüentemente na intensidade do fogo (van der Werf, *et al.*, 2008). Outro efeito que também podemos observar é o da cobertura arbórea

na altura do combustível, onde a quantidade de serapilheira na cobertura do componente herbáceo será maior, conforme a cobertura arbórea e arbustiva aumenta criando um efeito de sombra que substitui a cobertura de gramíneas C4 (intolerantes à sombra), resultando na diminuição da altura do componente herbáceo e, conseqüentemente, reduzindo a intensidade do fogo (Prior, *et al.*, 2017). Esse resultado também implica que essa composição da cobertura do solo vai influenciar na frequência e no comportamento do fogo, onde a cobertura de serapilheira, que apresenta grau mais baixo de ignitabilidade (ou seja, menor capacidade de iniciar um incêndio), irá diminuir a frequência que incêndios vão ocorrer e resultando, também, em incêndios de baixa intensidade e maior duração (Prior, *et al.*, 2017).

O conteúdo de água apresentou relação positiva com o tipo de combustível 2, biomassa seca, altura do componente herbáceo e continuidade do combustível. Uma relação já esperada, pois quanto mais biomassa de gramíneas, mais espaço para a água, mantendo o combustível úmido e, conseqüentemente, reduzindo a ignitabilidade (chance de um incêndio se iniciar), fazendo com que o sistema seja menos propenso à incêndios, pois sabe-se a quantidade de calor necessária para o início de um incêndio aumenta conforme o conteúdo de água do material combustível também aumenta (Pausas, *et al.*, 2016). Considerando que a continuidade do combustível e a altura do componente herbáceo estão associados à maiores médias de precipitação e o acúmulo de água pelo combustível também é influenciado pelas chuvas, podemos concluir que, quanto maior é a média das precipitações, mais água será acumulada pelo combustível, resultando em maior quantidade de biomassa acumulada, maior altura do componente herbáceo e alta conectividade do combustível. Com isso, podemos observar que as relações entre conteúdo de água e as características do combustível podem resultar em maior intensidade dos incêndios (causada pela altura e quantidade de biomassa combustível) e maior frequência do fogo (causada pela continuidade do combustível). A variável abiótica que melhor explicou a variação no conteúdo de água foi o tempo desde a última queimada, sugerindo que, quanto maior é o intervalo de tempo desde a última queimada, mais biomassa de gramíneas se acumula e, assim, mais água será acumulada pela cobertura combustível (Thonicke, *et al.*, 2001; Govender, *et al.*, 2006). Sabendo que o histórico de queimadas está associado à estacionalidade da precipitação e à produtividade das gramíneas (Simpson, *et al.*, 2016), esses fatores combinados vão influenciar diretamente na cobertura de biomassa combustível, onde observamos que, durante a época seca, a

produtividade é menor, o acúmulo de água pelo combustível também será menor, influenciando nos regimes de fogo, tornando o sistema mais propenso à incêndios.

A variável que melhor explicou a variação no tipo de combustível 1 foi o NDVI, que também explica o declínio na cobertura de gramíneas. Esse resultado é consistente com as predições desse estudo, pois sabe-se que o aumento na cobertura arbórea e arbustiva resulta no declínio da cobertura de gramíneas C4 e, por consequência desse aumento da cobertura arbórea e arbustiva, ocorre o aumento da cobertura de serapilheira, que apresenta baixa ignitabilidade e, assim, reduzindo a frequência que incêndios vão ocorrer no Parque e apresentando, também, efeito no comportamento do fogo, onde a cobertura de serapilheira, por ser menos inflamável que a cobertura de gramíneas, resulta em incêndios de menor intensidade e maior duração (Prior, *et al.*, 2017).

O fator abiótico que melhor explicou o tipo de combustível 2 foi a proporção de argila no solo (positiva). O tipo de combustível 2 também explica a variação na biomassa seca, com a continuidade do material combustível e com a altura, sendo todos esses fatores bióticos explicados pela variação desse tipo de combustível. Em concordância com tal padrão, a variação na biomassa seca também foi explicada pelo conteúdo de argila. As relações entre essas variáveis de características do combustível e a influência da proporção de argila na cobertura do material combustível do solo sugerem que exista um efeito da argila na inflamabilidade do sistema, onde as partículas de argila, que apresentam maior capacidade de retenção de água, favorecem o desenvolvimento da cobertura vegetal e da biomassa combustível, resultando em incêndios mais frequentes e intensos (Munhoz, *et al.*, 2008).

Os resultados encontrados nesse estudo são consistentes com achados de outros estudos analisando gradientes campos-savana, que evidenciam o importante controle que a estrutura espacial da cobertura do componente herbáceo exerce nos regimes e no comportamento do fogo (Bowman, *et al.*, 2017; Simpson, *et al.*, 2022). Em geral, atributos do material combustível associados a uma maior inflamabilidade estão positivamente relacionados à cobertura de gramíneas (Newberry, *et al.*, 2020; Rodrigues e Fidelis, 2022). Outros estudos que testaram o efeito das condições climáticas, como a frequência das precipitações na determinação da produtividade do ecossistema e a forma como esse fator regula a disponibilidade de biomassa combustível para ignição, também reportaram resultados similares, onde esses fatores impactam diretamente na variação dos regimes de fogo (van der Werf, *et al.*, 2008). A proporção de argila no solo está positivamente relacionada a indicadores de inflamabilidade exercendo influência na

retenção de água no solo e na produtividade do sistema, sendo fator determinante dos regimes de fogo (Munhoz, *et al.*, 2008; van der Werf, *et al.*, 2008; Simpson, *et al.*, 2016). A densidade de árvores apresentou efeito negativo na frequência e intensidade do fogo, resultando no declínio da biomassa de gramíneas conforme a cobertura arbórea aumenta e, conseqüentemente, causando um declínio na inflamabilidade do sistema (Bowman, *et al.*, 2017; Newberry, *et al.*, 2020). O efeito do histórico de incêndios também foi determinante para a estruturação do componente herbáceo, influenciando nas características da cobertura superficial e nos atributos do material combustível (Govender, *et al.*, 2006; Saladyga, *et al.*, 2022).

Os resultados sobre o efeito da densidade aparente na frequência de incêndios foram contrários aos analisados em estudos anteriores, onde a densidade aparente apresenta efeito negativo com a ignição do material combustível (Cornwell, *et al.*, 2015; Bowman, *et al.*, 2017, Newberry, *et al.*, 2020). Nos resultados reportados nesse estudo, encontramos que, se a densidade é alta, a continuidade do combustível é maior (Fidelis, *et al.*, 2012; Schwilk, 2015; Rodrigues e Fidelis, 2022), resultando em maiores frequências de incêndios, sendo esse o principal fator que explicou a frequência de fogo nas áreas estudadas do Parque.

## **Conclusão**

O presente estudo evidenciou que os atributos do combustível, como a biomassa de gramíneas, a densidade aparente e a continuidade do combustível e fatores ambientais, como o histórico de incêndios, a precipitação média anual e a proporção de argila no solo apresentam forte controle nos regimes de fogo do Parque, influenciando na frequência de queimadas, na intensidade e na taxa de propagação do fogo. Observa-se, também, um efeito negativo da cobertura arbórea na frequência de incêndios. Em um gradiente campo-savana, os atributos do material combustível variam na composição da cobertura superficial do solo e essas diferenças influenciaram direta e indiretamente na frequência de incêndios e na variação do comportamento do fogo, através de interações entre as características dos atributos do material combustível e fatores ambientais como a média de precipitação anual, a textura do solo e o histórico de queimadas. A interação entre os atributos do material combustível, as variações das condições ambientais e o histórico de incêndios explicaram os regimes de fogo no Parque, portanto, para melhor entendermos a frequência dos incêndios, é importante considerar a interação entre as características do

componente herbáceo e os demais fatores ambientais e históricos e como essa relação é determinante do comportamento do fogo.

Muitos estudos analisando o efeito do fogo na vegetação analisam apenas a variáveis de atributos do material combustível, não considerando o possível efeito que o solo, variações climáticas e fatores históricos vão apresentar nesses atributos e nos regimes de fogo, portanto espera-se que os resultados obtidos nesse estudo auxiliem na realização de outros estudos visando hipóteses alternativas e entender quais outros fatores podem explicar com maior precisão essa relação entre o fogo e a vegetação no bioma Cerrado. Assim, com maior conhecimento, seja possível compreender melhor os determinantes dos atributos do material combustível para, então, entender quais fatores explicam os regimes de incêndios e a variação no comportamento do fogo. Esperamos, também, que os resultados encontrados nesse estudo possam contribuir para a predição do comportamento do fogo em campos e savanas e, também, auxiliar na elaboração de diferentes estratégias para trabalho com o manejo de fogo e preservação do bioma Cerrado. Além disso, também espera-se que esses resultados possam contribuir com outros estudos a respeito dos determinantes de atributos da cobertura superficial combustível, da predição do comportamento do fogo, do efeito da passagem do fogo na estruturação de biomas, da modelagem do impacto do fogo no ecossistema.

### **Referências bibliográficas**

Alam, M. A., Wyse, S. V., Buckley, H. L., Perry, G. L. W., Sullivan, J. J., Mason, N. W. H., Buxton, R., Richardson, S. J., Curran, T. J., Gilliam, F. 2020. Shoot flammability is decoupled from leaf flammability, but controlled by leaf functional traits. *Journal of Ecology*, 108(2). 641–653. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13289>

Alessio, G. A., Peñuelas, J., Llusà, J., Ogaya, R., Estiarte, M., De Lillis, M. 2008. Influence of water and terpenes on flammability in some dominant Mediterranean species. *International Journal of Wildland Fire*, 17(2). 274–286. <https://doi.org/10.1071/WF07038>

Alvarado, S. T., Silva, T. S. F., Archibald, S. 2018. Management impacts on fire occurrence: a comparison of fire regimes of African and South American tropical

savannas in different protected areas. *Journal of Environmental Management*, 218. 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.004>

Archibald, S., Roy, D. P., van Wilgen, B. W., Scholes, R. J. 2009. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 15. 613–630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>

Bailey, A. W., Anderson, M. L. 1980. Fire temperatures in grass, shrub and forest communities of Central Alberta. *Journal of Range Management*, 33. 37–40. <https://doi.org/10.2307/3898225>

Batista, E. K. L., Russell-Smith, J., França, H., Figueira, J. E. C. 2018. An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the canastra national park, brazil: outcomes of fire suppression policies. *Journal of Environmental Management*, 205. 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.053>

Behm, A. L., Duryea, M. L., Long, A. J., Zipperer, W. C. 2004. Flammability of native understory species in pine flatwood and hardwood hammock ecosystems and implications for the wildland – urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 13(3). 355–365. <https://doi.org/10.1071/WF03075>

Bernardino, P. N., Dantas, V. L., Hirota, M., Pausas, J. G., Oliveira, R. S. 2022. Savana-forest coexistence across a fire gradient. *Ecosystems*, 25. 279-290. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00654-4>

Biswell, H. H. 1989. Prescribed burning in california wildlands vegetation management. *University of California Press*, Berkeley, Califórnia. <https://doi.org/10.1525/9780520354067>

Bond, W. J., Keeley, J. E. 2005. Fire as a global herbivore: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 20. 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.04.025>

Bond, W. J. 2008. What limits trees in C4 grasslands and savannas? *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 39. 641–659. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.39.110707.173411>

Bond, W. J., Van Wilgen, B. W. 1996. Plants and fire. *Springer Netherlands*. Chapman, New York.

Bowman, D. M. J. S., Perry, G. L. W., Marston, J. B. 2015. Feedbacks and landscape-level vegetation dynamics. *Trends in Ecology & Evolution*, 30. 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.03.005>

Bowman, D. M. J. S., Haverkamp, C., Rann, K. D., Prior, L. D. 2017. Differential demographic filtering by surface fires: How fuel type and fuel load affect sapling mortality of an obligate seeder savanna tree. *Journal of Ecology*, 106 (3). 1-13. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12819>

Bradstock, R. A., Hammill, K. A., Collins, L., Price, O. 2010. Effects of weather, fuel and terrain on fire severity in topographically diverse landscapes of south-eastern Australia. *Landscape Ecology*, 25. 607–619. <https://doi.org/10.1007/s10980-009-9443-8>

Brando P. M.; Nepstad, D. C.; Balch, J. K.; Bolker, B.; Christman, M. C.; Coe, M.; Putz, F. E. 2012. Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark thickness, tree size, woody density and fire behavior. *Global Change Biology*, 18, 630–641. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02533.x>

Brasil. 2023. Ministério do Meio Ambiente – MMA. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio. *Parque Nacional da Serra da Canastra*. Plano de Manejo Integrado do Fogo, 2023 a 2026. 48p. Disponível em: <[http://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/cerrado/lista-de-ucs/parna-da-serra-da-canastra/arquivos/PMIF\\_PARNA\\_SERRA\\_DA\\_CANASTRA\\_2023\\_2026.pdf](http://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/cerrado/lista-de-ucs/parna-da-serra-da-canastra/arquivos/PMIF_PARNA_SERRA_DA_CANASTRA_2023_2026.pdf)>. Acesso em: 29 ago. 2023.

Burger, N., Bond, W. J. 2015. Flammability traits of Cape shrubland species with different post-fire recruitment strategies. *South African Journal of Botany*, 101. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.05.026>

Cardoso, A. W., Oliveras, I., Abernethy, K. A., Jeffery, K. J., Lehmann, D., Ndong, J. E., McGregor, I., Belcher, C. M., Bond, W. J., Malhi, Y. S. 2018. Grass species flammability, not biomass, drives changes in fire behavior at tropical forest-savanna transitions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 1. 1-14. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00006>

Cardoso, A. W., Archibald, S., Bond, W. J., Coetsee, C., Forrest, M., Govender, N., Lehmann, D., Makaga, L., Mpanza, N., Ndong, J. E., Pambo, A. F. K., Strydom, T., Tilman, D., Wragg, P. D., Staver, A. C. 2022. Quantifying the environmental limits to fire spread in grassy ecosystems. *The Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119 (26). <https://doi.org/10.1073/pnas.2110364119>

Cornwell, W. K., Elvira, A., van Kempen, L., van Logtestijn, R. S. P., Aptroot, A., Cornelissen, J. H. C. 2015. Flammability across the gymnosperm phylogeny: The importance of litter particle size. *New Phytologist*, 206. 672–681. <https://doi.org/10.1111/nph.13317>

Coutinho, L. M. 1982. Ecological effects of fire in braziliancerrado. *Ecology of Tropical Savannas*, 42. 273–291. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0_13)

D'Antonio, C. M., Vitousek, P. M. 1992. Biological invasions by exotic grasses, the grass/fire cycle, and global change. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23. 63–87. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.23.110192.000431>

D'Odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L. 2006. A probabilistic analysis of fire-induced tree-grass coexistence in savannas. *American Naturalist*, 167.79–87. <https://doi.org/10.1086/500617>

Dantas, V. L., Pausas, J. G. 2022. The legacy of the extinct Neotropical megafauna on plants and biomes. *Nature Communications*, 13. 129. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27749-9>

Fernandes, P. M., Cruz, M. G. 2012. Plant flammability experiments offer limited insight into vegetation–fire dynamics interactions. *New Phytologist*, 194. 606–609. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04065.x>

Fernandes, P. M. 2013. Fire-smart management of forest landscapes in the mediterranean basin under global change. *Landscape Urban Plan*, 110. 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.014>

Fick, S. E., Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12). 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

Fidelis, A., Blanco, C. C., Müller, S. C., Pillar, V. D., Pfadenhauer, J. 2012. Short-term changes caused by fire and mowing in Brazilian Campos grasslands with different long-term fire histories. *Journal of Vegetation Science*, 23 (3). 552-562. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01364.x>

Filgueiras, T. S. 2002. Herbaceous plant communities. *Cerrados of Brazil*, 121-139. <https://doi.org/10.7312/oliv12042-008>

Fontaine, J. B., Westcott, V. C., Enright, N. J., Lade, J. C., Miller, B. P. 2012. Firebehaviour in south-western australian shrublands: evaluating the influence of fuel age and fire weather. *International Journal of Wildland Fire*, 21. 385–395. <https://doi.org/10.1071/WF11065>

Gao, X., Schwilk, D. W. 2022. Burn hot or tolerate trees: flammability decreases with shade tolerance in grasses. *Oikos Advancing Ecology*, 4. <https://doi.org/10.1111/oik.08930>

Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V., Justice, C. O. 2018. MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B. *NASA*.

Gill, A. M., 1975. Fire and the Australian flora: a review. *Australian Forests*, 38. 4-25. <https://doi.org/10.1080/00049158.1975.10675618>

Giroldo, P. Z. 2016. Effect of fire seasonality in a Brazilian savanna. Dissertação – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, *Departamento de Ecologia*.

Govender, N., Trollope, W. S. W., van Wilgen, B. W. 2006. The effect of fire season, fire frequency, rainfall and management on fire intensity in savanna vegetation in South Africa. *Journal of Applied Ecology*, 43. 748–758. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01184.x>

Griffin, G. F., Price, N. F., Portlock, H. F. 1983. Wildfires in the Central Australian Rangelands, 1970–1980. *Journal of Environmental Management*, 17 (4). 311–323.

Hardesty, J., Myers, R., Fulks, W. 2005. Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. *The George Wright Forum*, 22. 78-87.

He, T., Lamont, B. B. 2018. Baptism by fire: the pivotal role of ancient conflagrations in evolution of the Earth's flora. *National Science Review*, 5. 237–254. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx041>

Hoffmann, W.A., Jaconis, S., McKinley, K., Geiger, E., Gotsh, S., Franco, A.C., 2012b. Fuelsormicroclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna-forest boundaries. *Austral Ecology*, 37. 634–643. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2011.02324.x>

IBGE. 2022. Informações Ambientais e Climatologia. Acesso em: 05 de Março de 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/climatologia.html>

- Kauffman, J. B., Cummings, D. L., Ward, D. E. 1994. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. *Journal of Ecology*, 82. 519-531. <https://doi.org/10.2307/2261261>
- Kraaij, T., Msweli, S. T., Potts, A. J. 2022. Fuel trait effects on flammability of native and invasive alien shrubs in coastal fynbos and thicket (Cape Floristic Region). *PeerJ*, 10. <https://doi.org/10.7717/peerj.13765>
- Meirelles, M., Oliveira, R., Ribeiro, J., Vivaldi, L., Rodrigues, L. A., Silva, G. P. 2002. Utilização do método de intersecção da linha em levantamento quantitativo do estrato herbáceo do cerrado. *Boletim do Herbário Ezechias Paulo Heringer*, 60-68.
- Miranda, H. S.; Sato, M. N.; Andrade, S. M. A.; Haridasan, M.; Morais, H. C. 2004. Queimadas do cerrado: caracterização e impactos. *Embrapa Informação Tecnológica, Cerrado: ecologia e caracterização*. Brasília, Distrito Federal.
- Morgan, J. W. 1999. Defining grassland fire events and the response of perennial plants to annual fire in temperate grasslands of south-eastern Australia. *Plant Ecology*, 144. 127-144. <https://doi.org/10.1023/A:1009731815511>
- Morgan, P., Hardy, C. C., Swetnam, T. W., Rollins, M. G., Long, D. G. 2001. Mapping fire regimes across time and space: understanding coarse and fine-scale patterns. *International Journal of Wildland Fire*, 10. 329–342. <https://doi.org/10.1071/WF01032>
- Mouillot, F., Field, C. B. 2005. Fire history and the global carbon budget: a 1° × 1° fire history reconstruction for the 20th century. *Global Change Biology*, 11. 398–420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00920.x>
- Munhoz, C. B. 2004. Fitossociologia do estrato rasteiro de cerrado. Tese de doutorado. *Universidade de Brasilia*. Brasília, Distrito Federal, Brasil.
- Munhoz, C. B. R., Felfili, J. M., Rodrigues, C. 2008. Species-environment relationship in the herb-subshrub layer of a moist Savanna site, Federal District, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 68 (1). 25-35. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000100005>

Newberry, B. M., Power, C. R., Abreu, R. C. R., Durigan, G., Rossatto, D. R., Hoffmann, W. A. 2020. Flammability thresholds or flammability gradients? Determinants of fire across savanna-forest transitions. *New Phytologist*, 288. 910-921. <https://doi.org/10.1111/nph.16742>

Padullés, C. J., Buckley, H. L., Day, N. J., Pieper, R., Curran, T. J. 2018. Community-level flammability declines over 25 years of plant invasion in grasslands. *Journal of Ecology*.

Pausas, J., Keeley, J. 2009. A burning story: the role of fire in the history of life. *Bioscience*, 59. 593-601. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.7.10>

Pausas, J. G., Ribeiro, E., 2013. The global fire-productivity relationship. *Global Ecology and Biogeography*, 22. 728–736. <https://doi.org/10.1111/geb.12043>

Pausas, J. G., Keeley, J. E., Schwilk, D. W. 2017. Flammability as an ecological and evolutionary driver. *Journal of Ecology*, 105. 289–297. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12691>

Pilon, N. A. L., Cava, M. G. B., Hoffmann, W. A., Abreu, R. C. R., Fidelis, A., Durigan, G. 2020. The diversity of post-fire regeneration strategies in the cerrado ground layer. *Journal of Ecology*, 109 (1). 154-166. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13456>

Prior, L. D., Murphy, B. P., Williamson, G. J., Cochrane, M. A., Jolly, W. M., Bowman, D. M. J. S. 2017. Does inherent flammability of grass and litter fuels contribute to continental patterns of landscape fire activity? *Journal of Biogeography*, 44. 1225–1238. <https://doi.org/10.1111/jbi.12889>

Pyne, S. J., Andrews, P. L., Laven, R. D. 1996. Introduction to wildland fire, second edition. *John Wiley & Sons*, New York, 769.

Pyne, S. J. 1997. World fire: the culture of fire on earth. *University of Washington Press*, Seattle, USA.

Rayburn, E., Lozier, J. 2003. A falling plate meter for estimating pasture forage mass. Fact Sheet. Extension Service, West Virginia University.

Rissi, M. N., Baeza, M. J., Gorgone-Barbosa, E., Zupo, T., Fidelis, A., 2017. Does season affect fire behaviour in the Cerrado? *International Journal of Wildland Fire*, 26. 427–433. <https://doi.org/10.1071/WF14210>

Rodrigues, C. A., Fidelis, A. 2022. Should we burn the Cerrado? Effects of fire frequency on open savanna plant communities. *Journal of Vegetation Science*, 30 (6). e13159. <https://doi.org/10.1111/jvs.13159>

Saladyga, T., Palmquist, K. A., Bacon, C. M. 2022. Fire history and vegetation data reveal ecological benefits of recent mixed-severity fires in the Cumberland Mountains, West Virginia, USA. *Fire Ecology*, 18 (19). <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00143-6>

Sano, S. M., Almeida, S. P., Ribeiro, J. F. 2008. Cerrado: ecologia e flora. *Embrapa Informação Tecnológica*, 1. Brasília, Distrito Federal.

Savadogo, P., Sawadogo, L., Tiveau, D. 2007. Effects of grazing intensity and prescribed fire on soil physical and hydrological properties and pasture yield in the savanna woodlands of burkinafaso. *Agriculture Ecosystems Environment*, 118. 80-92. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.002>

Schwilk, D. W. 2015. Dimensions of plant flammability. *New Phytologist*, 206. 486–488. <https://doi.org/10.1111/nph.13372>

Scholes, R. J., Hall, D. O. 1996. The carbon budget of tropical savannas, woodlands and grasslands. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. 69–100.

Simon, M. F., Grether, R., de Queiroz, L. P., Skema, C., Pennington, R. T., Hughes, C. E. 2009. Recent assembly of the cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of National Academy of Science*, 64. 106–203. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903410106>

Simpson, K. J., Ripley, B. S., Christin, P.-A., Belcher, C. M., Lehmann, C. E. R., Thomas, G. H., Osborne, C. P. 2016. Determinants of flammability in savanna grass species. *Journal of Ecology*, 104, 138–148. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12503>

Simpson, K. J., Archibald, S., Osborne, C. P. 2022. Savanna fire regimes depend on grass trait diversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 37 (9). 749-758. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.04.010>

Souza Junior, C. M., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A. A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L. G., Souza-Filho, P. W. M., Oliveira, S. W., Rocha, W. F., Fonseca, A. V., Marques, C. B., Diniz, C. G., Costa, D., Monteiro, D., Rosa, E. R., Vélez-Martin, E., Weber, E. J., Lenti, F. E. B., Saraiva, M. M., Salgado, M. P. G., Mesquita, V. V., Payern, F. G. C., Paternost, F. F., Galano, S., Neto, L. C. F., Siqueira, J. V. 2020. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12.

Syphard, A. D., Keeley, J. E., Pfaff, A. H., Ferschweiler, K. 2017. Human presence diminishes the importance of climate in driving fire activity across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 14. 13750–13755. <https://doi.org/10.1073/pnas.1713885114>

Takacs, S., to Bühne, H. S., Pettorelli, N. 2021. What shapes fire size and spread in African savannas? *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7. 610–620. <https://doi.org/10.1002/rse2.212>

Trollope, W. S. W. 1982. The ecological effects of fire in south african savannas. *Ecology of Tropical Savannas*, 1. 292-306. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-68786-0_14)

UFV - CETEC - UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, *Fundação Estadual do Meio Ambiente*, 2010. 49p. Disponível em: Acesso em: 19 de jul. de 2022.

USGS. 2021. *USGS Global Visualization Viewer–Landsat 8*. [S.l.]. Disponível em: <<http://glovis.usgs.gov/>>.

van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N., Dolman, A. J. 2008. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics. *Global Biogeochemical Cycles*, 22 (3). <https://doi.org/10.1029/2007GB003122>

van Wilgen, B. W., Biggs, H. C., O'Regan, S. P., Mare, N. 2000. A fire history of the savanna ecosystems in the Kruger National Park, South Africa, between 1941 and 1996, *South African Journal of Science*, 96 (4). 167–178.

Vasconcelos, V., Carvalho Júnior, O. A., Martins, É. S., Couto Júnior, A. F. 2015. The Canastra Range: On the Way to São Francisco River Spring. Em Vieira, B.C., Salgado, A. A. R., Santos, L. J. C. (eds) *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, Dordrecht Heidelberg, New York London, 403p. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0\\_32](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_32)

White, R. H., Zipperer, W. C. 2010. Testing and classification of individual plants for fire behaviour: Plant selection for the wildland-urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, 19. 213–227. <https://doi.org/10.1071/WF07128>

Williams, R. J., Gill, A. M., Moore, P. H. R. 1998. Seasonal changes in fire behaviour in a tropical savanna in northern Australia. *International Journal of Wildland Fire*, 8(4). 227-239. <https://doi.org/10.1071/WF9980227>

Wragg, P. D., Mielke, T., Tilman, D. 2018. Forbs, grasses, and grassland fire behaviour. *Special Feature: Biotic controls of plant coexistence*, 106. 1983-2001. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12980>