

Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal

O FOGO EM CULTURAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO CERRADO: EFEITOS NA BIOMASSA, NO SOLO E MÉTODOS DE CONTROLE

LIDIANE MACHADO DIONIZIO

**M
E
S
T
R
A
D
O**

**Ipameri-GO
2025**

LIDIANE MACHADO DIONIZIO

**O FOGO EM CULTURAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO
CERRADO: EFEITOS NA BIOMASSA, NO SOLO E MÉTODOS DE
CONTROLE**

Orientador: Prof. Dr. Ednaldo Cândido Rocha
Coorientador: Prof. Dr. Ademilson Coneglian

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Unidade Universitária Ipameri como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para a obtenção do título de MESTRE.

Ipameri
2025

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DD592 Dionizio, Lidianne Machado
f O FOGO EM CULTURAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO
CERRADO: EFEITOS NA BIOMASSA, NO SOLO E MÉTODOS DE
CONTROLE / Lidianne Machado Dionizio; orientador Ednaldo
Cândido Rocha; co-orientador Ademilson Coneglian. --
Ipameri, 2025.
44 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
Mestrado Acadêmico em Produção Vegetal) -- Unidade de
Ipameri, Universidade Estadual de Goiás, 2025.

1. Savana Brasileira; Incêndios florestais;
Retardante de fogo; Biomassa; Qualidade do solo;
Conservação.. I. Rocha, Ednaldo Cândido, orient. II.
Coneglian, Ademilson, co-orient. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “O FOGO EM CULTURAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS NO CERRADO: EFEITOS NA BIOMASSA, NO SOLO E MÉTODOS DE CONTROLE ”

AUTOR(A): Lidiane Machado Dionizio

ORIENTADOR(A): Ednaldo Cândido Rocha

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE(A) EM PRODUÇÃO VEGETAL, pela comissão Examinadora:



Documento assinado digitalmente

EDNALDO CANDIDO ROCHA

Data: 20/08/2025 20:12:50-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ednaldo Cândido Rocha (Orientador)

Universidade Estadual de Goiás / Unidade Universitária Ipameri- GO



Documento assinado digitalmente

ADEMILSON CONEGLIAN

Data: 27/08/2025 11:59:34-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ademilson Coneglian

Universidade Estadual de Goiás/Unidade Universitária Ipameri- GO



Documento assinado digitalmente

TALLES EDUARDO BORGES DOS SANTOS

Data: 28/08/2025 08:28:56-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Talles Eduardo Borges dos Santos

Universidade Estadual de Goiás/Unidade Universitária Ipameri- GO



Documento assinado digitalmente

CARLOS ROBERTO SETTE JUNIOR

Data: 27/08/2025 14:11:38-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Roberto Sette Jr

Universidade Federal de Goiás/ Goiânia- GO

Registro de Declaração

Número: 225

Livro: R-01 Folhas: 04

Data: 18/08/2025



Data da realização: 18 de agosto de 2025

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Geral	5
2.2. Específicos	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1. Área de estudo	6
3.2. Desenho experimental	8
3.3. Variáveis analisadas	9
3.4. Procedimentos estatísticos	12
4. RESULTADOS	13
4.1. Relação entre as variáveis do fogo, de biomassa e climáticas.....	13
4.2. Comportamento do fogo em relação às culturas e ao solo	14
4.3. Concentrações do retardante nas diferentes culturas	20
5. DISCUSSÃO	24
6. CONCLUSÕES.....	30
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
8. ANEXO	38

RESUMO

O Cerrado, um dos domínios mais biodiversos do mundo, enfrenta desafios significativos devido aos incêndios frequentes, que impactam a composição vegetal, a qualidade do solo e os ecossistemas agrícolas e florestais. Esses incêndios muitas vezes são intensificados pelas mudanças climáticas e atividades humanas, alterando drasticamente a dinâmica natural do sistema. Este estudo buscou avaliar os efeitos do fogo em diferentes culturas (sorgo, milho, pastagem e eucalipto) no Cerrado goiano, além de testar a eficácia do retardante de chamas em controlar o fogo. O estudo foi conduzido na fazenda experimental da UEG/Ipameri. Foram testadas cinco concentrações (0%, 10%, 15%, 20% e 30%) do retardante de fogo a base de monoamônico. A aplicação ocorreu por meio de uma bomba costal para garantir a distribuição uniforme do produto nas parcelas. As variáveis analisadas foram: variáveis ambientais, temperatura da chama, velocidade de propagação do fogo, altura da chama, intensidade do fogo, biomassa e componentes químicos do solo. Os resultados demonstraram que o eucalipto apresentou maior associação com a maioria das variáveis que influenciam o fogo, especialmente a elevada carga de biomassa e a baixa umidade relativa do ar. Quando se compara as diferentes culturas sem a aplicação de retardante, a pastagem destacou-se pela maior velocidade de propagação do fogo, enquanto o sorgo registrou menor biomassa consumida e milho maior umidade relativa do ar, que é um preditor da umidade do material combustível. Quanto ao solo, observou-se aumento temporário de fertilidade após a queima, seguido de declínio após seis meses. O retardante do fogo demonstrou eficácia na concentração de 30%, reduzindo significativamente a altura, a temperatura e a velocidade das chamas. As demais concentrações testadas (10%, 15% e 20%) apresentaram desempenho inferior à concentração de 30%. Existe influência entre a estrutura da vegetação e das condições climáticas no comportamento do fogo, uma vez que a quantidade e a disposição do material combustível determinam a intensidade e a velocidade das chamas, enquanto fatores como temperatura e umidade regulam a altura e a temperatura do fogo. O retardante apresenta-se como uma ferramenta promissora para o controle de incêndios, atuando diretamente na redução da inflamabilidade do combustível por meio do isolamento térmico. No entanto, seu uso em larga escala ainda enfrenta o desafio dos altos custos. Portanto, estratégias de manejo, considerando o tipo de vegetação e o uso de retardantes, são essenciais para mitigar os efeitos do fogo no Cerrado.

Palavras-chave: Savana Brasileira; Incêndios florestais; Retardante de fogo; Biomassa; Qualidade do solo; Conservação.

ABSTRACT

The Cerrado, one of the most biodiverse regions in the world, faces significant challenges due to frequent fires, which impact vegetation composition, soil quality, and agricultural and forest ecosystems. These fires are often intensified by climate change and human activities, drastically altering the natural dynamics of the system. This study sought to evaluate the effects of fire on different crops (sorghum, corn, pasture, and eucalyptus) in the Cerrado region of Goiás, in addition to testing the effectiveness of flame retardants in controlling the fires. The study was conducted at the UEG/Ipameri experimental farm. Five concentrations (0%, 10%, 15%, 20%, and 30%) of the monoammonium-based fire retardant were tested. Application was carried out using a backpack pump to ensure uniform distribution of the product across the plots. The variables analyzed were: environmental variables, flame temperature, fire propagation speed, flame height, fire intensity, biomass, and soil chemical components. The results showed that eucalyptus was most strongly associated with most of the variables that influence fire, especially high biomass load and low relative humidity. When comparing the different crops without the application of retardant, pasture stood out for its faster fire propagation, while sorghum recorded lower biomass consumption and corn had higher relative humidity, which is a predictor of fuel moisture. As for soil fertility, a temporary increase was observed after the burn, followed by a decline after six months. The fire retardant demonstrated effectiveness at a 30% concentration, significantly reducing flame height, temperature, and speed. The other concentrations tested (10%, 15%, and 20%) performed worse than the 30% concentration. Vegetation structure and climatic conditions influence fire behavior, as the quantity and arrangement of fuel determine flame intensity and speed, while factors such as temperature and humidity regulate fire height and temperature. Retardant presents a promising tool for fire control, directly reducing fuel flammability through thermal insulation. However, its widespread use still faces the challenge of high costs. Therefore, management strategies that consider the type of vegetation and the use of retardants are essential to mitigate the effects of fire in the Cerrado.

Keywords: Brazilian Savanna; Forest fires; Fire retardant; Biomass; Soil quality; Conservation.

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado, um dos domínios mais diversos do mundo, desempenha um papel crucial na conservação ambiental e na produção agrícola. No entanto, o Cerrado enfrenta desafios significativos, como incêndios frequentes, que podem ter origens naturais ou antrópicas (MACHIDA et al., 2021). Enquanto os incêndios naturais são comumente desencadeados por raios, especialmente no final da estação seca e início da estação chuvosa (SOUSA e CUNHA, 2020), a intervenção humana tem alterado significativamente o comportamento desses eventos (BERLINCK e BATISTA, 2020).

Nos últimos anos têm-se observado aumento significativo na ocorrência de incêndios descontrolados em áreas florestais e agrícolas, impulsionados por uma combinação de fenômenos naturais e fatores antrópicos (CARMENTA et al., 2021; TERZANO et al., 2021). As mudanças climáticas, marcadas pelo aumento da aridez e do aquecimento global, têm criado condições mais propícias para a propagação do fogo, como temperaturas mais altas e períodos de seca prolongados (TERZANO et al., 2021; GUO, 2023). Além disso, práticas humanas, como queimadas ilegais intencionais para a limpeza de terrenos ou expansão agrícola, agravam o problema, muitas vezes resultando em incêndios de grandes proporções e de difícil controle. Esses eventos não apenas causam a destruição de ecossistemas e a perda de biodiversidade, mas também liberam grandes quantidades de gases de efeito estufa, contribuindo ainda mais para o aquecimento global e criando um ciclo de degradação ambiental (TERZANO et al., 2021 e AGBESHIE, 2022).

A problemática do fogo está relacionada a diversos fatores. Dentre eles, a quantidade de biomassa seca presente no ambiente, associada à sua disposição espacial que pode alterar a intensidade e a propagação das chamas, impactando diretamente a severidade dos incêndios e suas consequências para o ecossistema (SOUSA e CUNHA, 2020; TERZANO et al., 2021). A intensidade do fogo é influenciada principalmente pela proporção de biomassa, como folhas secas, galhos e outros detritos vegetais, que servem como combustível altamente inflamável, facilitando a propagação e aumentando a intensidade dos incêndios (RISSI et al., 2017; TERZANO et al., 2021). A quantidade de matéria orgânica acumulada, está diretamente relacionada à intensidade e duração dos incêndios, com maiores cargas resultando em eventos mais severos. Ademais, a disposição e a continuidade desses materiais

combustíveis influenciam significativamente o comportamento de propagação do fogo, determinando sua velocidade e alcance (RISSI et al., 2017).

A biomassa varia de acordo com o tipo de vegetação, o que influencia diretamente o comportamento do fogo em cada uma delas. Assim, o combustível presente em cada tipo de vegetação resulta em consequências distintas durante um incêndio. Além do exposto, a frequência das queimadas pode interferir nas comunidades vegetais, causando variações nas espécies que as compõem (OYDEJI et al., 2023). Isso pode afetar a diversidade de funções desempenhadas e provocar mudanças nos serviços fornecidos pelo ecossistema (CONEGLIAN et al., 2018; RODRIGUES e FIDELIS, 2022; FERREIRA et al., 2023).

O fogo também pode influenciar nas características do solo, podendo variar amplamente entre efeitos positivos e negativos dependendo de diversos fatores, como as propriedades intrínsecas do solo, a frequência e a intensidade dos incêndios. A resposta do solo ao fogo é influenciada por sua resiliência, pelo tipo e qualidade da carga de combustível (ALEXANDER e CRUZ, 2021) e pelas condições em que o combustível se encontra antes da queima, como a umidade (MAGOMANI e TOL, 2019; TERZANO et al., 2021).

A queima de combustíveis rápidos, como gramíneas, transfere uma quantidade menor de calor para o solo e ocorre em um curto intervalo de tempo. Esse tipo de queima tende a gerar efeitos benéficos no ecossistema, como o aumento temporário da fertilidade do solo e a redução de material combustível acumulado, o que pode minimizar o risco de incêndios mais severos (MAGOMANI e TOL, 2019). Por outro lado, combustíveis que queimam lentamente, como madeira grossa e outros materiais densos, produzem maior quantidade de calor e o transferem ao solo por um período prolongado. Esse processo pode levar a efeitos mais severos no ecossistema, como a volatilização de nutrientes essenciais, a redução da matéria orgânica e a formação de uma camada hidrofóbica que dificulta a infiltração de água (MAGOMANI e TOL, 2019).

De acordo com Pellegrini et al. (2018), os incêndios exercem efeitos significativos sobre as características químicas do solo, reduzindo o estoque de nutrientes por meio de processos como volatilização, oxidação, transferência de cinzas e erosão. A volatilização, por exemplo, leva à perda de elementos como nitrogênio (N) e enxofre (S), que são liberados na forma de gases quando expostos a altas temperaturas. A oxidação da matéria orgânica também contribui para a diminuição de nutrientes essenciais, como o fósforo (P) e o magnésio (Mg), alterando a disponibilidade desses elementos para as plantas (PELLEGRINI

et al., 2021). Portanto, a intensidade e a frequência dos incêndios determinam o grau de degradação do solo (KALFAS et al., 2024).

Para o controle de incêndios na vegetação usam-se alguns produtos químicos à base de monoamônico, que são formulados para atuar como retardante de incêndios. Sua composição atua interrompendo o chamado "triângulo do fogo", fazendo o isolamento do combustível, um dos elementos essenciais para a manutenção das chamas. O triângulo do fogo nada mais é que um modelo conceitual que descreve os três componentes essenciais para a ocorrência e manutenção de uma combustão, sendo eles combustível, comburente e calor (TALAIA, 2023). O combustível refere-se a qualquer material inflamável, como madeira e folhas; o comburente é o oxigênio presente no ar, necessário para sustentar a reação química; e o calor representa a energia térmica que eleva a temperatura do combustível até o seu ponto de ignição. A remoção de qualquer um desses elementos é suficiente para extinguir ou prevenir o fogo (CROSSLEY, 2023; TALAIA, 2023). Sendo assim, os retardantes atuam de maneira específica no isolamento do combustível, estabelecendo uma barreira física que impede o contato do material inflamável com o oxigênio e o calor, elementos fundamentais para a ocorrência da combustão. Quando aplicado sobre a vegetação, forma-se uma película protetora que reduz significativamente a inflamabilidade dos materiais vegetais, dificultando a ignição e retardando a propagação das chamas.

Os retardantes de fogo têm sido amplamente estudados e aplicados no combate a incêndios florestais. Por exemplo, Ye et al. (2025) desenvolveram um retardante à base de amônia, projetado para auxiliar no controle de incêndios com eficiência. Paralelamente, Rivera et al. (2023) investigaram como a concentração de retardante aplicado à vegetação influencia o tempo de atraso da ignição, contribuindo para otimizar a sua aplicação em campo. Além disso, Xu et al. (2025) avançaram nessa área ao desenvolver um agente extintor de incêndios florestais baseado em hidrogel de sílica, que se destaca por ser eficaz, ecológico e capaz de proporcionar uma extinção rápida e eficiente das chamas.

Apesar da eficácia dos retardantes de fogo no combate a incêndios em áreas agrícolas e florestais, existem diversos desafios a serem enfrentados. Entre eles, destacam-se os riscos de contaminação ambiental, podendo afetar a germinação de sementes (WEBBER et al., 2023) os altos custos envolvidos e a ausência de diretrizes específicas sobre os volumes de aplicação e as concentrações adequadas para diferentes tipos de materiais combustíveis (LIMA et al., 2020), o que consiste em uma lacuna de conhecimento. Compreender a

interação entre os diferentes tipos de vegetação e as características do fogo é fundamental para o manejo adequado de incêndios, permitindo a mitigação de seus efeitos negativos (MAGOMANI e TOL, 2019). Diante desse cenário, este estudo buscou responder a duas questões centrais: (1) como o fogo afeta as vegetações de sorgo, milho, pastagem e floresta no Cerrado, do ponto de vista da biomassa e do solo? (2) Qual é a concentração ideal de retardante de fogo para o combate a incêndios nessas diferentes coberturas vegetais?

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar o efeito do fogo na composição química do solo na biomassa vegetal em culturas agrícolas e florestais, cultivadas no Cerrado, além e testar a eficácia do uso do um retardante de fogo.

2.2. Específicos

Avaliar o efeito do fogo em diferentes tipos de culturas agrícolas e florestais no Cerrado.

Mensurar a eficiência do retardante no controle do fogo em ambientes agrícolas e florestais no Cerrado.

Aferir a qualidade química solo sob os diferentes tipos de vegetação comparando a área antes e após a queimada controlada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido na fazenda experimental da Universidade Estadual de Goiás, Campus Sul – Unidade Universitária de Ipameri, situada no sudeste do estado de Goiás (Lat. 17° 42' 59,12" S, Long. 48° 08' 40,49" W), a uma altitude de 766 metros. Essa região integra o domínio Cerrado e possui clima classificado como Aw, tropical sazonal, com precipitação anual de aproximadamente 1.600 mm e duas estações climáticas bem definidas, com um inverno seco e um verão chuvoso (Figura 1). A temperatura média anual é de 24°C (UEG, 2025). O solo da área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, um tipo de solo característico do bioma Cerrado (SANTOS et al., 2018).

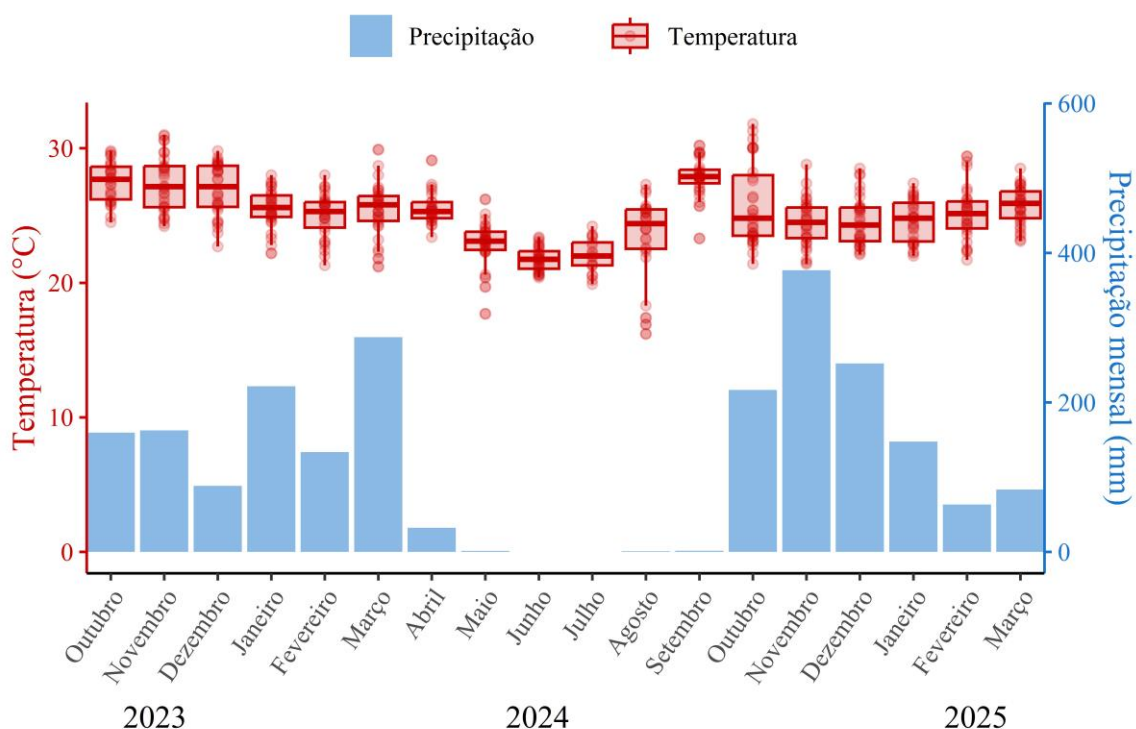


Figura 1. Precipitação mensal (barras azuis) e temperatura na fazenda experimental da UEG / Ipameri, entre outubro de 2023 e março de 2025 (período de condução do experimento). Os pontos em vermelho representam as médias diárias de temperatura em cada mês. Fonte dos dados: UEG, 2025.

A pesquisa foi realizada em quatro locais distintos dentro da fazenda experimental da UEG/Ipameri, abrangendo as culturas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto. A palhada de sorgo e milho, constituída pelos resíduos vegetais remanescentes após a colheita, foi utilizada como material combustível. Esses resíduos exercem a função essencial de proteger o solo e manter a sua fertilidade (OLIVEIRA et al., 2020). Para a área de pastagem, que é o capim braquiária, realizou-se a queima da vegetação em sua totalidade, enquanto na floresta de eucalipto foi utilizado o clone i144 com idade aproximada de 4 anos, sendo que a sua serapilheira foi utilizada como combustível.

Os tratamentos com retardantes foram aplicados em diferentes concentrações para avaliar os seus efeitos. A Tabela 1 detalha os tratamentos aplicados, começando pelo controle (T0), sem aplicação de retardante ou água, servindo como referência para comparação. Em seguida, o tratamento T1 recebeu apenas água que foi aplicada utilizando 20 litros em uma bomba costal, permitindo a avaliação do efeito isolado da água. Os tratamentos T2, T3, T4 e T5 envolveram a aplicação do retardante em concentrações crescentes de 10%, 15%, 20% e 30%, respectivamente, todos diluídos em 20 litros de água, esse volume foi escolhido para manter a capacidade operacional máxima da bomba costal utilizada. Ademais, a seleção dessas concentrações teve como objetivo avaliar a relação concentração-resposta do produto, testando tanto a faixa recomendada pelo fabricante (10-20%) quanto uma dosagem superior (30%), a fim de identificar o limiar de eficácia para diferentes cenários de risco de incêndio. Adicionalmente, a aplicação desses tratamentos em distintos materiais combustíveis (sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto) permitiu investigar a influência da natureza do combustível na eficiência das concentrações testadas.

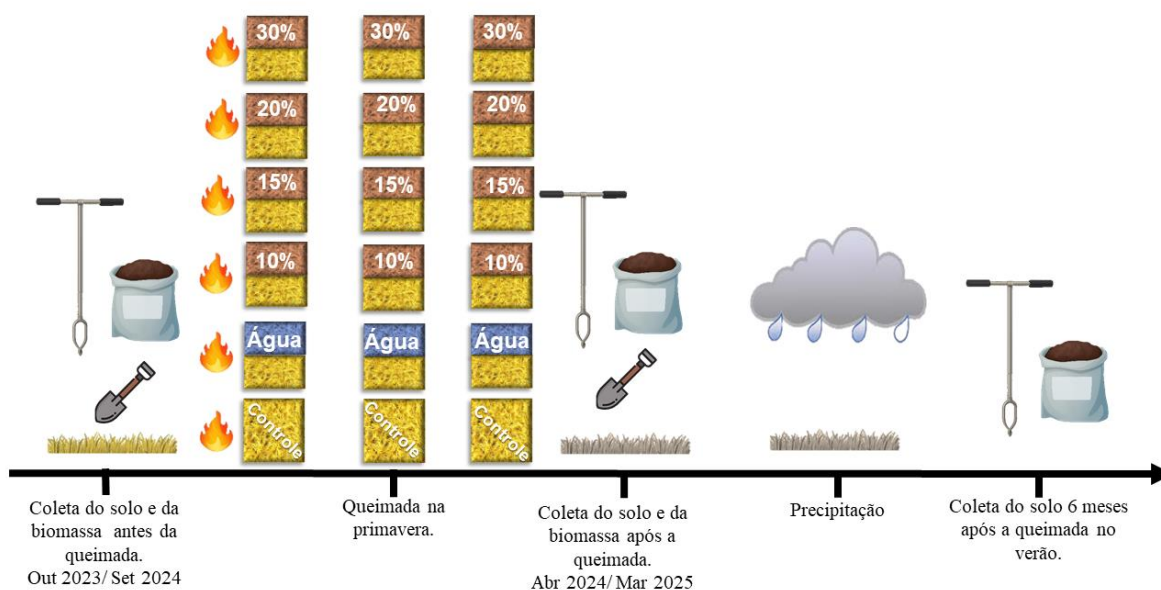
Tabela 1. Detalhamento dos tratamentos aplicados com o Retardante de chamas em diferentes concentrações.

Tratamentos	Descrição
T0 (Controle)	Sem aplicação de retardante chamas ou água
T1 (Água)	20 litros de água
T2 (10%)	Aplicação de 20 litros de solução contendo água (90%) e o retardante de chamas (10%)
T3 (15%)	Aplicação de 20 litros de solução contendo água (85%) e o retardante de chamas (15%)
T4 (20%)	Aplicação de 20 litros de solução contendo água (80%) e o retardante de chamas (20%)
T5 (30%)	Aplicação de 20 litros de solução contendo água (70%) e o retardante de chamas (30%)

3.2. Desenho experimental

O experimento foi conduzido entre outubro de 2023 e março de 2025. As parcelas foram delimitadas com enxada na vegetação de eucalipto, enquanto para os outros tipos de vegetação foi utilizado um trator para delimitar as parcelas. A distância entre as parcelas foi de 2 metros para garantir que o fogo não avançasse de uma parcela para a outra. Após a queima foram realizadas análises comparativas dos efeitos do fogo entre as áreas tratadas. Os tratamentos (T1 a T5) foram aplicados em metade de cada parcela experimental, destinando a outra metade como área-controle. Este delineamento foi crucial para assegurar que o fogo, uma vez iniciado, encontrasse uma frente de combustível contínua e homogênea, permitindo que se propagasse naturalmente da área não tratada para a área tratada. A aplicação foi realizada imediatamente antes do início do fogo, utilizando uma bomba costal (pulverizador) para garantir a distribuição uniforme do produto em toda a área. O fogo foi iniciado na parcela destinada à queima, com monitoramento contínuo para assegurar que as chamas permanecessem dentro dos limites previamente estabelecidos.

A área experimental total foi de 108 m², subdividida em 18 parcelas de 9 m² (3 x 3 m) cada. Essa configuração foi replicada para cada um dos tipos de vegetação estudados (sorgo, milho, pastagem e eucalipto), conforme ilustrado na Figura 2 e no Anexo 1. Nas parcelas, amostras de solo e biomassa foram coletadas em três momentos distintos, sendo eles 24h antes do fogo e 24h após o fogo e seis meses após o fogo. Essas amostras permitiram que houvesse análise das alterações na composição química do solo e na composição da biomassa vegetal, bem como a regeneração após o evento de queimada.



Fonte: Autores da pesquisa.

Figura 2. Exemplificação do croqui em cada tipo de vegetação e das coletas de biomassa e solo em diferentes períodos temporais.

3.3. Variáveis analisadas

3.3.1. Variáveis ambientais

As variáveis ambientais que foram monitoradas incluem: umidade relativa do ar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Os dados das variáveis ambientais foram coletados para os dias de condução das queimas controladas (dias 04 e 05 de outubro de 2023 e 12 e 13 de setembro de 2024), os quais foram fornecidos pela estação Meteorológica da Universidade Estadual de Goiás – Campus Sul Unidade Universitária Ipameri (UEG, 2025).

3.3.2. Temperatura da chama

Durante o processo de queima foram realizadas em média 35 medições da temperatura da chama, utilizando um termômetro infravermelho que possibilitou a aferição sem a necessidade de contato direto com o fogo. Isso ocorreu em cada parcela experimental, garantindo o registro contínuo e representativo das condições térmicas. Após a coleta dos dados, foi calculada a média das temperaturas registradas para cada parcela, o que permitiu uma análise detalhada das variações térmicas associadas ao processo de queima de cada tipo de vegetação.

3.3.3. Velocidade de propagação do fogo

A velocidade de propagação do fogo foi determinada da seguinte forma: houve o registro do tempo necessário para que a linha de fogo atravessasse completamente a parcela experimental. O monitoramento foi realizado com o auxílio de um cronômetro, que foi acionado no momento em que o fogo foi iniciado e interrompido assim que as chamas se extinguíram. A extinção do fogo ocorreu de duas formas a depender da parcela, sendo pela ausência de material combustível ou pela ação do retardante aplicado.

3.3.4. Altura da chama

A altura das chamas foi medida com o auxílio de uma trena eletrônica, utilizando uma estaca vermelha como referência visual. As medições foram realizadas quando as chamas atingiram a posição mais vertical possível em relação à estaca a fim de se obter uma

avaliação consistente. Esse método permitiu um monitoramento da altura das chamas, que forneceu dados utilizados nas análises.

3.3.5. Análises químicas do solo

As amostras de solo foram coletadas em seis pontos previamente definidos em cada croqui experimental. A coleta foi realizada utilizando um trado manual, introduzido na camada de 0 - 10 cm do solo, garantindo a representatividade da camada superficial, que é mais suscetível às alterações provocadas pelo fogo. Em seguida, o solo foi destorroado e peneirado em crivo de 2 milímetros, a fim de padronizar o material para as análises laboratoriais.

As análises químicas realizadas incluíram o pH em CaCl_2 e os teores de Al^{3+} , Ca, Mg e K, determinados conforme descrito por Teixeira et al. (2017). A partir desses resultados, calcularam-se a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC) e a saturação por base (Sat_Base) conforme método proposto pela EMBRAPA (2017).

O fósforo disponível (P) foi extraído via método da resina trocadora de íons e quantificado, seguindo a metodologia de Raij et al. (2001). O enxofre (S) foi determinado conforme a EMBRAPA (2017), e o carbono orgânico (C) que determinou a Matéria Orgânica (MO) pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio, de acordo com Teixeira et al. (2017). Os micronutrientes ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) foram extraídos com solução de DTPA pelo método DTPA-TEA proposto por Lindsay e Norvell (1978) e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. O boro (B) foi extraído por azomethina-H via método da água quente, seguindo Berger e Truog (1939).

As amostras de solo foram coletadas em três momentos distintos, sendo eles 24h antes da queima, em que se avaliou as condições iniciais do solo. 24h após a queima, onde houve a avaliação dos efeitos imediatos do fogo nas propriedades químicas do solo e seis meses após a queima em que se analisou o processo de recuperação do solo.

3.3.6. Intensidade do fogo

Outra variável analisada foi a intensidade do fogo, definida como a taxa de liberação de energia ou calor por unidade de comprimento da frente de fogo. Essa intensidade é calculada a partir do produto entre o poder calorífico do material combustível, a massa de combustível disponível e a velocidade de propagação do fogo, utilizando a equação proposta por Byram (1959):

$$I = H.W.r$$

Sendo, I= intensidade do fogo em kW.m⁻¹, H= poder calorífico em kj.kg⁻¹, W= peso do combustível disponível e r = velocidade de propagação m/s

O poder calorífico (H) foi determinado embasado na literatura para cada tipo de vegetação analisada, refletindo a energia potencial de liberação pelo material combustível. Sendo para o sorgo de 16,736 kj.kg⁻¹, o milho 17,192 kj.kg⁻¹, a floresta de eucalipto 19,170 kj.kg⁻¹ e a pastagem 17,743 kj.kg⁻¹ (BARBOSA et al., 2021; MOURA et al., 2019; NEIVA et al., 2018; PESSOA FILHO, 2013).

O peso do combustível disponível (W) foi estimado coletando-se a vegetação presente antes da queima, ao lado da parcela experimental. A velocidade de propagação (r) foi obtida através do monitoramento do tempo necessário para o avanço da linha de fogo ao longo das parcelas experimentais, conforme descrito anteriormente na sessão velocidade de propagação do fogo.

3.3.7. Quantificação de biomassa

Para a quantificação da biomassa em cada tipo de vegetação (palhada em sorgo milho, biomassa completa em pastagem e serapilheira em eucalipto) amostras representativas foram coletadas com o auxílio de um gabarito de 1 m². Isso foi feito no princípio de que as características da vegetação contida no quadrado amostral são passíveis de extrapolação para toda a área de estudo, permitindo uma inferência das características da população. A coleta foi realizada ao lado das parcelas experimentais, com o propósito de preservar as condições originais dentro das parcelas e evitar qualquer interferência nos processos de queima. A biomassa coletada foi acondicionada em sacos plásticos para evitar a perda de material durante o transporte e armazenada em local fresco e seco para evitar a degradação antes da secagem em estufa. Em seguida, foi pesada em uma balança convencional para determinar a massa fresca. Posteriormente, as amostras coletadas foram submetidas à secagem em estufa a 75°C por um período de 72 horas. Após a secagem, o material foi novamente pesado para determinar a massa seca. Após o fogo, a biomassa após a queima (BAQ) nas parcelas experimentais foi coletada utilizando o mesmo gabarito.

A partir da massa seca e da BAQ, determinou-se a biomassa consumida (%) utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Biomassa consumida (\%)} = (\text{massa seca} - \text{BAQ}) / \text{massa seca} \cdot 100$$

3.4. Procedimentos estatísticos

As análises estatísticas dos dados foram realizadas utilizando o *software* R Studio (R CORE TEAM, 2022), sendo adotados os seguintes procedimentos:

Os dados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA), por correlação. Além disto, foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas, cujos resultados foram sintetizados em um correlograma, com uso do pacote *corrplot* (WEI e SIMKO, 2021).

Os dados sobre as características do fogo em cada área estudada, a quantidade de biomassa vegetal e das variáveis do solo presente nesses locais foram submetidos à análise multivariada de variância (MANOVA), cujos resultados foram usados para proceder a análise de variável discriminante canônica (SILVA, 2016), utilizando o pacote *candisc* (FRIENDLY e FOX, 2021).

Para comparar o comportamento das variáveis do fogo nos diferentes sistemas agrícolas foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis e o teste LSD (*Fisher's Least Significant Difference*) – não paramétrico – para a comparação múltipla dos tratamentos. Esta análise foi conduzida utilizando o pacote *agricolae* (MENDIBURU, 2021).

Adicionalmente, para os dados das variáveis do fogo coletados para as diferentes concentrações do retardante de chamas, foi realizada a análise de regressão no intuito de modelar e indicar as melhores concentrações para o controle do fogo nos diferentes sistemas agrícolas.

4. RESULTADOS

4.1. Relação entre as variáveis do fogo, de biomassa e climáticas

Foram encontradas correlações significativas entre as variáveis analisadas (Figura 3). Entre as variáveis de biomassa, observou-se uma positiva correlação entre massa seca e massa fresca ($r = 0,81$).

Com relação às variáveis do fogo, a biomassa consumida apresentou correlação positiva com massa seca ($r = 0,82$) e com altura da chama ($r = 0,69$). A altura da chama correlacionou-se positivamente com a massa fresca ($r = 0,65$), a temperatura da chama ($r = 0,74$) e a intensidade do fogo ($r = 0,71$). Por fim, a intensidade do fogo também mostrou correlação positiva com a massa fresca ($r = 0,66$) e a temperatura da chama ($r = 0,70$) (Figura 3).

Entre os fatores ambientais, a umidade relativa do ar apresentou correlação negativa com variáveis do fogo: temperatura da chama ($r = -0,71$), altura da chama ($r = -0,63$) e velocidade de propagação das chamas ($r = -0,65$), além da temperatura do ar ($r = -0,66$). A velocidade do vento, por sua vez, correlacionou-se negativamente com a temperatura do ar ($r = -0,82$) e positivamente com a umidade relativa do ar ($r = 0,83$) (Figura 3).

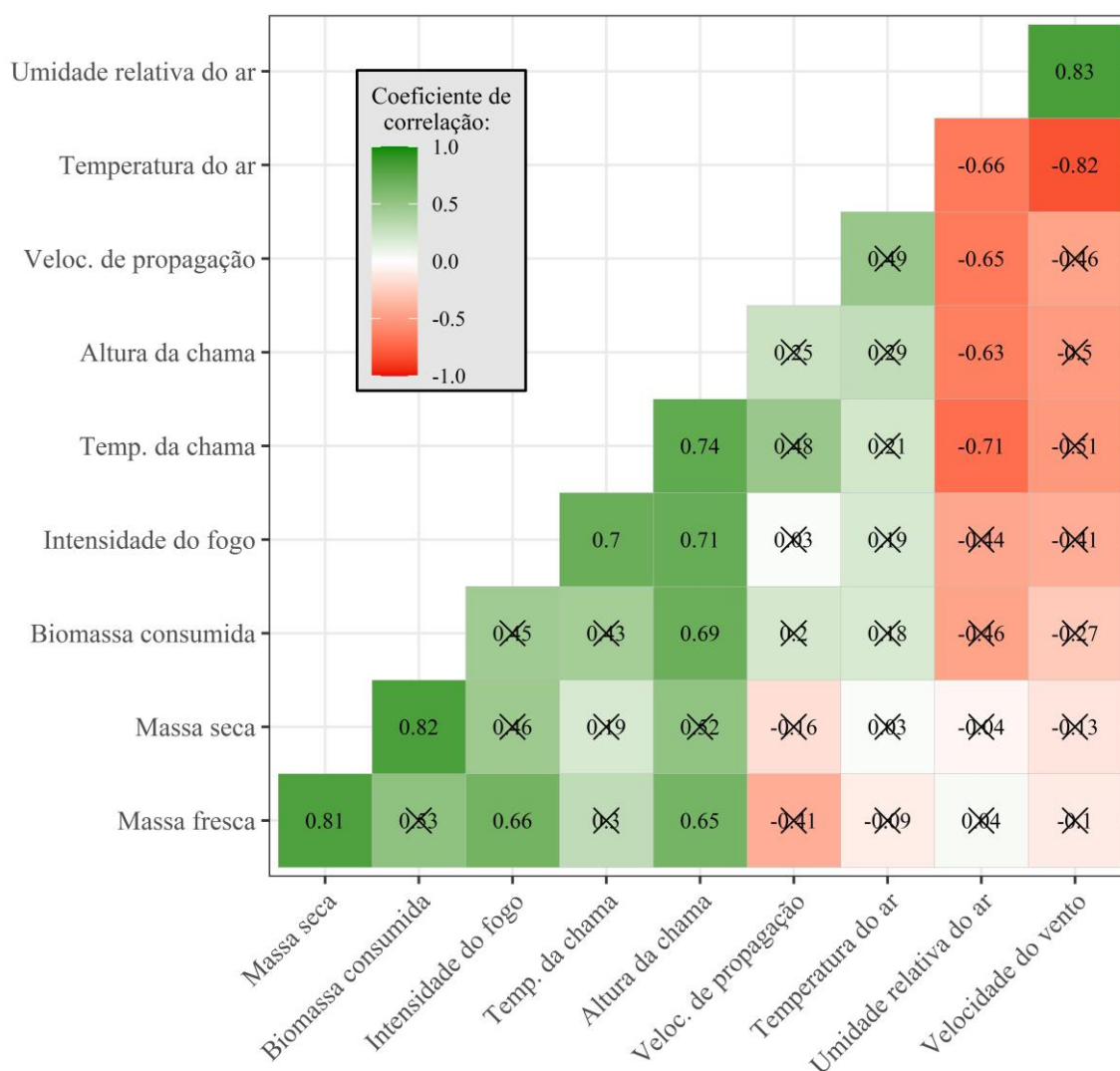


Figura 3. Resultado da análise de correlação de Pearson, contendo os valores dos coeficientes de correlação (r) entre as variáveis de biomassa, climáticas e do fogo durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024, em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto. As variáveis analisadas incluem: umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (km/h), velocidade de propagação do fogo (m/s), massa fresca (g/m^2), massa seca (g/m^2), intensidade do fogo (kW/m), altura da chama (cm), biomassa consumida (g/m^2), temperatura da chama ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$). Valores de r sobrepostos com X indicam correlação não significativa ($p > 0,05$), enquanto valores de r não sobrepostos por X indicam associação significativa entre as variáveis ($p \leq 0,05$).

4.2. Comportamento do fogo em relação às culturas e ao solo

Foi perceptível por meio da análise de componentes principais (PCA) a segregação das amostras provenientes das culturas de sorgo, milho, pastagem e eucalipto (Figura 4). Os dois primeiros eixos da PCA explicaram 74,9% da variabilidade total dos dados (Eixo 1 = 47,9%; Eixo 2 = 27,0%), revelando padrões distintos de comportamento entre as variáveis

estudadas nas diferentes vegetações. O cultivo de eucalipto posicionou-se com tendência ao quadrante superior direito, associado aos maiores valores de massa seca e fresca entre as culturas avaliadas. Essa elevada quantidade de material combustível está associada à intensidade do fogo, temperatura da chama, altura de chama e biomassa consumida. A cultura do milho concentrou-se no quadrante superior esquerdo, em associação com umidade relativa do ar e velocidade do vento. Em relação à massa seca, ela foi intermediária, ficando abaixo dos valores observados para o eucalipto, mas acima dos registrados para o sorgo. O cultivo do sorgo apresentou uma distribuição com tendência de posicionamento no quadrante inferior esquerdo, estando inversamente relacionado à massa seca, intensidade do fogo, temperatura da chama, altura da chama, velocidade de propagação, da temperatura do ar e a biomassa consumida. A pastagem posicionou-se com tendência ao quadrante inferior direito do gráfico, alinhando-se mais aos vetores de velocidade de propagação e temperatura do ar. Entre as culturas avaliadas, ela exibiu menor massa seca, além de demonstrar uma relação intermediária com os parâmetros associados.

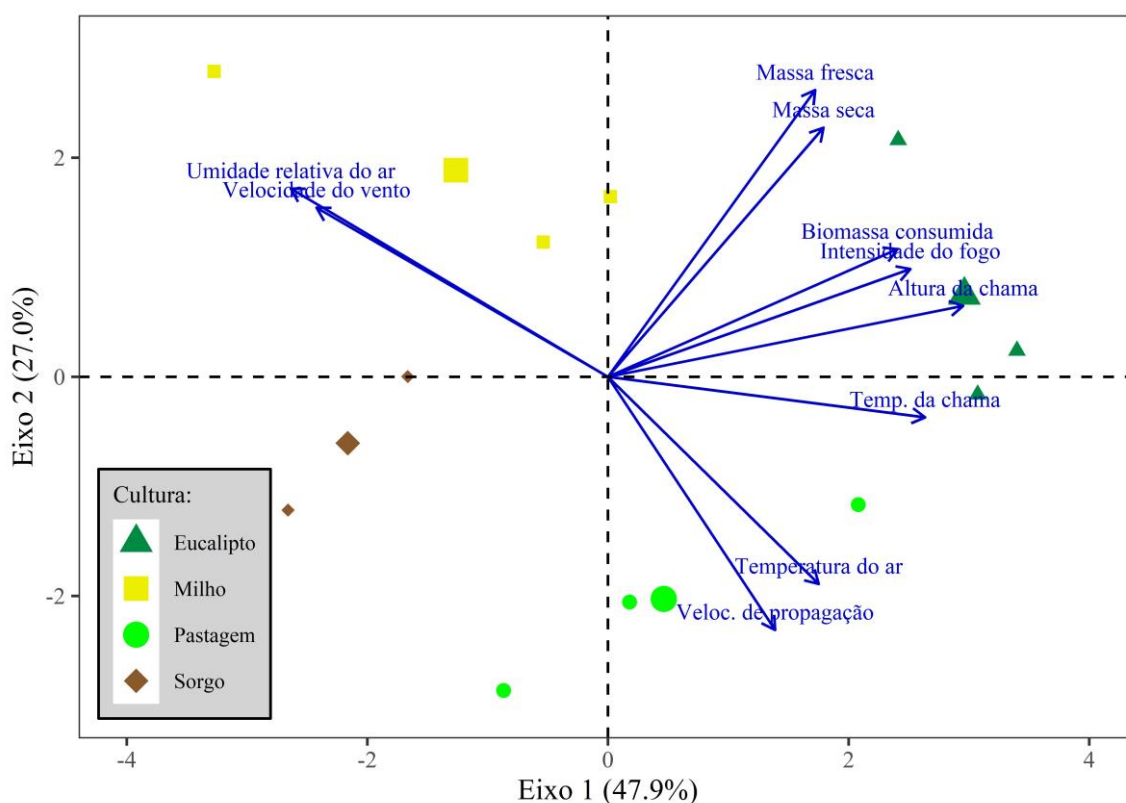


Figura 4. Resultado da análise de componentes principais (PCA) para os dados relacionados ao comportamento do fogo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024. As variáveis analisadas incluem: umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (km/h), velocidade de

propagação do fogo (m/s), massa fresca (g/m^2), massa seca (g/m^2), intensidade do fogo (kW/m), altura da chama (cm), biomassa consumida (g/m^2), temperatura da chama ($^{\circ}\text{C}$) e temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Os resultados mostram que a área com eucalipto apresentou os maiores valores de massa fresca ($924,85 \text{ g/m}^2$), enquanto a pastagem registrou os menores valores dessa variável ($414,66 \text{ g/m}^2$), com milho e sorgo em valores intermediários. Para a biomassa consumida o eucalipto teve a maior média enquanto o sorgo a menor. O milho e pastagem não se diferiram estatisticamente das culturas (Figura 5).

Em relação à altura das chamas, o eucalipto obteve a maior altura média das chamas, com $264,33 \text{ cm}$, enquanto o milho ($157,83 \text{ cm}$) e a pastagem ($176,66 \text{ cm}$) tiveram alturas das chamas intermediárias e a altura da chama mais baixa foi observada na área com sorgo ($91,5 \text{ cm}$). O eucalipto apresentou a maior temperatura média da chama ($695,81^{\circ}\text{C}$) não se diferenciando estatisticamente da pastagem com $621,30^{\circ}\text{C}$. O sorgo/milho ($594,07^{\circ}\text{C}$ e $544,38^{\circ}\text{C}$, respectivamente) tiveram os menores valores. A velocidade de propagação do fogo foi maior na pastagem e no sorgo, enquanto o milho e o eucalipto apresentaram valores inferiores para essa variável. Para variável intensidade do fogo, quem se sobressaiu com a maior média foi o eucalipto ($204,01 \text{ kW/m}$) e as demais culturas obtiveram os menores valores, sendo estatisticamente semelhantes (Figura 5).

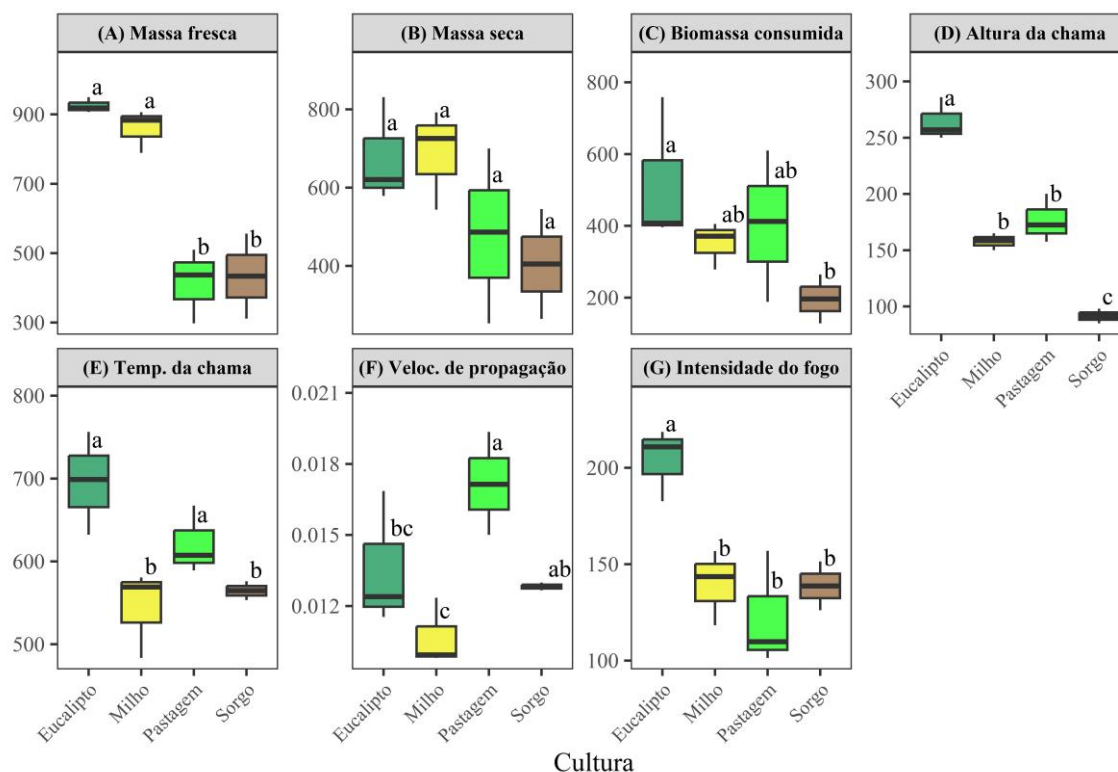


Figura 5. Comparação dos parâmetros relacionados ao comportamento do fogo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024. As variáveis analisadas incluem: altura da chama (cm), biomassa consumida (g/m²), intensidade do fogo (kW/m), massa fresca (g/m²), massa seca (g/m²), temperatura da chama (°C), velocidade de propagação do fogo (m/s). Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente ($p \leq 0,05$) pelo teste LSD (*Fisher's Least Significant Difference*) complementar ao teste de Kruskal-Wallis.

Os atributos químicos do solo nas diferentes culturas foram ordenados por meio da PCA (Figura 6), em que os dois eixos explicaram 77,5% da variabilidade total dos dados (Eixo 1 = 58,0%; Eixo 2 = 19,5%). É perceptível que milho e sorgo agrupam-se no quadrante direito associados aos vetores de maior fertilidade do solo (pH, saturação de bases, MO, P, K, Ca, Mg, S e CTC). Esses resultados indicam que os solos dessas áreas apresentam maior fertilidade química. Em contrapartida, a pastagem e o eucalipto posicionaram-se no lado esquerdo do gráfico, ou seja, no lado oposto, associado principalmente ao vetor H+Al e distantes dos vetores relacionados a fertilidade do solo, em outras palavras, a disponibilidade de nutriente.

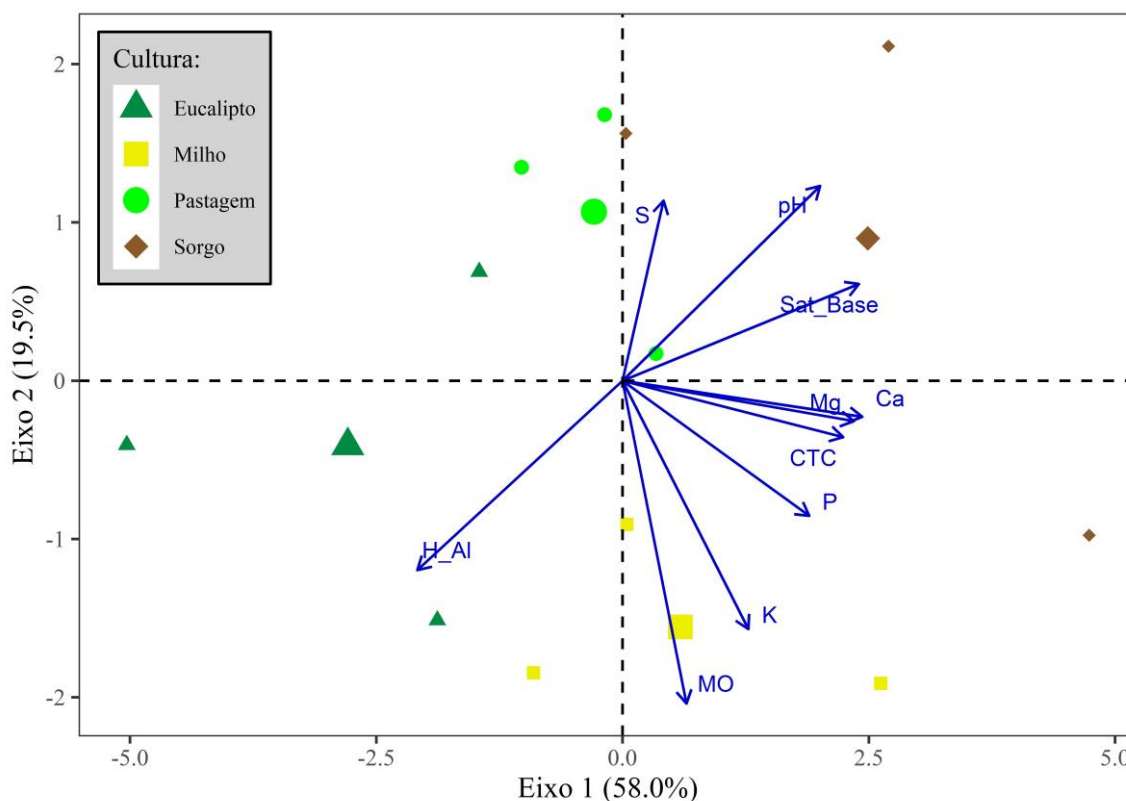


Figura 6. Representação gráfica da análise de componentes principais (PCA) sobre os atributos químicos do solo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024, sendo: Matéria Orgânica (MO), Potássio (K), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Fósforo (P), Hidrogênio + Alumínio (H_Al), Cálcio (Ca), potencial Hidrogeniônico (pH), Saturação por base (Sat_Base).

Os teores de micronutrientes do solo das culturas de eucalipto, pastagem, milho e sorgo evidenciaram distintas ordenações das culturas. Isso foi apresentado na PCA (Figura 7) em que o Eixo 1 (41,8%) e o Eixo 2 (27, 0%) explicam juntos cerca de 68,8% da variabilidade dos dados. O milho e o sorgo concentraram-se no quadrante esquerdo, associando-se principalmente aos teores de cobre (Cu), manganês (Mn) e zinco (Zn), sugerindo que esses elementos estão mais relacionados a essas culturas. Por outro lado, a área com pastagem posicionou-se no quadrante inferior direito, indicando menor associação com os micronutrientes avaliados. O eucalipto mostrou maior proximidade com os vetores de ferro (Fe) e boro (B).

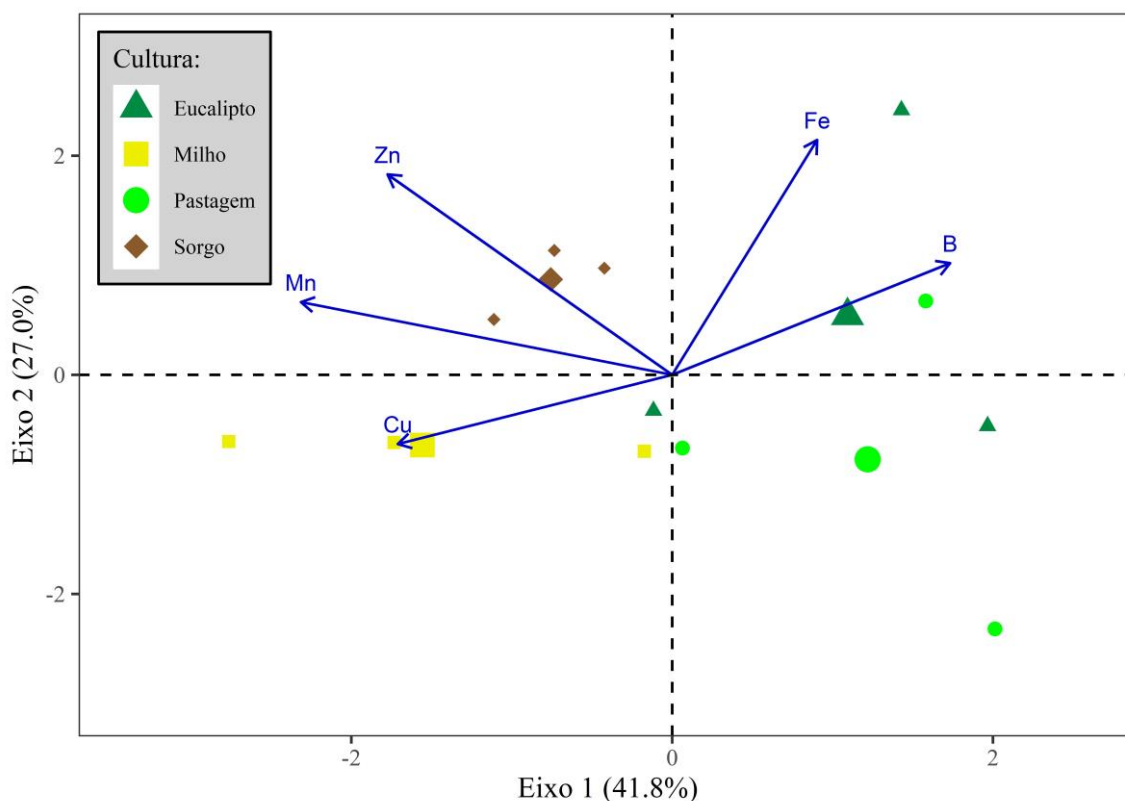


Figura 7. Representação gráfica da análise de componentes principais (PCA) sobre os teores de micronutrientes do solo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024, sendo: Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Enxofre (S) e Zinco (Zn).

O fogo mostrou efeito temporal sobre os atributos químicos do solo no Cerrado, evidenciando transformações induzidas pela queima e implicações para o solo. A Análise das variáveis discriminantes canônicas mostra que os eixos 1 e 2 explicaram 56,8%; e 43,2% da variabilidade dos dados, respectivamente (Figura 8). Em um dia depois da queima (1DDQ) observou-se um pico de fertilidade representado por elevação nos teores de pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), MO, saturação por bases (Sat_Base) e CTC. Entretanto, seis meses depois da queima (6MDP), os dados indicam o retorno parcial às condições originais com o declínio dos nutrientes anteriormente acumulados, exceto para os níveis de H+Al.

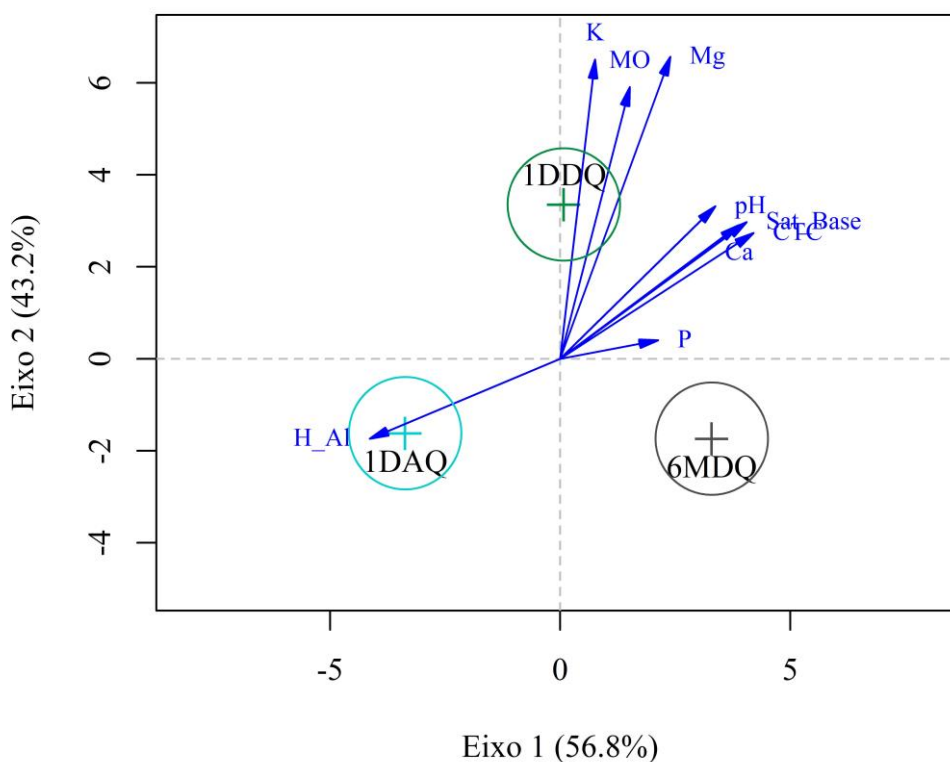


Figura 8. Representação gráfica da análise de variáveis discriminantes canônicas sobre os atributos químicos do solo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024, sendo: Matéria Orgânica (MO), Potássio (K), Magnésio (Mg), Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Fósforo (P), Hidrogênio + Alumínio (H_Al), Cálcio (Ca), potencial Hidrogeniônico (pH), Saturação por base (Sat_Base). 1DAQ (1 dia antes da queima), 1DDQ (1 dia depois da queima), 6MDP (6 meses após a queima).

4.3. Concentrações do retardante nas diferentes culturas

A análise de regressão (Figura 9) demonstra uma clara tendência de redução na altura, temperatura e velocidade de propagação das chamas à medida que se aumenta a concentração do retardante de chamas, tanto em culturas agrícolas quanto florestais. O elevado valor do coeficiente de determinação (R^2) demonstra a robustez da análise, indicando que o modelo explica satisfatoriamente a variação observada nos dados experimentais. No primeiro gráfico (Figura 9A) observa-se que a altura da chama diminui linearmente com o aumento das concentrações de retardante em todas as culturas. A tendência em eucalipto se mostrou decrescente e mais acentuada do que nas demais culturas, de maneira que, a cada aumento unitário nas concentrações retardante se tem um decréscimo de 5,23 cm na altura da chama. No sorgo o efeito foi menos acentuado, pois a cada aumento

unitário nas concentrações do retardante se tem um decréscimo de 1,99 cm na altura da chama. No milho e na pastagem o seu decréscimo foi intermediário.

No segundo gráfico (Figura 9B), a temperatura da chama apresentou uma redução linear com o aumento das concentrações de retardante. Os decréscimos médios por unidade de concentração variaram entre as biomassas analisadas, sendo mais acentuado na pastagem cerca de 4,29 °C e menos expressivo no milho de cerca de 2,36 °C. O mesmo comportamento foi observado na velocidade de propagação das chamas (Figura 9C), a qual foi afetada de forma significativa com o uso do retardante. De modo que, com o aumento da concentração do produto, a propagação do fogo ao longo do material combustível foi gradualmente reduzida, evidenciando o papel do retardante na desaceleração do avanço das chamas.

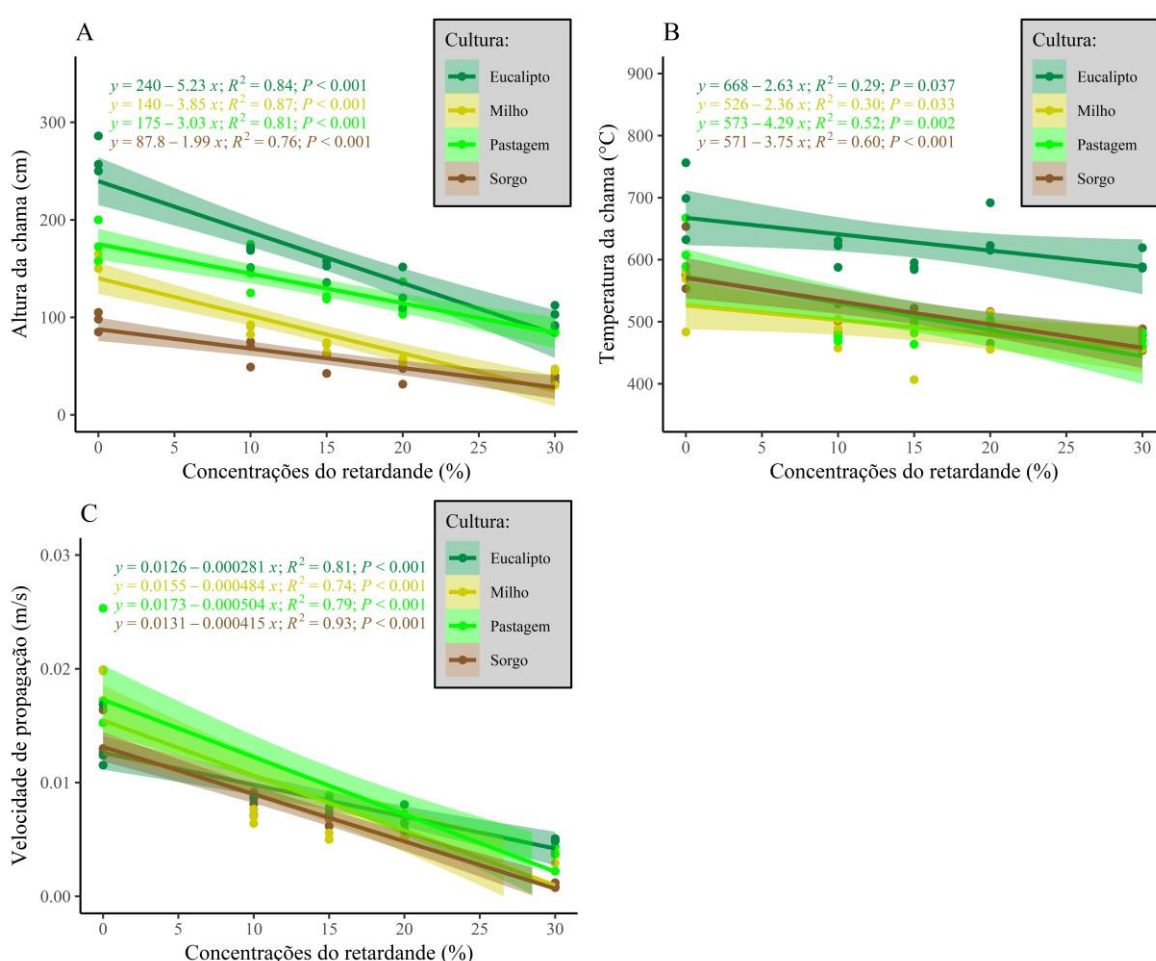


Figura 9. Relação entre concentrações do retardante (%) e a altura da chama (cm) (A), temperatura da chama (°C) (B) e velocidade de propagação (m/s) (C) em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024. Regressões lineares ajustadas para as culturas de eucalipto, milho, pastagem e sorgo. As equações de regressão, coeficientes de determinação (R^2) e valores de significância estão indicados para cada cultura. As áreas sombreadas representam os intervalos de 95% de confiança das regressões.

A comparação dos parâmetros de comportamento do fogo (Figura 10) revela diferenças significativas entre os tratamentos com água, controle, retardante 15% e retardante 30%, para as culturas de eucalipto, milho, pastagem e sorgo. No geral, a água demonstrou eficiência no controle das variáveis relacionadas ao fogo em comparação ao tratamento controle, para a redução da altura, temperatura e velocidade de propagação da chama. No entanto, sua eficácia foi inferior ao retardante de chamas, que apresentou desempenho superior na redução dessas variáveis.

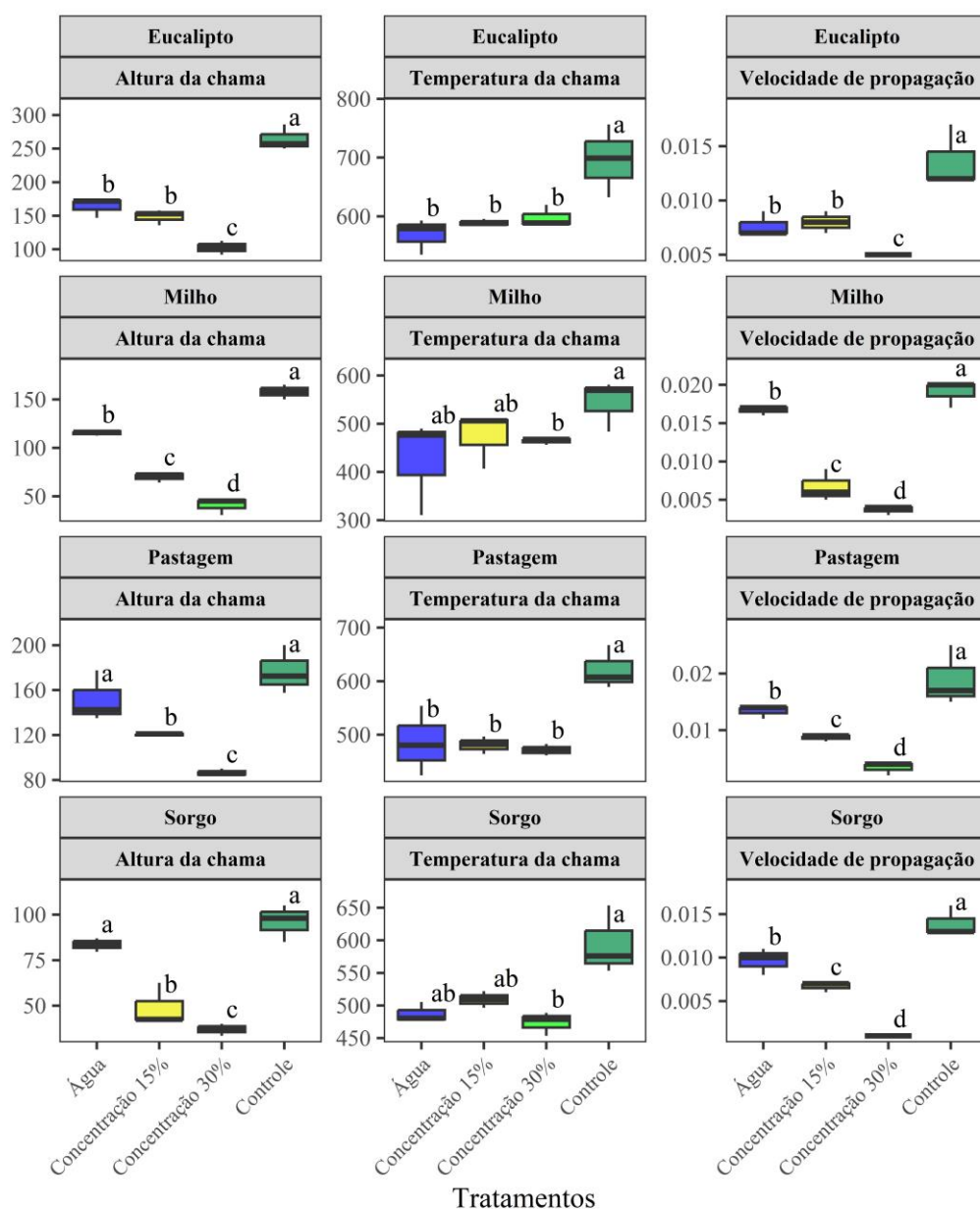


Figura 10. Comparação dos parâmetros relacionados ao comportamento do fogo em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024. Submetidas a quatro tratamentos: água, controle e concentrações de 15% e de 30% do retardante de chamas. As variáveis analisadas foram:

altura da chama (cm), temperatura da chama (°C) e velocidade de propagação do fogo (m/s). Médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente ($p \leq 0,05$) pelo teste LSD (*Fisher's Least Significant Difference*) - complementar ao teste de Kruskal-Wallis.

5. DISCUSSÃO

A correlação positiva entre massa seca e massa fresca (Figura 3) sugere que a quantidade de biomassa úmida é um preditor direto da biomassa seca disponível para queima. De maneira que, a massa seca é um fator chave na liberação de energia. Conforme Cruz et al. (2025), a disponibilidade de biomassa seca influencia diretamente a taxa de propagação do fogo e sua intensidade, sendo um dos principais determinantes da severidade dos incêndios em culturas agrícolas e florestais.

A intensidade do fogo e as variáveis massa fresca, temperatura da chama e altura da chama se relacionaram positivamente reforçando que fogos mais intensos estão associados a maior quantidade de combustível e, conseqüentemente, leva a temperaturas térmicas mais elevadas. Isso corrobora com o afirmado por Lorenzon et al. (2018) que a intensidade de calor gerada pela combustão é determinada pela quantidade de material combustível que, conjuntamente com fatores climáticos, podem afetar a proporção e a severidade de um incêndio.

A associação positiva observada entre altura da chama, massa fresca, biomassa consumida, intensidade do fogo e temperatura da chama pode ser explicada pela disponibilidade de massa fresca e biomassa consumida. Pois, é um reflexo direto dos princípios físicos da combustão a maior disponibilidade de combustível, que implica em maior quantidade de energia potencial disponível para ser liberada (GARG et al., 2021). A associação positiva entre altura chama e intensidade do fogo pode ser explicada, pois um fogo de maior intensidade libera mais energia por segundo. Essa energia aquece, cria maior combustão e resulta visualmente em uma chama mais alta. Isso corrobora com Byram (1959), que integra estes conceitos. Ademais, chamas mais altas tendem a apresentar temperaturas mais elevadas e isso foi demonstrado no estudo desenvolvido por Guo et al. (2025), que observaram em experimentos controlados que chamas com alturas superiores resultaram em temperaturas médias mais altas devido à maior liberação de energia por unidade de área em incêndios em copas de ciprestes.

As correlações negativas observadas entre a umidade relativa do ar, temperatura da chama, altura da chama e velocidade de propagação evidenciaram que a umidade do combustível, influenciada pelo clima, é determinante no comportamento do fogo

(ROSAVEC et al., 2025). Assim, esses resultados corroboram com Newberry et al. (2020) que destacam a umidade relativa do ar como fator moderador da inflamabilidade. Uma vez que ambientes úmidos reduzem a eficiência da combustão ao exigir energia adicional para evaporar a água presente no combustível, diminuindo a taxa de liberação de calor (LI et al., 2025).

O eucalipto obteve alta relação com a quantidade de combustível (massa seca/fresca), associada às variáveis do fogo, reforçando o papel da biomassa acumulada nos incêndios florestais conforme mostra a PCA (Figura 4). De acordo com Woiciechowski et al. (2019), o acúmulo contínuo de serapilheira em plantações de eucalipto aumenta significativamente o risco de incêndios, pois a biomassa seca representa uma carga de combustível altamente inflamável, favorecendo a perpetuação do fogo e a intensificação da queima.

O milho mostrou-se associado a umidade relativa do ar e velocidade do vento que reduziram a eficiência combustiva, diminuindo significativamente a velocidade de propagação do fogo. Esses fatores ambientais, juntamente com a estrutura do combustível, modularam fortemente a intensidade do fogo. Corroborando com o demonstrado por Su et al. (2025), embora ventos fortes intensifiquem a propagação de incêndios em condições de baixa umidade, eles podem exercer efeito supressor quando associados a sistemas convectivos capazes de transportar umidade para a região.

Na área de sorgo foi possível observar a desconexão entre as variáveis de biomassa, fogo e climáticas analisadas em comparação as outras culturas, isso pode ser explicado devido à distribuição da biomassa e a pouca quantidade de palhada no solo, que dificultam a propagação contínua do fogo, embora picos de intensidade tendem a surgir em áreas com maior concentração da palhada de sorgo. O que está alinhado com o estudo de Cruz et al. (2020) que demonstrou que plantações homogêneas de trigo favorecem uma rápida propagação do fogo devido à alta carga de combustível e à conectividade do material vegetal.

A pastagem apresentou baixos valores para a biomassa, mas maior velocidade de propagação e temperatura do ar. Esse padrão está de acordo com Simpson et al. (2022), que demonstram que, mesmo com pouca biomassa, a continuidade da vegetação rasteira facilita a propagação e a baixa umidade relativa pode acelerar o fogo. Contudo, em variáveis como intensidade, altura e temperatura das chamas, a pastagem obteve valores intermediários, diferindo de Luz et al. (2023), que observaram valores maiores no que tange as características do fogo na espécie de gramínea *Aristida adscensionis*, sendo a velocidade de propagação de 0,0335 m/s e a altura da chama de 161,67 cm.

Fazendo a análise comparativa entre as culturas (Figura 5) é perceptível que a quantidade de biomassa é um fator que influencia no comportamento do fogo, conforme demonstrado por Alvarado et al. (2020). Isso ficou evidente em eucalipto, que, com sua alta carga de combustível (924,85g/m² de biomassa fresca), registrou os valores mais elevados para a maioria das variáveis do fogo.

Em relação a biomassa consumida, o sorgo registrou o menor percentual de consumo. Este resultado é atribuído principalmente ao espaçamento entre os caules de diferentes linhas de plantio, que dificultou a continuidade da queima e a propagação do fogo, limitando a consumo total do material disponível. Segundo Cruz et al. (2020), a disposição do material combustível é um fator determinante para a perpetuação da queima. De forma semelhante, o milho também apresentou um consumo relativamente baixo da biomassa, devido ao elevado volume de espigas que são estruturas ricas em lignina e elevam a quantidade de sua matéria seca (QUINALUISA et al., 2025). Este composto promove resistência à degradação térmica, impedindo uma queima completa e eficiente (MORALES et al., 2024). O eucalipto em relação a pastagem teve uma biomassa consumida menor. Este valor é explicado pela natureza lenhosa do material e, também, pelo seu alto teor de lignina. Por fim, a pastagem apresentou o maior percentual de biomassa consumida devido à combinação de sua estrutura fina e o estado de seco do material, condições ideais para uma queima quase completa (NGUYEN et al., 2025).

A serapilheira de eucalipto apresentou as chamas mais altas (264,33 cm), devido à sua maior densidade e composição lenhosa, enquanto o sorgo, com material herbáceo menos denso, registrou as menores alturas das chamas (91,5 cm). Isso está de acordo com Barker et al. (2022), que destaca que a biomassa do material combustível exerce influência determinante na altura das chamas durante os incêndios.

Os elevados valores de temperatura da chama no eucalipto resultam da combinação entre a sua alta carga de combustível lenhoso e a baixa umidade, condições que favorecem a combustão energética. Já na pastagem, conforme Vitali et al. (2022), sua estrutura permite maior oxigenação, o que compensa a menor biomassa, explicando seu padrão térmico distinto. O sorgo e o milho apresentaram maior umidade relativa do ar no dia da sua queima, que atua como moderador térmico e reduz diretamente a temperatura da chama (FERNÁNDEZ-GUISURAGA e CALVO, 2025). Os valores de velocidade de propagação variaram conforme as características estruturais de cada vegetação. Sendo que, a pastagem, devido à sua homogeneidade e baixo porte favoreceu a propagação contínua do fogo,

enquanto a arquitetura aberta do sorgo facilitou o fluxo de ar e calor, resultando em padrões distintos de propagação entre as culturas (SIMPSON et al., 2022). Em contraste, no eucalipto, a serapilheira compactada, e no milho, a influência da umidade relativa do ar sobre o material vegetal, demandaram maior energia para a propagação do fogo.

A maior intensidade do fogo observada em eucalipto e inferior para as demais culturas sugere que o tipo de combustível é um fator determinante para essa variável. Conforme Guerrero et al. (2022), o estudo com *Eucalyptus globulus* demonstrou que a serapilheira apresenta alta inflamabilidade devido à presença de terpenos e óleos essenciais voláteis.

Os maiores valores em relação aos atributos do solo (Figura 6) foram associados ao sorgo e ao milho, isso ocorreu devido ao manejo agrícola intensivo, incluindo calagem e adubação que promovem a redução da acidez e a elevação da disponibilidade de nutrientes essenciais (DIAS et al., 2019). Enquanto os menores valores em relação aos atributos do solo foram associados ao eucalipto e a pastagem, o que indica que solos menos corrigidos tem o comportamento nutricional influenciado pela ciclagem conservativa, em que há pouca adubação externa e a cultura depende da reciclagem dos próprios resíduos vegetais, o que pode limitar o enriquecimento do solo se houver baixa produção de matéria orgânica (REGASA et al., 2024). Esse padrão também está diretamente relacionado à elevada qualidade da palhada dessas culturas, que apresentam baixos teores de lignina. Essa característica favorece uma decomposição mais acelerada e, conseqüentemente, maior liberação de nutrientes no solo (MORALES et al., 2024). Em contraste, nas áreas com eucalipto e pastagem, os teores de lignina são mais elevados, o que resulta em uma decomposição mais lenta e menor disponibilidade imediata de nutrientes.

Como as áreas de coleta do solo foram influenciadas pelo fogo, é perceptível que a diferença entre ambientes seja atribuída ao manejo agrícola (calagem, adubação) em sorgo e milho que compensa as perdas nutricionais pós-queima. Na vegetação da pastagem e do eucalipto, sem intervenção corretiva periodicamente, tendem a perpetuar condições de baixa fertilidade e alta acidez, reforçando a dicotomia edáfica identificada (OLIVEIRA et al., 2021).

A análise dos micronutrientes revelou maior acúmulo de Fe e B no eucalipto, padrão associado à acidez do solo (H+Al), conforme apresentado na Figura 6. A acidez favorece a solubilização do ferro (Fe), como apontado por Molnar et al. (2023), enquanto a baixa mobilidade do boro (B) no solo, característica que limita sua lixiviação, favorece seu

acúmulo na camada superficial (JORDÁN et al., 2025). Esses fatores explicam o padrão observado no eucalipto.

O padrão observado nas variáveis discriminantes canônicas (Figura 8) em 1 dia depois da queima corrobora com estudos prévios de Chungu et al. (2020) que registraram aumento de nutrientes após a queimada em *Eucalyptus grandis*, enquanto Vishvamitera et al. (2022) confirmaram o efeito transitório após o fogo. Agbeshie et al. (2022) destacam que queimadas de baixa intensidade elevam o pH e a disponibilidade de nutrientes via cinza, devido a mineralização da matéria orgânica, já incêndios severos reduzem a fertilidade pela volatilização de matéria orgânica, padrão consistente com solos arenosos ácidos do Cerrado goiano, onde a resposta nutricional inicial é temporária. O retorno parcial as condições originais 6 meses depois da queima pode ser atribuído a fatores como lixiviação, erosão superficial, absorção pelas espécies em regeneração, fatores que tornam o solo progressivamente mais vulnerável (SILVA et al., 2019). A posição intermediária em 6 meses depois da queima no espaço canônico reforça essa tendência de resiliência parcial, mas sem retorno completo ao estado antes do fogo, o que sugere uma alteração não duradoura nos processos de retenção e disponibilização de nutrientes. Tal comportamento é especialmente preocupante sob cenários de queimadas frequentes, em que os pulsos de fertilidade não são acompanhados de mecanismos naturais de reposição de matéria orgânica e nutrientes do solo (NAVAL et al., 2025).

A tendência explicada na Figura 9 está em consonância com o estudo de Fiedler et al. (2020), que demonstraram que o comportamento do fogo é inversamente proporcional à concentração de retardante. Essa resposta apresentou a mesma tendência entre as quatro culturas analisadas, indicando que o produto apresenta ampla eficácia no controle do fogo em diferentes tipos de biomassa.

A relação entre aumento da concentração de retardante e diminuição da altura e velocidade da propagação do fogo corroboram com os estudos de Lima et al. (2020), que demonstraram que a aplicação de polímeros hidro retentores reduziram significativamente a velocidade e o comprimento das chamas em queimadas controladas de eucalipto. A temperatura da chama também seguiu esse padrão, sendo que esse efeito é consistente com estudos recentes sobre retardantes de chamas, como o trabalho de Nabipour et al. (2022) que analisou a eficácia de hidrogeis híbridos à base de celulose no controle de incêndios florestais. Esses autores observaram que a aplicação desses produtos melhora a retenção de umidade no material combustível e reduzem a intensidade térmica do fogo, tornando-se uma

ferramenta eficaz na contenção de incêndios. Os padrões distintos de redução nas variáveis de combustão (altura da chama, temperatura e velocidade de propagação) entre as culturas podem ser atribuídos às diferenças estruturais intrínsecas de cada vegetação. Cada espécie respondeu de forma diferente ao tratamento com retardante, refletindo suas particularidades morfológicas e físico-químicas (ALVARADO et al., 2020).

Em relação às concentrações, é perceptível que a concentração de 30% de retardante se sobressai sobre todas as demais, inclusive quando se realiza o tratamento apenas com água (Figura 10), evidenciando a eficiência do retardante no controle do fogo. Esse resultado está alinhado com os estudos de Ye et al. (2025), que demonstraram a capacidade de um retardante de fogo em aumentar significativamente a resistência da vegetação ao fogo, reduzindo o seu efeito.

A eficácia do retardante na concentração de 30% foi notável mesmo nas culturas com maior carga de biomassa, como o eucalipto, onde a presença de serapilheira dificulta a penetração e a ação direta do produto. Portanto, a ação do retardante sobre a biomassa dos diferentes tipos de vegetação foi o suficiente para conter o fogo.

6. CONCLUSÕES

Na avaliação do efeito do fogo nas diferentes culturas agrícolas e florestais no Cerrado goiano, observou-se que o eucalipto apresentou o fogo mais severo, com chamas mais altas e maior intensidade, associadas à elevada carga de biomassa lenhosa e à baixa umidade relativa do ar. Por outro lado, o sorgo teve a menor altura de chama e menor biomassa residual. A pastagem destacou-se pela maior velocidade de propagação, atribuída à continuidade da vegetação rasteira, enquanto o milho, submetido a maior umidade relativa do ar, teve propagação das chamas mais lenta.

A aplicação do retardante de chamas demonstrou elevada eficiência no controle do fogo, sendo eficaz na redução da altura, da temperatura e da velocidade de propagação das chamas em todas as culturas avaliadas, especialmente na concentração de 30% de retardante. Isto indica que o uso do produto é uma alternativa viável para minimizar os impactos dos incêndios em áreas agrícolas e florestais. Além disso, o desempenho do retardante evidencia seu potencial como ferramenta complementar ao combate direto em situações de queimadas.

Em relação a qualidade química do solo, observou-se aumento na fertilidade um dia depois da queima, com elevação do pH, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, resultado da mineralização da matéria orgânica. No entanto, seis meses após o fogo, os níveis nutricionais retornaram parcialmente aos patamares próximos aos iniciais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBESHIE, A. A.; ABUGRE, S.; ATTA-DARKWA, T.; ASIEDU, C.; OWUSU-AKYAW, M.; ANING, C.; OBENG, K. K.; ASANTE, M.; ASEESEH, D. A review of the effects of forest fire on soil properties. **Journal of Forestry Research**, v. 33, p. 1419–1441, 2022.

ALEXANDER, M. E.; CRUZ, M. G. Corrigendum to: Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. **International journal of wildland fire**, v. 30, n. 1, p. 70-70, 2021.

ALVARADO, S. T.; ANDELA, N.; SILVA, T. S. F.; ARCHIBALD, S. Thresholds of fire response to moisture and fuel load differ between tropical savannas and grasslands across continents. **Global Ecology and Biogeography**, v. 29, n. 2, p. 331-344, 2020.

BARBOSA, M. A. M.; BARROS, A. F. de; PEREIRA, E. dos S.; PARRELLA, R. A. C.; PIMENTEL, L. D. **Sorgo para bioenergia**. Brasília, DF: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 20 p.

BARKER, J. W.; PRICE, O.; FJENKINS, M. E. High severity fire promotes a more flammable eucalypt forest structure. **Austral Ecology**, v. 47, n. 3, p. 519-529, 2022.

BERGER, K. C.; TRUOG, E. Boron determination in soils and plants. **Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition**, v. 11, n. 10, p. 540-545, 1939.

BERLINCK, C. N.; BATISTA, E. K. L. Good fire, bad fire: It depends on who burns. **Flora**, v. 268, p.151610, 2020.

BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. (ed.). **Forest Fire: Control and Use**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1959. p. 61-89.

CARMENTA, R.; CAMMELLI, F.; DRESSLER, W.; VERBICARO, C.; ZAEHRINGER, J. G. Between a rock and a hard place: The burdens of uncontrolled fire for smallholders across the tropics. **World Development**, v. 145, p. 105521, 2021.

CHUNGU, D.; NG'ANDWE, P.; MUBANGA, H.; CHILESHHE, F. Fire alters the availability of soil nutrients and accelerates growth of *Eucalyptus grandis* in Zambia. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 5, p. 1637-1645, 2020.

CONEGLIAN, A.; BARBOZA, F. S.; COSTA, D. B.; PEREIRA, I. M.; INTERAMNENSE, M. T. Danos do fogo causados a um povoamento de *Eucalyptus urophylla* st blake, em Ipameri-go. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, p.347-357, 2018.

CROSSLEY, B. Fuel, oxygen and heat form the triangle of combustion. If any of the three sides of the triangle are removed, the fire will go out. **New Scientist**, v. 246, n. 3430, p. 55-55, 2023.

CRUZ, M. G.; HURLEY, R. J.; BESSELL, R.; SULLIVAN, A. L. Fire behaviour in wheat crops—effect of fuel structure on rate of fire spread. **International Journal of Wildland Fire**, v. 29, n. 3, p. 258-271, 2020.

CRUZ, M. G.; HOFFMAN, C. M.; FERNANDES, P. M. Global Synthesis of Quantification of Fire Behaviour Characteristics in Forests and Shrublands: Recent Progress. **Current Forestry Reports**, v. 11, n. 1, p. 8, 2025.

DIAS, F. P. M.; HÜBNER, R.; NUNES, F. J.; LEANDRO, W. M.; XAVIER, F. A. S. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 177, p. 180-188, 2019.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 577 p.

FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J. M.; CALVO, L. Fire severity shows limited dependence on fuel structure under adverse fire weather conditions: a case study of two extreme wildfire events. **Fire Ecology**, v. 21, n. 1, p. 1-19, 2025.

FERREIRA, B. S. S.; COSTA, R. A.; SANTOS, M. O.; NASCIMENTO, J. P.; MENDES, C. E. Effects of fire on mortality and resprouting patterns of *Stryphnodendron adstringens* (Fabaceae). **Brazilian Journal of Botany**, v. 46, n. 3, p. 705-714, 2023.

FIEDLER, N. C.; LACERDA, G. R.; RAMALHO, A. H. C.; BERUDE, L. C.; NEVES, F. P.; RODRIGUES, C. K. Firefighting combat with fire retardants at different concentrations. **Floresta**, Curitiba, v. 50, n. 1, p. 1107-1112, 2020.

FRIENDLY, M.; FOX, J. **Candisc**: Visualizing Generalized Canonical Discriminant and Canonical Correlation. Versão 0.8-6. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=candisc>. Acesso em: 21 maio 2025.

GARG, P.; ROCHE, T.; EDEN, M.; MATZ, J.; OAKES, J. M.; BELLINI, C.; GOLLNER, M. J. Effect of moisture content and fuel type on emissions from vegetation using a steady state combustion apparatus. **International Journal of Wildland Fire**, v. 31, n. 1, p. 14–23, 2021.

GUERRERO, F.; CARMONA, C.; HERNÁNDEZ, C.; TOLEDO, M.; ARRIAGADA, A.; ESPINOZA, L.; BERGMANN, J.; TABORGA, L.; YÁÑEZ, K.; CARRASCO, Y.; MUÑOZ, A. A. Drivers of flammability of *Eucalyptus globulus* Labill leaves: terpenes, essential oils, and moisture content. **Forests**, v. 13, n. 6, p. 908, 2022.

GUO, H.; GAO, Y.; YE Z.; YANG, Z.; ZHANG, Y.; LEI, Z.; SUN, A. Experimental investigation of fire behaviours and heat transfer in single cypress tree crown fires. **International Journal of Wildland Fire**, v. 34, n. 2, p.1-17, 2025.

GUO, M.; YAO, Q.; SUO, H.; XU, X.; LI, J.; HE, H.; LI, J. The importance degree of weather elements in driving wildfire occurrence in mainland China. **Ecological Indicators**, v. 148, p. 110152, 2023.

JORDÁN, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; GARCÍA-SÁNCHEZ, E.; PARDO, F.; BECH, J. The dynamics of boron when amending agricultural soil of the Mediterranean basin with biosolids: trials in leaching columns. **Environmental Geochemistry and Health**, v.45. n.12, p. 9469-9475, 2023

KALFAS, D.; KALOGIANNIDIS, S.; CHATZITHEODORIDIS, F.; MARGARITIS, N. The Other Side of Fire in a Changing Environment: Evidence from a Mediterranean Country. **Fire**, v. 7, n.2, p. 36, 2024.

LI, F.; ZHU, Q.; YAUN, K.; HUANG, H.; RADELOFF, V. C.; CHEN, M. Exacerbating risk in human-ignited large fires over western United States due to lower flammability thresholds and greenhouse gas emissions. **PNAS nexus**, v. 4, n. 2, p. 1-12, 2025.

LIMA, D. C.; SOUZA, A. P. D.; CABECEIRA, F. G.; KEFFER, J. F.; PIZZATTO, M.; BORELLA, D. R. Volume de calda e concentração de retardantes do fogo em queimas controladas em área de Eucalipto na transição Cerrado-Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 205-220, 2020.

LIMA, D. C.; SOUZA, A. P.; KEFFER, J. F.; BOUVIÉ, L.; MARTIM, C. C.; FERNEDA, B. G. Effectiveness of water-retaining Polymer as fire retardant in indirect use. **Revista Árvore**, v. 44, p. 1-11, 2020.

LINDSAY, W. L.; NORVELL, W. A. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.42, p.421-428, 1978.

LORENZON, A. S.; BRIANEZI, D.; VALDETARO, E. B.; MARTINS, M. C. **Incêndio florestal: princípios, manejo e efeitos**. Viçosa, MG: UFV, 2018.

LUZ, M. N.; SOUTO, P. C.; HENRIQUE, G. S.; DELFINO, R. C. H.; LEITE, A. P. Comportamento do fogo em espécies nativas da Caatinga na região geográfica imediata de Patos-PB. **Ciência Florestal**, v. 33, p. 1-22, 2023.

MACHIDA, W. S.; GOMES, L.; MOSER, P.; CASTRO, I. B.; MIRANDA, S. C.; SILVA-JUNIOR, M. C.; BUSTAMANTE, M. M. Long term post-fire recovery of woody plants in savannas of central Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 493, p. 119255, 2021.

MAGOMANI, M. I.; TOL, V. J. J. The impact of fire frequency on selected soil physical properties in a semi-arid savannah Thornveld. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, v. 69, n. 1, p. 43-51, 2019.

MENDIBURU, F. **Agricolae**: statistical procedures for agricultural research. Versão 1.3-5. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>. Acesso em: 21 maio 2025.

MORALES, M. M.; HOSHIDE, A. K.; CARVALHO, L. M. P.; TARDIN, F. D. *Sorghum Biomass as an Alternative Source for Bioenergy*. **Biomass**, v. 4, n. 3, p. 1017-1030, 2024.

MOURA, I. A. A. de; DANTAS, J.; LIMA, M. M. de; FIGUEIRÊDO, N. A. C.; SILVA, M. C. D. Biomassa proveniente da palha do milho *Zea mays*: caracterização para análise da viabilidade na produção de briquete. In: CONIMAS – Congresso Nacional Interdisciplinar em Meio Ambiente e Sustentabilidade; CONIDIS – Congresso Nacional Interdisciplinar em Desenvolvimento Sustentável, 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Editora Realize, 2019.

NABIPOUR, H.; SHI, H.; WANG, X.; HU, X.; SONG, L.; HU, Y. Flame retardant cellulose-based hybrid hydrogels for firefighting and fire prevention. **Fire Technology**, v. 58, n. 4, p. 2077-2091, 2022.

NAVAL, M. L. M.; BIELUCZYK, W.; ALVAREZ, F.; CARVALHO, L. C. S.; MARACAHIPES-SANTOS, L.; OLIVEIRA, E. A.; SILVA, K. G.; PEREIRA, M. B.; BRANDO, P. M.; MARIMON J., B. H.; CAMARGO, P. B.; FELPAUSCH, T. R. Impacts of repeated forest fires and agriculture on soil organic matter and health in southern Amazonia. **Catena**, v. 254, p. 108924, 2025.

NEIVA, P. S.; FURTADO, D. B.; FINZER, J. R. D. Capacidade térmica e poder calorífico de biomassa eucalipto. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DE UBERABA, 2018, Uberaba. **Anais [...]**. Uberaba: Universidade de Uberaba, 2018.

NEWBERRY, B. M.; POWER, C. R.; ABREU, R. C. R.; DURIGAN, G.; ROSSATTO, D. R.; HOFFMANN, W. A. Flammability thresholds or flammability gradients? Determinants of fire across savanna–forest transitions. **New Phytologist**, v. 228, n. 3, p. 910-921, 2020.

NGUYEN, T. H.; JONES, S.; REINKE, K. J.; SOTO-BERELOV, M. An exploratory analysis of forest fine fuel consumption and accumulation using forest inventory data and fire history. **International Journal of Wildland Fire**, v. 34, WF24135, 2025.

OLIVEIRA, I. R.; BORDRON, B.; LACLAU, J. P.; PAULA, R. R.; FERRAZ, A. V.; GONÇALVES, J. L. M.; LE MAIRE, G.; BOUILLET, J. P. Nutrient deficiency enhances the rate of short-term belowground transfer of nitrogen from *Acacia mangium* to *Eucalyptus* trees in mixed-species plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 491, p. 119192, 2021.

OLIVEIRA, M. H. R.; SOUSA, A. E. C.; OLIVEIRA, R. S.; AGUAS, M. A.; SILVA ÁVILA, E. A.; SILVA, W. R.; COUTO, C. A. Gestão dos resíduos pós colheita da cana-de-açúcar no Cerrado Goiano: uso da palhada versus contribuição econômica. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 3406-3421, 2020.

OYDEJI, S.; OGUNKUNLE, C. O.; ADENIRAN, S. A.; AGBOOLA, O. O.; FATOBA, P. O. Climate change-mediated fire effects on community structure and the physio-anatomical adaptations of plants in tropical savannas. In: **Ecophysiology of Tropical Plants**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023. p. 175-190.

PELLEGRINI, A. F. A.; CAPRIO, A. C.; GEORGIU, K.; FINNEGAN, C.; HOBBIE, S. E.; HATTEN, J. A.; JACKSON, R. B. Low-intensity frequent fires in coniferous forests transform soil organic matter in ways that may offset ecosystem carbon losses. **Global Change Biology**, v. 27, n. 16, p. 3810–3823, 2021.

PESSOA FILHO, J. S. **Análise térmica e energética de briquetes de capim braquiária**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

QUINALUISA, C.; MORALES, M.; QUELAL, M. B.; VILLACRÉS, E. Evaluation of the chemical composition and functional properties of the cobs of two varieties of corn. **Discov Food**, v. 5, p. 274, 2025.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: **R Foundation for Statistical Computing**, 2022. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 21 maio 2025.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001.

REGASA, A.; HAILE, W.; ABERA, G. Assessment of soil acidity and fertility status under different land uses types in Sayo District of Western Ethiopia. **Russian Agricultural Sciences**, v. 50, n. 2, p. 172-184, 2024.

RISSI, M. N.; BAEZA, M. J.; GORGONE, B. E.; ZUPO, T.; FIDELIS, A. Does season affect fire behaviour in the Cerrado?. **International Journal of Wildland Fire**, v. 26, n. 5, p. 427-433, 2017.

RIVERA, J. I.; EBENSPERGER, F.; VALENZUELA, F.; ESCANDAR, L.; RESZKA, P.; FUENTES, A. Understanding the role of fire retardants on the discontinuous ignition of wildland fuels. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 39, n. 3, p. 3775-3783, 2023.

RODRIGUES, C. A.; FIDELIS, A. Should we burn the Cerrado? Effects of fire frequency on open savanna plant communities. **Journal of Vegetation Science**, v. 33, n. 6, p. 13159, 2022.

ROSAVEC, R.; BARČIĆ, D.; ROŽMAN, T.; UGARKOVIĆ, D. The Relationship Between Burning Factors and Mediterranean Climatic Conditions in the Croatian Coastal Part. **Fire**, v. 8, n. 1, p. 34, 2025.

SANTOS, T. E. B. dos; MELO, M. A. de; RAMOS, T. V.; SOUZA, A. G. V.; BRANDÃO, T. P. Comportamento da comunidade microbiana no sistema silviagrícola na região de Cerrado. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 9, n. 2, p. 18–27, 2018.

SILVA, A. R. **Métodos de análise multivariada em R**. Piracicaba, SP: FEALQ. 2016.

SILVA, N. E. C.; PEREIRA, M. G.; FRADE, E. F.; SILVA, S. B.; CARVALHO, J. A.; SANTOS, J. C. Temporal evaluation of soil chemical attributes after slash-and-burn

agriculture in the Western Brazilian Amazon. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 41, p. 1-10, 2019.

SIMPSON, K. J.; ARCHIBALD, S.; OSBORNE, C. P. Savanna fire regimes depend on grass trait diversity. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 37, n. 9, p. 749-758, 2022.

SOUSA, D. G.; CUNHA, H. F. Structural assessment of a population of *Anacardium humile* subjected to fire during different periods of the year. **Acta Botanica Brasilica**, v. 34, n. 2, p. 401-408, 2020.

SU, H.; YU Y.; GUO W.; MAO, J. Convective potential and fuel availability complement near-surface weather in regulating global wildfire activity. **Science Advances**, v. 11, n. 8, p. 1-12 2025.

TALAIA, M. Minimizar o risco de fogo em amontoados de sobrantes florestais, através da educação escolar. **Territorium**, n. 30, p. 57-68, 2023.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TERZANO, R.; RASCIO, I.; ALLEGRETTO, I.; PORFIDO, C.; SPAGNUOLO, M.; KHANGHAHI, M. Y.; CRECCHIO, C.; SAKELLARIADOU, F.; GATTULLO, C. E. Fire effects on the distribution and bioavailability of potentially toxic elements (PTEs) in agricultural soils. **Chemosphere**, v. 281, p. 130752, 2021.

UEG. Universidade Estadual de Goiás. **Dados meteorológicos da estação meteorológica da Unidade Universitária de Ipameri-GO**. Ipameri, 2025. Disponível em: <https://www.ueg.br/ipameri/conteudo/14585>. Acesso em: 25 ago. 2025.

VISHVAMITERA, S.; SHARMA, U.; GULERIA, A. Fluctuations in soil nutrients and physico-chemical properties following controlled fire in North-Western Himalayas. **Environment Conservation Journal**, v. 23, n. 1-2, p. 283-289, 2022.

VITALI, R.; BELCHER, C. M.; KAPLAN, J. O.; WATSON, A. J. Increased fire activity under high atmospheric oxygen concentrations is compatible with the presence of forests. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, p. 7285, 2022.

WEBBER, Z.; HARRIS, R.; TURNER, S.; PEDRINI, S. Impact of fire suppressant on seed germination and seedling emergence of native and introduced flora from a Western Australian eucalypt woodland. **International Journal of Wildland Fire**, v. 32, n. 12, p. 1798-1815, 2023.

WEI, T.; SIMKO, V. **Corrplot**: visualization of a correlation matrix. Versão 0.92. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://github.com/taiyun/corrplot>. Acesso em: 21 maio 2025.

WOICIECHOWSKI, T.; GOMES, K. M. R. T. B.; LOPES, M. C. R.; EBERHART, R. A.; PIGARI, H. P.; SILVA, H. L. G. Quantificação de material combustível na serapilheira em

plantio de Eucalipto em Aquidauana, MS. **Biodiversidade Brasileira**, v. 9, n. 1, p. 73-73, 2019.

XU, M.; WEI, Y.; QIN, A.; XU, Y.; XU, M.; LI, B.; LIU, L. Novel silica hydrogel-based forest fire extinguishing agent: Construction, fire extinguishing performance and mechanism study. **Journal of Cleaner Production**, v. 486, p. 144490, 2025.

YE, W.; LI, Y.; ZHANG, D.; XU, H.; SONG, L.; HU, Y.; HU, W. Synergistic surface-modified bio-based flame retardant for rapid establishment of emergency firebreaks. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 687, p. 207-216, 2025.

8. ANEXO



Anexo 1. Fotos ilustrativas do experimento conduzido em áreas de sorgo, milho, pastagem e floresta de eucalipto durante a queima controlada realizada no sudeste de Goiás em 2023/2024. Legenda: A) diluição do retardante; B) Inserção do retardante na bomba costal; C) aplicação com a bomba costal; D) metade da parcela aplicada com o retardante; E) Ignição do incêndio; F) parcela queimada com na concentração de 30% do retardante; G) coleta do solo com o trado manual; H) coleta de biomassa com o gabarito 1x1; I) estaca fincada no

chão utilizada para aferir a altura da chama; J) coletando a temperatura da chama com o termômetro infravermelho; K) linha do fogo; L) detalhe para a ação do retardante; M) área de sorgo; N) área de milho; O) área de pastagem; P) área de eucalipto.