

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RUDOLFO DE CERQUEIRA JACOBS

AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES
QUÍMICOS DE LONGA DURAÇÃO

CURITIBA

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RUDOLFO DE CERQUEIRA JACOBS

AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES
QUÍMICOS DE LONGA DURAÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título Mestre em Conservação da Natureza.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre França Tetto

CURITIBA

2021

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Jacobs, Rudolfo de Cerqueira

Avaliação em laboratório da eficiência de retardantes químicos de longa duração / Rudolfo de Cerqueira Jacobs. – Curitiba, 2021.
51 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre França Tetto

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.

Defesa: Curitiba, 10/08/2021.

Área de concentração: Conservação da Natureza.

1. Incêndios florestais - Prevenção e controle. 2. Incêndios florestais - Previsão. 3. Fogo. 4. Produtos químicos. 5. Teses. I. Batista, Antonio Carlos. II. Tetto, Alexandre França. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.43

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de RUDOLFO DE CERQUEIRA JACOBS Intitulada: **AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES QUÍMICOS DE LONGA DURAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BATISTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

11/08/2021 09:16:25.0

ANTONIO CARLOS BATISTA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/08/2021 14:40:22.0

MARCOS VINICIUS GIONGO ALVES

Avallador Externo (FUNDACAO UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS)

Assinatura Eletrônica

11/08/2021 22:47:37.0

EDUARDO HENRIQUE REZENDE

Avallador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Percy Jacobs (*in memoriam*) e Patrícia de Cerqueira Violante, pelo apoio incondicional durante a vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Carlos Batista, que apresentou e me ensinou grande parte do que conheço sobre incêndios. Pelos conselhos, amizade e orientação durante a jornada acadêmica.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Alexandre França Tetto pelos incentivos ao melhor proceder com as análises comparativas e uso criativo do espaço laboratorial.

Ao Prof. Dr. Alexandre Behling, por ajudar a aperfeiçoar meus estudos com retardantes de chamas.

A Adriana Barquilha pela revisão do trabalho.

As técnicas dos laboratórios de proteção florestal e incêndios florestais Veruza e Andréia.

A todos os servidores da Universidade Federal do Paraná, em especial aos do Departamento de Ciências Florestais.

Aos amigos integrantes dos laboratórios de incêndios florestais, paisagismo e unidades de conservação, pelos conselhos, desabafos, risadas, desafios e companheirismo ao longo dos anos de 2019 e 2020.

O inventor, como a natureza de Linneu,

Não faz saltos

Progride de manso,

Evolui.

Santos Dumont

RESUMO

O Brasil é bastante afetado por incêndios florestais, isto posto aclara a demanda por tecnologias de prevenção e combate, a análise de eficiência de produtos é um dos setores que carece de avanços no país. O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficiência de produtos retardantes de chamas utilizados na prevenção e combate a incêndios florestais no Brasil, em condições de laboratório. Foram analisados cinco produtos, sendo duas formulações sólidas e três líquidas e, para fins comparativos, a água foi utilizada como tratamento controle. Para a condução do experimento foi utilizado o feno tifton (*Cynodon* spp.) como material combustível, sendo realizados estudos de inflamabilidade e combustibilidade em epirradiador e secagem em estufa para caracterizar o material combustível, os testes de queima controlada foram conduzidos em câmara de combustão em espaço laboratorial. A eficiência foi calculada pelo Índice efetivo de eficiência (IEE) na concentração recomendada pelo fabricante de cada produto para combustíveis classe A. Com base nos índices encontrados a água e os produtos Ce e Bt foram reprovados pelo critério de classificação e os produtos Fe, Ft e Pk aprovados com restrições ao seu uso em longa duração. A partir dos resultados encontrados pelos índices, foi possível concluir que os produtos mais eficientes, em longa duração, para prevenir e combater as chamas foram os retardantes Ft e Pk.

Palavras chave: Prevenção e combate a incêndios florestais; Retardante de chamas; Índice de Eficiência Efetiva.

ABSTRACT

Brazil is quite affected by forest fires, which clarifies the demand for prevention and combat technologies, the analysis of product efficiency is one of the sectors that lacks advances in the country. This work aimed to analyze the efficiency of flame retardant products used to prevent and fight forest fires in Brazil, under laboratory conditions. Five products were analyzed, two solid and three liquid formulations and, for comparative purposes, water was used as a control treatment. To conduct the experiment, tyfton hay (*Cynodon spp.*) was used as a combustible material, flammability and combustibility studies were performed in epiradiator and drying in an oven to characterize the combustible material, the samples burning tests were carried out in a combustion chamber in laboratory space. Efficiency was calculated using the Effective Efficiency Index (EEI) at the concentration recommended by the manufacturer of each product for class A fuels. Based on the indices found, the water and the products Ce and Bt did not reach the minimum classification criteria and were not approved, the products Fe, Ft and Pk have been approved with restrictions on their long-term use. From the results found by the indices, it was possible to conclude that the most efficient products in long duration to prevent and fight flames were the Ft and Pk retardants.

Keywords: Prevent and fight forest fires; Fire retardant; Effective Efficiency Index;

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Laboratório de Incêndios Florestais, em destaque câmara de combustão.....	19
FIGURA 2 – Câmara de combustão do Laboratório de Incêndios Florestais ...	20
FIGURA 3 – Esboço da plataforma de queima	21
FIGURA 4 – Ensaio em epirradiador com Feno	22
FIGURA 5 – Fluxograma para a avaliação do Índice efetivo de eficiência.....	29
FIGURA 6 – Curva de secagem do material combustível.	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Índices do valor de combustão	22
TABELA 2 – Índices do valor de inflamabilidade.....	23
TABELA 3 – Resultado da avaliação de inflamabilidade e combustibilidade ...	34
TABELA 4 – ANOVA para as médias de velocidade de propagação das áreas sem tratamento.	36
TABELA 5 – ANOVA para as médias de altura de chama das áreas sem tratamento	36
TABELA 6 – Valores médios das variáveis de inflamabilidade	40
TABELA 7 – Dados do teste em epirradiador.....	47
TABELA 8 – Médias de velocidade de propagação das áreas sem aplicação de retardante ($m.s^{-1}$).	49
TABELA 9 – Médias de altura de chama das áreas sem aplicação de retardante (cm).....	49
TABELA 10 – ANOVA para as médias de altura de chama das áreas sem tratamento	50
TABELA 11 – Médias das taxas de redução de velocidade de propagação (RVP)	50
TABELA 12 – Médias das taxas de redução de altura de chama (RHC)	50
TABELA 13 – ANOVA médias das taxas de redução de velocidade de propagação (RVP)	51
TABELA 14 – ANOVA médias das taxas de redução de altura de chama (RHC)	51
TABELA 15 – ANOVA médias dos índices de eficiência efetiva (IEE).....	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E EQUIPAMENTO LABORATORIAL	18
4.1.1 Caracterização do material combustível.....	20
4.1.2. Análise de homogeneidade entre as amostras	24
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS RETARDANTES UTILIZADOS... 24	
4.2.1 Bt.....	25
4.2.2 Ft.....	25
4.2.3 Ce.....	26
4.2.4 Pk.....	26
4.2.5 Fe sólido e líquido	26
4.3 METODOLOGIA ÍNDICE EFETIVO DE EFICIÊNCIA	27
4.3.1 Análise estatística dos tratamentos empregados	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E HOMOGENEIDADE ENTRE AMOSTRAS.....	34
5.1.1 Resultados da caracterização do material combustível.....	34
5.1.2 Resultados da análise de homogeneidade entre as amostras	35
5.2 RESULTADOS DOS TRATAMENTOS EMPREGADOS.....	37
5.2.1 Resultados água	37
5.2.2 Resultados Bt.....	37
5.2.3 Resultados Fe	38
5.2.4 Resultados Pk	38
5.2.5 Resultados Ce.....	39
5.2.6 Resultados Ft.....	39
5.3 Análises estatísticas dos tratamentos e discussão dos resultados	40
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	42
REFERÊNCIAS	43
Apêndice 1	47
Apêndice 2	49

Apêndice 3	50
Apêndice 4	51

1 INTRODUÇÃO

O fogo é um fator transformador da paisagem, que seleciona a biota e modela ecossistemas (BOWMAN *et al.*, 2011). Potencialmente, todos os ecossistemas terrestres têm um regime natural de fogo (MYERS, 2006). Incêndio florestal pode ser definido como uma combustão não controlada que se propaga livremente consumindo os combustíveis naturais de uma floresta ou outro tipo de vegetação (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017).

A atividade humana é a fonte causal do grande número de incêndios florestais, seja por intuitos inadvertidos (fumantes, tratos culturais, renovação de pastagens, campismo, exploração de florestas, queima de lixo.) ou por causas criminosas (MACEDO, 1987). A alteração do regime de fogo de uma região por ação humana pode impactar o ecossistema local, causando danos à flora e à fauna, além dos incêndios representarem riscos à vida humana e à propriedade (MCCOLL-GAUSDEN; PENMAN, 2019).

No Brasil, segundo dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020), a média anual de área queimada de 2010 a 2020 foi de 303.969 quilômetros quadrados. Incêndios florestais, particularmente os de alta intensidade, são uma ameaça à segurança das comunidades em todo o mundo e podem ter impactos ambientais e econômicos significativos que podem levar anos para se recuperar (SCOTT *et al.*, 2014).

Diante deste cenário, há a necessidade da sociedade e seus representantes direcionarem recursos e esforços na prevenção e combate a incêndios florestais. Dentro das possibilidades existentes para execução desta tarefa, retardantes químicos é um dos recursos que vêm sendo pesquisados e utilizados. Visando a avaliação de produtos retardantes, esta pesquisa buscou comparar, em condições de laboratório, a eficiência de diferentes produtos retardantes de chamas disponíveis no mercado brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de diferentes produtos retardantes de chamas indicados para combustíveis classe A disponíveis no mercado brasileiro, condições de laboratório e identificar qual possui a maior eficiência na prevenção e combate ao fogo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento do fogo antes e após o uso de retardantes;
- Analisar a influência dos retardantes na redução dos parâmetros do comportamento do fogo;
- Verificar a capacidade de supressão dos retardantes.
- Comparar a eficiência dos retardantes através do método IEE.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A água é o extintor de fogo mais utilizado no combate aos incêndios e seu amplo uso deve-se à sua disponibilidade no ambiente. Porém, em caso de sua escassez no meio, ou por qualquer motivo que haja necessidade de interromper o avanço do fogo de maneira abrupta, o emprego de retardantes químicos torna-se fundamental. Em incêndios florestais, retardantes de fogo podem ser utilizados na prevenção e combate dos mesmos, sendo possível usá-los tanto no combate terrestre quanto no aéreo (SOARES, BATISTA e TETTO, 2017).

Para Ribeiro *et al.* (2006), "um retardante de fogo é um agente químico que utilizado, sozinho ou misturado com água, reduz ou elimina a combustão de um determinado combustível", sendo, portanto, um produto com atribuições de aumentar a capacidade ignífuga do material sobre o qual é aplicado. A maior vantagem do uso desses produtos é o aumento da eficiência do uso da água com um custo relativamente baixo (SANT' ANNA, FIEDLER e MINETTE, 2007). Estes compostos possuem capacidades extintoras por vias químicas e/ou físicas (PIERONI, LEONEL e FILLMANN, 2017), portanto, agem por uma, ou mais, das várias teorias de extinção de combustão (LIODAKIS, VORISIS e AGIOVLASITS, 2006):

- Teoria da barreira – um produto isola o combustível florestal, impedindo-o de entrar em contato com o oxigênio;
- Teoria térmica – o calor é absorvido por uma substância, impedindo que o combustível florestal entre em ignição;
- Teoria dos gases não inflamáveis – um produto aplicado sobre o combustível em chamas é decomposto em gases não inflamáveis;
- Teoria da armadilha de radicais livres – aplicação de algum produto que favorece a formação de radicais livres que inibem o mecanismo da cadeia de propagação da combustão;
- Teoria do aumento do carvão/redução dos voláteis – aplicação de algum produto que reduz a temperatura em que ocorre a pirólise, forçando o padrão de degradação do combustível para a produção de mais carvão e menos voláteis inflamáveis.

Os primeiros registros do uso de retardantes de fogo datam de 450 A.C. por egípcios, que utilizavam alume para diminuir a inflamabilidade da madeira, mas apenas a partir de 1970, com o aumento de consumo de materiais poliméricos, houve necessidade de aprimorar a segurança contra incêndios. Atualmente, existem mais de 175 produtos descritos como retardante de chamas, sendo sua classificação dividida em quatro grupos baseados em sua constituição química (PIERONI, LEONEL e FILLMANN, *et al.*, 2017):

- Inorgânicos (hidróxidos de alumínio, antimônio e estanho);
- Orgânicos halogenados (clorados e bromados);
- Organofosforados;
- À base de nitrogênio.

Devido às complexidades da contemporaneidade, existem diversos tipos de materiais combustíveis dispostos nos meios rurais e urbanos. Para a realização deste trabalho foi adotada a classificação proposta pela Norma Regulamentadora 23, do art. 200 da Consolidação das Leis do Trabalho, que discorre sobre a proteção contra incêndios (BRASIL, 1978), classificando os combustíveis como:

- Classe A - são materiais de fácil combustão com a propriedade de queimarem em sua superfície e profundidade, e que deixam resíduos como: tecidos, madeira, papel, fibras;
- Classe B - são considerados inflamáveis os produtos que queimam somente em sua superfície, não deixando resíduos, como óleo, graxas, vernizes, tintas, gasolina;
- Classe C - quando ocorrem em equipamentos elétricos energizados, como motores, transformadores, quadros de distribuição, fios;
- Classe D - elementos pirofóricos, como magnésio, zircônio ou titânio.

No que tange aos incêndios florestais, devido às características físico-químicas dos materiais derivados da fotossíntese que compõem os ecossistemas terrestres (SOARES, BATISTA e TETTO, 2017), grande parte dos combustíveis florestais enquadra-se na classe A.

No atual cenário, retardantes utilizados em incêndios florestais são classificados em dois grandes grupos: retardantes de curta duração e retardantes de longa duração (PASTOR, 2004). Os de curta duração atuam como um aditivo na água, aumentando por algumas horas suas capacidades

extintoras. Os retardantes de longa duração também aumentam a capacidade da água absorver calor, porém, como o nome sugere, perduram no ambiente com propriedades retardantes por um período mais longo de até alguns dias sem chuva.

Segundo Muñoz e Ruiz (2010), comumente são adicionados aditivos aos produtos. Tais aditivos objetivam fornecer aos retardantes as seguintes características, em ordem de prioridade: viscosidade, coloração, não corrosividade, não produção de flóculos, estabilidade e baixa toxicidade:

- A viscosidade é necessária para que a solução tenha aderência ao material, evitando a dispersão durante a aplicação e a perda do material pelo escorrimento;
- A coloração é importante para destacar a superfície em que foi aplicada a solução, facilitando, assim, a visualização e, conseqüentemente, o trabalho de combate aos incêndios;
- A não corrosão é desejada, pois os sais amoníacos, utilizados no preparo do concentrado do retardante, são corrosivos. Para reduzir a corrosão do maquinário de aplicação são adicionadas substâncias como dicromato de sódio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), tioureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$) e ferrocianeto de potássio ($\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$);
- Os concentrados retardantes não devem produzir flóculos ou grânulos maiores do que três milímetros, com vistas a evitar efeitos negativos aos componentes do maquinário, como entupimento de mangueiras;
- É desejável que o concentrado permaneça estável por, pelo menos, um período de dois anos, suportando variações térmicas sem apresentar deteriorações do produto;
- Por fim, a mistura deve ter o menor nível de toxicidade possível, de forma a ser inócua ao homem, à fauna e à flora. Deve ser também de fácil remoção da pele e das mucosas com água. Como polifosfatos são utilizados na fabricação de fertilizantes, normalmente, a aplicação de retardantes de longa duração é considerada como um aporte de nutrientes à biota.

Retardantes químicos são comercializados em sua forma concentrada (MUÑOZ; RUIZ, 2010), sendo necessária sua mistura com água para formulação da calda retardante e subsequente aplicação da mesma no campo,

podendo ser empregados com o uso de bombas costais, caminhões bombeiros ou aviões para prevenção ou combate de incêndios. Uma das formas mais eficientes na prevenção e combate indiretos a incêndios florestais é o emprego de aceiros (SOARES, 1971). Retardantes químicos têm a capacidade de produzir aceiros químicos por meio do aumento das capacidades ignífugas dos materiais combustíveis com a finalidade de reduzir a sua inflamabilidade (PLUCINSKI, SULLIVAN e HURLEY, 2017).

Segundo Planas, Àgueda e Pastor, (2008), retardantes de fogo vêm sendo largamente utilizados por países da América do Norte, do Mediterrâneo e pela Austrália. A prática do uso de retardantes de fogo no Brasil ainda é incipiente, tal condição se deve, em parte, à inexistência de regulamentação própria para uso e registro desses produtos (INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE (IBAMA), 2018), assim como em razão dos elevados preços, uma vez que poucos são produzidos no país (MACHADO FILHO *et al.*, 2012). Não são muitos os relatos do uso desses produtos no Brasil, porém, existem exemplos de uso nos casos dos incêndios ocorridos na Chapada Diamantina-Bahia, em 2018 (IBAMA, 2018) e Arariboia-Maranhão, em 2015 (IBAMA, 2015).

Há diversas propostas metodológicas para avaliar a eficiência de retardantes de longa duração, tais como a de Rothermel e Phipot (1975), Blakely (1988), Pastor (2004), Ribeiro, Viegas e Batalha (2006), Batista *et al.*, (2008), Machado Filho *et al.*, (2012), Fiedler *et al.*, (2015), Plucinski, Sullivan e Hurley (2017) e, mais recentemente, a proposta por Beutling *et al.* (2018).

Tendo em vista a capacidade do uso desses retardantes de fogo em aumentar a eficiência do uso da água e devido à escassez de conhecimento nos processos de avaliação da eficiência destes produtos, torna-se evidente a necessidade do progresso desses estudos na área.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E EQUIPAMENTO LABORATORIAL

Para avaliar os efeitos dos retardantes sobre o fogo, foram realizados experimentos de queima controlada em uma câmara de combustão do Laboratório de Incêndios Florestais (FIGURA 1), do Departamento de Ciências Florestais (DECIF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), *campus* III, na cidade de Curitiba-Paraná. Os testes de queima controlada foram realizados entre os dias 24 de abril e 12 de julho de 2019, nas dependências do laboratório.

FIGURA 1 – Laboratório de Incêndios Florestais, em destaque câmara de combustão



Fonte: O Autor (2019).

Para obtenção dos dados do estudo com maior precisão, foi necessário controlar ao máximo as variáveis que possam afetar a coleta de dados. Para

tanto, além da realização do estudo em ambiente laboratorial os ensaios de queima foram conduzidos dentro de câmara de combustão do próprio Laboratório de Incêndios Florestais (FIGURA 2).

FIGURA 2 – Câmara de combustão do Laboratório de Incêndios Florestais



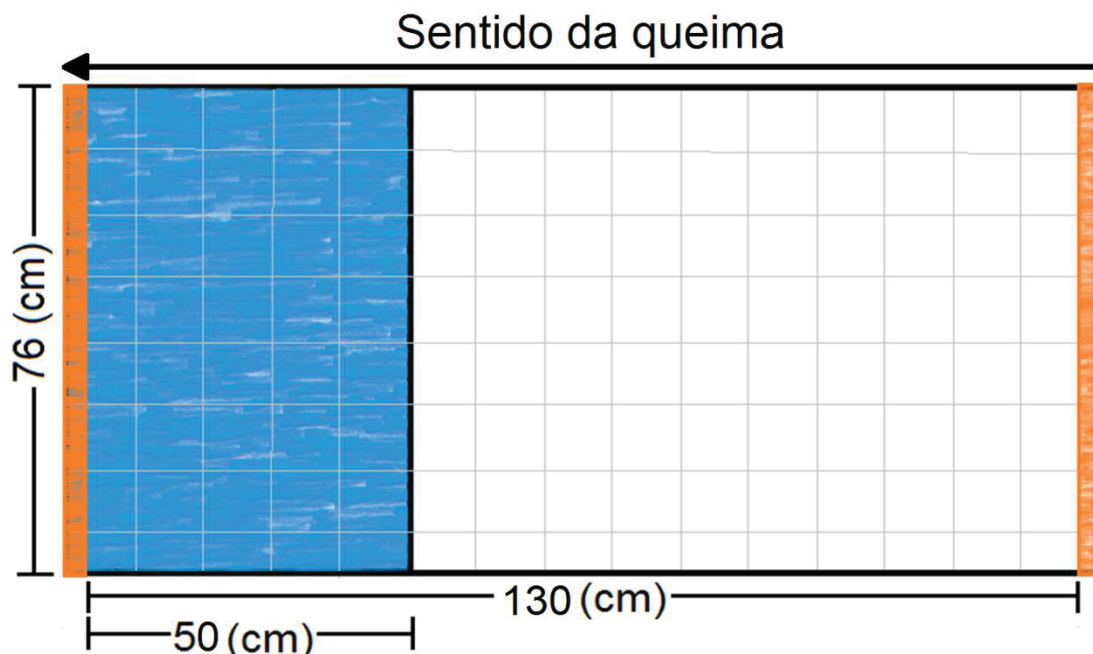
Fonte: O Autor (2019).

A plataforma de combustão possui as dimensões de 1,46 metro de comprimento, sendo que no 0,08 metro da extremidade inicial ao sentido da queima foi aplicado álcool combustível para homogeneizar a linha de acendimento e o 0,08 metro da extremidade final foi descartado das análises, e 0,76 metro de largura. O material combustível padrão utilizado foi o feno de tifton (*Cynodon spp.*) seco em estufa a 75 °C por 24 horas antes da montagem da amostra, na proporção de 1 kg/m², e espalhado homogeneamente sobre a plataforma, formando a manta de combustível.

O preparo e a aplicação da solução retardante foram realizados após a montagem da manta, sendo a calda aplicada no terço final da plataforma, conforme a Figura 3. No preparo da calda retardante, respeitou-se a concentração indicada pelos fabricantes dos produtos para os materiais combustíveis classe A e, na aplicação, foi utilizada a proporção de 0,5 litro de solução para 1 quilograma do feno Tifton. Realizada a montagem das mantas, as mesmas foram deixadas em espera durante o período de 24 horas após a aplicação da solução sobre a manta, este processo objetivou a redução dos

efeitos da água utilizada na diluição dos produtos, por meio da evaporação da mesma durante o período supracitado, possibilitando assim a avaliação dos efeitos de longa duração dos produtos.

FIGURA 3 – Esboço da plataforma de queima



Fonte: O Autor, (2018).

A plataforma possuía marcações em seu comprimento a cada 10 centímetros. A velocidade de propagação da frente de fogo foi calculada pela relação entre distância e tempo, em cada intervalo de 10 centímetros. A altura de chama foi estimada segundo uma escala demarcada na própria câmara de combustão. Variáveis ambientais como umidade relativa do ambiente e temperatura do ar foram coletadas com a estação meteorológica Kestrel antes e após cada queima.

Para elaboração das soluções aplicadas, o agente diluidor para todos os testes foi a água, sendo mensurados e homogeneizados em solução os volumes em proveta graduada. A aplicação foi realizada com o pulverizador de compressão prévia, da empresa Guarany, sempre na pressão máxima do equipamento (43,5 PSI), e jato pulverizador em cone cheio.

4.1.1 Caracterização do material combustível

Para melhor compreensão do comportamento dos fenômenos do fogo estudados neste trabalho, foram incluídos os estudos da inflamabilidade, da combustibilidade e da secagem do material combustível utilizado nas queimas em laboratório. Para tanto, foram conduzidos testes de acordo com adaptação da metodologia proposta por Valette (1992) e posteriormente aprimorada por Petriccione (2006).

O material combustível escolhido para os testes, como supracitado, foi o feno de tifton (*Cynodon spp.*), trata-se de um combustível classe A, com diâmetro menor que 0,7 centímetro, fino, homogêneo e de fácil aquisição em quantidades necessárias para execução dos experimentos. O feno era adquirido em fardos de aproximadamente sete quilogramas, aparentando estar em umidade de equilíbrio com o ambiente.

O método de avaliação de inflamabilidade e combustibilidade proposto por Petriccione (2006) consiste em coletar ramos e folhas recém cortados e, em até no máximo duas horas, executar 50 queimas, com um grama de combustível cada queima, sobre um epirradiador (FIGURA 4) de temperatura controlada entre 250 e 350 °C, com uma fonte de calor a quatro centímetros acima do centro do disco irradiador, dentro de uma capela com condições ambientais controladas. Para este caso, foi utilizado o combustível (feno de tifton) em estado seco. Cada queima foi gravada, objetivando a coleta de dados de tempo para ignição, duração da combustão, altura da chama e frequência de ignição.

FIGURA 4 – Ensaio em epirradiador com Feno



Fonte: O autor (2020).

O tempo para ignição (TI) é o tempo que o material leva para iniciar a combustão após ser colocado sobre o disco irradiador, medido em segundos.

A duração da combustão (DC) é o tempo que a chama se mantém acesa, medida em segundos.

A altura de chama (AC) foi aferida de maneira visual, utilizando uma marcação atrás do epirradiador, avaliando a altura máxima da chama atingida durante cada queima, medida em centímetros.

A frequência de ignição (FI) é a razão entre o número de repetições positivas e o número total de repetições em porcentagem, multiplicado por 100, conforme equação apresentada a seguir. A repetição é considerada positiva quando a amostra entra em ignição no tempo máximo de 60 segundos e negativa caso não entre em combustão ou o tempo de ignição ultrapasse 60 segundos.

$$FI = \frac{n^{\circ} \text{ repetições positivas}}{n^{\circ} \text{ total de repetições}} * 100$$

O índice de combustão (IC) demonstra a velocidade da liberação de energia do material após entrar em ignição e é definido pela intensidade média da combustão das queimas, sendo determinado por meio da média das alturas de chama em centímetros e classificado segundo os índices da TABELA 1.

Tabela 1 – Índices de valor de combustão

Índice de Combustão	Qualificação	Altura de chama (cm)
IC 1	Muito baixa	< 1
IC 2	Baixa	1 a 3
IC 3	Média	4 a 7
IC 4	Alta	8 a 12
IC 5	Muito alta	> 12

Fonte: Petriccione (2006).

O valor de inflamabilidade (VI) demonstra a facilidade com que o material pode entrar em combustão, sendo determinado de acordo com a relação entre os valores de FI e TI na seguinte tabela de dupla entrada (TABELA 2).

Tabela 2 – Índices do valor de inflamabilidade

Tempo de Ignição (s)	Frequência de ignição					
	< 25	25 - 38	39 - 41	42 - 44	45 - 47	48 - 50
> 32,5	0	0	0	1	1	2
27,6 - 32,5	0	0	1	1	2	2
22,6 - 27,5	0	0	1	2	2	2
17,6 - 22,5	1	1	2	2	3	3
12,6 - 17,5	1	1	2	3	3	4
< 12,6	1	2	3	3	4	5

Fonte: Valette (1992).

A interpretação deste índice, segundo Valette (1992), é que, para o valor de inflamabilidade 0 (zero) seu descritivo é fracamente inflamável, enquanto que, para o VI 1 é pouco inflamável, para o VI 2 é moderadamente inflamável, para o VI 3 é inflamável, para o VI 4 é altamente inflamável e, já para, o VI 5 é extremamente inflamável.

Como o material combustível do experimento era seco em estufa um dia antes da execução das queimas, a avaliação da inflamabilidade e combustibilidade do feno de tifton visou verificar tais características nas mesmas condições a que ele foi submetido nas queimas com retardante.

Ademais, dos testes acima citados procedeu-se, também, o estudo da curva de secagem do combustível. Foi avaliado o tempo que o material combustível em umidade de equilíbrio com o ambiente, que era estocado em laboratório, levaria para secar a 0% de umidade. Para tanto, foram amostrados três fardos de lotes diferentes de feno em três datas diferentes. A determinação do teor de umidade foi feita pelo modelo utilizado por Batista (1990), sendo a massa seca obtida por meio de subamostras de massas variáveis, secas em estufa a 75 °C, por 48 horas.

$$U\% = \frac{MU - MS}{MS} * 100$$

Em que:

U% = teor de umidade do material combustível (%);

MU = massa úmida do combustível no momento da coleta (g);

MS = massa seca do material combustível (g).

Para determinar a intensidade do fogo média da área sem aplicação de retardante foi utilizado o modelo de Byram (1959):

$$I = 62,08hc^{2,17}$$

Em que:

I = intensidade do fogo ($\text{kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$);

hc = altura de chama (cm).

4.1.2. Análise de homogeneidade entre as amostras

Com o intuito de verificar a homogeneidade entre as amostras, valendo-se do modelo estatístico do delineamento inteiramente casualizado, foram testadas duas pressuposições da Análise de Variância – ANOVA - (normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias).

A primeira pressuposição refere-se às médias de velocidade de propagação. A hipótese de nulidade (H_{0VP}) considera que não há diferenças significativas entre as médias de velocidade de propagação nas áreas sem aplicação de retardante, enquanto, a hipótese alternativa (H_{1VP}) considera que há diferenças significativas entre as médias de velocidade de propagação nas áreas sem aplicação de retardante.

A segunda pressuposição refere-se às médias de altura de chama. A hipótese de nulidade (H_{0HC}) considera que não há diferenças significativas entre as médias de altura de chama nas áreas sem aplicação de retardante, já a hipótese alternativa (H_{1HC}) considera que há diferenças significativas entre as médias de altura de chama nas áreas sem aplicação de retardante.

Quando verificada diferenças estatísticas nas médias foram comparadas ao nível de 1% de significância e realizadas no *software* SAS University.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS RETARDANTES UTILIZADOS

Foram utilizados cinco diferentes produtos retardantes de chamas disponíveis no mercado brasileiro, sendo que um dos produtos obtidos, *Fe*, apresentava duas formulações distintas. Todos os produtos foram denominados por siglas para preservar os nomes dos produtos e empresas fabricantes envolvidos.

4.2.1 Bt

Descrito pelo produtor como um supressante de chamas para combustíveis das classes A, B, C e K. Segundo fabricante a constituição do *Bt* é água, carbonato de amônio e componentes orgânicos. Seu estado físico é líquido, com coloração levemente amarelada, leve odor de amônia, pH 8,8, densidade de 1,1 g/ml, temperatura de congelamento -14,5 °C, temperatura de ebulição de 103 °C e, quando submetido a altas temperaturas, degrada-se em N₂, CO₂ e H₂O. A concentração com diluição em água recomendada pelo fabricante para combustíveis classe A é de 6%. Em solução com a água, houve aparente aumento da viscosidade. Após aplicação da solução retardante sobre a manta combustível, não foi constatado distinção visual entre a área de aplicação do produto e a área sem aplicação do produto. Houve rápida evaporação aparente da água da solução.

4.2.2 Ft

De acordo com o fabricante, o produto *Ft* trata-se de um fertilizante fluido em calda pronta, com grande eficácia como supressor e retardante de chamas para combustíveis classe A com efeitos de longa duração. Composto por polifosfato de amônia, sulfato de amônia e fosfato diamônico, seu estado físico a 25 °C é melífluo de coloração azul, pH 8,1 e densidade de 1,34 g/ml. A concentração indicada para uso pelo fabricante é de 17,5% com diluição em água. Em solução com água, houve aparente aumento da viscosidade da solução se comparada com a água. Após a aplicação, com a coloração azul presente no produto, foi constatada nítida distinção visual entre as áreas com e sem aplicação da solução.

4.2.3 Ce

O produto *Ce* é descrito pelo fabricante como um supressante de fogo para combustíveis das classes A, B, C, D e K. A composição deste produto baseia-se em sódio, sulfatos (SO_4), carbonato de cálcio, hidróxido de magnésio, magnésio, hidrocarbonetos e amidas alifáticas de cadeia longa. O estado físico a 25 °C é de concentrado líquido emulsionável incolor, pH 7,23 e densidade de 1,025 g/ml. Sua concentração para diluição em água, indicada pelo fabricante para combustíveis classe A, é de 1,5%.

Em solução com água, não houve diferenciação aparente na viscosidade com relação à água e não foi constatada distinção visual entre as áreas com e sem aplicação do produto. No caso deste produto, notou-se que, após a aplicação da calda sobre a manta, aparentemente houve favorecimento a evaporação da água constante na solução.

4.2.4 Pk

O produto *Pk* é descrito pelo fabricante como um supressante de chamas para combustíveis das classes A e B. Composto por polifosfato de amônia e fosfato diamônico o estado físico a 25 °C é de concentrado sólido em pó emulsionável de coloração vermelha e densidade de 1,456 g/ml. A concentração com diluição em água, recomendada pelo fabricante para combustíveis classe A, é de 13,4%.

Em solução com a água, houve aparente aumento de viscosidade da solução em relação à água. Após aplicação, a coloração vermelha presente no produto foi capaz de criar nítida distinção visual entre as áreas com e sem aplicação da solução.

4.2.5 Fe sólido e líquido

Os produtos *Fe* são classificados pelo fabricante como retardantes de longo prazo, composto basicamente por ureia e sulfato de amônio, segundo o fabricante possuem efeito bloqueador e extintor, para aplicação em incêndios florestais por meios aéreos e terrestres. Foram obtidas duas formulações deste

produto, uma constituindo-se de granulados de diâmetro inferior a 0,5 cm e outra líquida viscosa.

As características de cor bege, inodoro, pH (a 20 °C) de 6,5 e densidade (a 20 °C) de 0,95 g/cm³ são iguais para ambas as formulações, sendo indicado concentração de 13% para diluição em água da versão sólida e 10% para versão líquida do produto.

Ambas as formulações diluídas em água apresentaram aparente aumento de viscosidade da solução em relação à água e, após aplicação, não foi constatada distinção visual entre as áreas com e sem aplicação das soluções.

4.3 METODOLOGIA ÍNDICE EFETIVO DE EFICIÊNCIA

Para avaliar a eficiência dos retardantes, foi utilizada a metodologia de análise Índice efetivo de eficiência (IEE) desenvolvida por Beutling *et al.*, (2018). A metodologia do IEE é baseada nos estudos de Ribeiro, Viegas e Batalha (2006), no qual os autores utilizaram uma relação da velocidade do fogo e altura de chama para avaliar a eficiência de um retardante de fogo segundo o *global efficiency index* (σ).

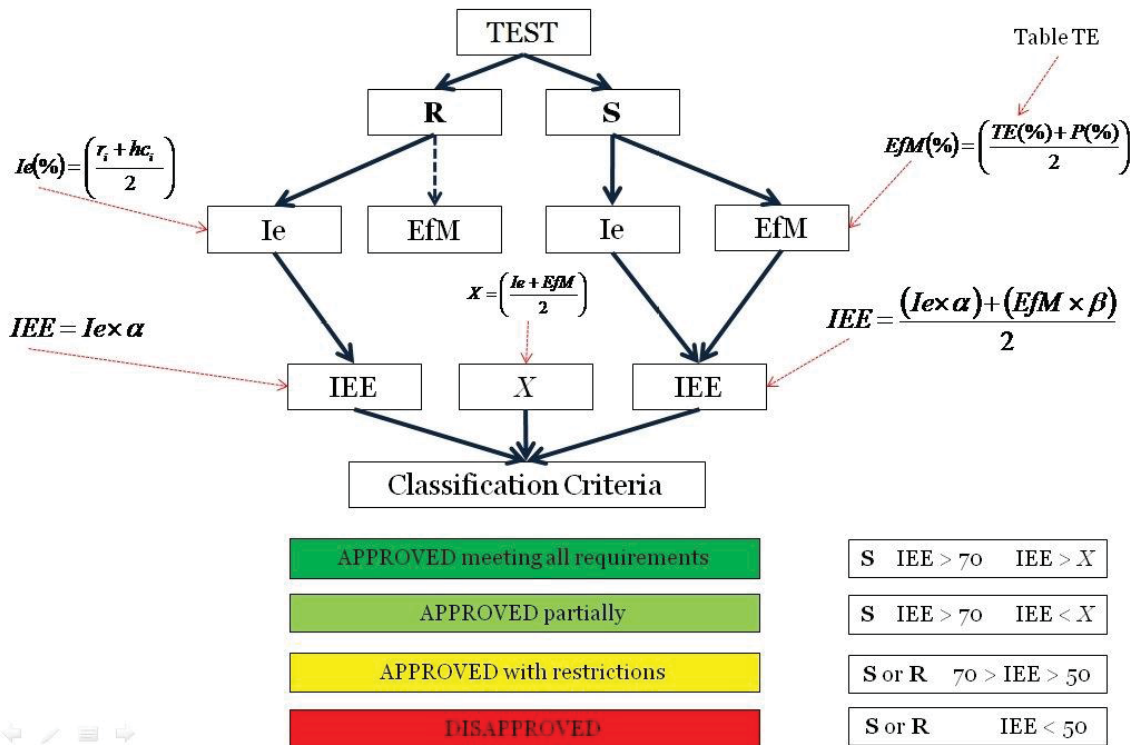
O IEE apresenta um processo de análise mais sofisticado que o seu precursor, pois dá a possibilidade de avaliar o retardante em diferentes condições de formulação e concentração e adiciona a variável “efeito martelo” (EfM), que avalia, exclusivamente, a capacidade do retardante em suprimir o fogo. Tais características possibilitam ao IEE a capacidade de avaliar diferentes produtos sobre o mesmo espectro de eficiência (BEUTLING *et al.*, 2018).

É evidente que um produto que possua a capacidade de suprimir o fogo é mais interessante do que um produto com apenas capacidades retardantes. O IEE trabalha com esse fator, dando diferentes pesos para a capacidade retardante e capacidade supressora.

Para cada teste, um produto pode apresentar dois resultados: um deles como retardante (R), significa que o produto não foi capaz de parar o avanço do fogo até o final da chapa de testes, e o outro como supressante (S), significa que o produto foi capaz de suprimir o avanço do fogo antes do final da chapa de testes.

O processo de avaliação pelo IEE segue o fluxograma apresentado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – Fluxograma para a avaliação do Índice efetivo de eficiência



Fonte: Beutling *et al.*, (2018).

Quando o resultando é retardante, ou seja, sem ação supressante, o EfM é igual a zero. A variável de análise do potencial retardante do produto é o Índice de eficiência (Ie), sendo calculado segundo uma relação de altura de chama e velocidade de propagação entre as áreas com e sem retardante, demonstrado pelas equações a seguir.

$$RVP = \frac{VPMC}{VPMS} \quad r_i = (1 - RVP) * 100 \quad RHC = \frac{HMCC}{HMCS}$$

$$hc_i = (1 - RHC) * 100 \quad Ie = \frac{r_i + hc_i}{2}$$

Sendo:

RVP = taxa de redução na velocidade de propagação (m/s);

VPMC = velocidade de propagação média com retardante (m/s);

VPMS = velocidade de propagação média sem retardante (m/s);

r_i = percentagem de redução na velocidade de propagação (%);

RHC = taxa de redução da altura de chama (cm);

HMCC = altura média de chama com retardante (cm);

HMCS = altura média de chama sem retardante (cm);
 hc_i = percentagem de redução na altura de chama (%);
 le = índice de eficiência.

A velocidade de propagação (r) foi determinada pelo espaço percorrido pela linha de fogo sobre o tempo decorrido. As medições foram realizadas com a ajuda de uma régua com intervalos de 10 centímetros, esta posicionada paralelamente ao comprimento da chapa e um cronômetro digital.

$$r = \Delta s / \Delta t$$

Onde:

r = velocidade de propagação ($m \cdot s^{-1}$);

Δs = diferença entre o espaço final e inicial (m);

Δt = diferença entre o tempo final e inicial (s).

A altura de chama foi determinada visualmente, no momento de cada queima, e coletada a cada 10 centímetros do avanço do fogo. As medições das alturas de chamas foram realizadas com o auxílio de marcações na parte posterior da câmara de combustão, tomando como referência o ponto de vista do observador.

Nos casos em que o retardante apresenta efeito supressante, além do índice de eficiência, a metodologia requer o cálculo do EfM.

$$EfM = \frac{TE + P}{2}$$

Em que:

EfM = *hammer effect*;

TE = tempo de extinção (%);

P = percentual de penetração (%).

O tempo de extinção é o tempo que o fogo leva para se extinguir dentro da área de aplicação do retardante. Seu valor é encontrado a partir da relação de intervalos de tempo e um valor percentual de eficiência perdida, sendo esse

intervalo de tempo de 10 segundos de frente de fogo ativa na área com aplicação de retardante e o percentual de redução de eficiência de 1%.

$$TE = 100 - (\sum TAC/10)$$

Em que:

TE = tempo de extinção (%);

TAC = tempo da frente de fogo ativa dentro da área com aplicação do produto (s).

O percentual de penetração, por sua vez, é a distância que a linha de fogo consegue penetrar na área com retardante, e seu valor equivale à relação entre a distância percorrida e um valor de percentagem de eficiência perdida, sendo a relação de 1% de eficiência perdida a cada um centímetro que o fogo consegue entrar na área com retardante.

$$P = 100 - DPC$$

Em que:

P = percentual de penetração (%);

DPC = distância pela frente de fogo percorrida dentro da área com aplicação de retardante (cm).

A variável "X", que nada mais é do que a média entre o Ie e o EfM do produto supressante, vem para auxiliar na categorização do produto segundo os critérios de classificação, servindo de comparador com o IEE para definir o seu uso com base nas limitações do produto.

$$X = \frac{Ie + EfM}{2}$$

Aliado aos cálculos anteriores, o IEE utiliza dois coeficientes, α e β , usados para ajustar os índices ao critério de classificação. Estes coeficientes

são utilizados para multiplicar o I_e e o EfM . Resumidamente, são usados para favorecer resultados supressantes e desfavorecer resultados retardantes.

Resultados retardantes devem seguir a seguinte equação para encontrar o IEE.

$$IEE = I_e * \alpha$$

Resultados supressantes devem seguir a equação abaixo para o cálculo do IEE.

$$IEE = \frac{(I_e * \alpha) + (EfM * \beta)}{2}$$

Em que:

IEE = índice de eficiência efetivo

$\alpha = 0,714285714285714\dots$

$\beta = 1,285714285714285\dots (1+(1- \alpha))$

Encontrados os índices, o próximo passo foi classificar o produto segundo o critério preconizado pelo método.

- I. Supressante, com IEE maior que X: aprovado atendendo todas as exigências (verde escuro);
- II. Supressante, com IEE menor que X: aprovado atendendo parcialmente as exigências (verde claro);
- III. Supressante ou retardante, com $70 > IEE > 50$: aprovado com restrições de uso (amarelo);
- IV. Supressante ou retardante, com IEE abaixo de 50: reprovado (vermelho).

A metodologia é bastante sensível a alterações de concentração e formulação e dependente de boas práticas laboratoriais (resguardar com bastante critério a montagem da manta de combustível, preparo e aplicação da solução a ser testada e cotejo da coleta de dados) (BEUTLING *et al.*, 2018).

4.3.1 Análise estatística dos tratamentos empregados

Inicialmente, foram levantadas três pressuposições a serem analisadas pela ANOVA. A primeira refere-se às médias das taxas de redução na velocidade de propagação: a hipótese de nulidade (H_0RVP) considera que não há diferenças significativas entre as médias das taxas de redução na velocidade de propagação nas áreas sem aplicação de retardante, enquanto, a hipótese alternativa (H_1RVP) considera que há diferenças significativas entre as médias das taxas de redução na velocidade de propagação nas áreas sem aplicação de retardante.

A segunda pressuposição refere-se às médias de taxa de redução da altura de chama: a hipótese de nulidade (H_0RHC) considera que não há diferenças significativas entre as médias de taxa de redução da altura de chama nas áreas sem aplicação de retardante, já a hipótese alternativa (H_1RHC) considera que há diferenças significativas entre as médias de taxa de redução da altura de chama nas áreas sem aplicação de retardante.

A terceira pressuposição refere-se às médias dos índices de eficiência efetivo: a hipótese de nulidade (H_0IEE) considera que não há diferenças significativas entre as médias dos índices de eficiência efetivo nas áreas sem aplicação de retardante e a hipótese alternativa (H_1IEE) considera que há diferenças significativas entre as médias dos índices de eficiência efetivo nas áreas sem aplicação de retardante.

Sendo encontradas diferenças significativas entre as médias analisadas, estas foram submetidas ao teste comparador de médias *Tukey* ao nível de 1% de probabilidade. Todas as análises foram conduzidas ao nível de 1% de significância e realizadas no *software* SAS University.

5 RESULTADOS

5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO E HOMOGENEIDADE ENTRE AMOSTRAS

A partir dos dados coletados e apresentados nos apêndices 1, 2, 3 e 4, segue a sumarização dos resultados.

5.1.1 Resultados da caracterização do material combustível

Os dados oriundos do teste em epirradiador estão dispostos no apêndice 1 Tabela 7 e os resultados da análise de inflamabilidade e combustibilidade do material combustível estão resumidos na TABELA 3.

Tabela 3 – Resultado de avaliação de inflamabilidade e combustibilidade do feno de tifton

Combustível	média			U%	FI	IC	VI
	TI	DC	HC				
<i>Tifton sp</i>	5,86	13,56	33,52	7,86	100	5	5

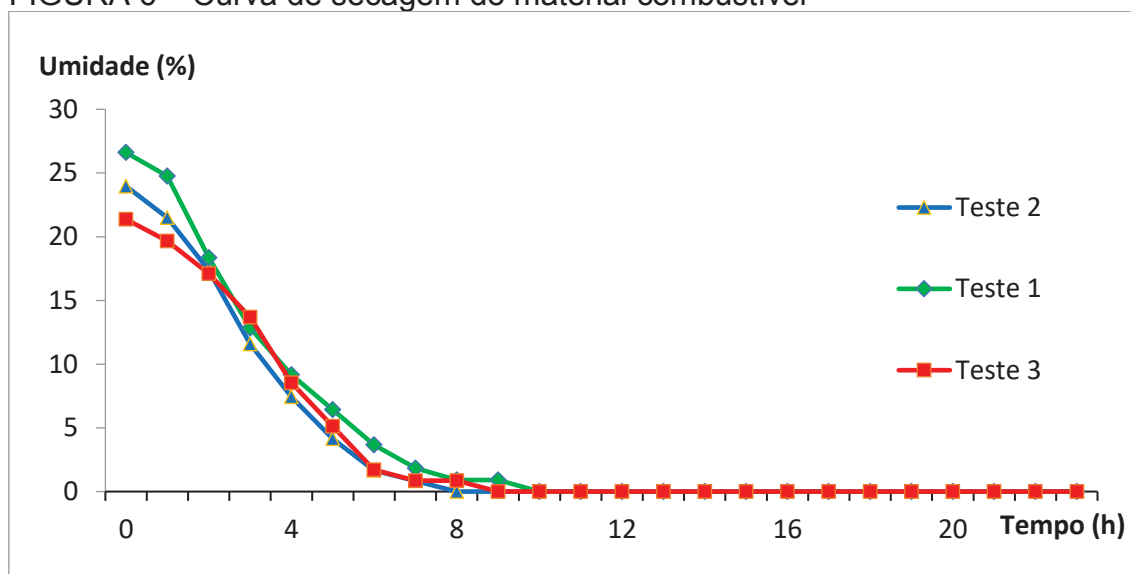
Nota: TI - tempo para ignição (s); DC - duração da combustão (s); HC - altura da chama (cm); U% - teor de umidade (%); FI – frequência de ignição (%); IC – índice de combustibilidade; VI – valor de inflamabilidade.

Fonte: O autor (2020)

Como observado acima, as características inatas do feno de tifton, bem como as condições de secagem ao qual o material foi submetido, conferiram ao material classificação de muito alta combustibilidade e extremamente inflamável.

No que tange a secagem do feno em estufa, os três testes realizados apresentaram resultados muito semelhantes, onde o tempo necessário para alcançar 0% de umidade nas três amostras não chegou a alcançar 11 horas. A amostra do teste 1 iniciou com 138 gramas e, após 10 horas de secagem, chegou a 109 gramas e não reduziu mais sua massa. A amostra do teste 2 iniciou com 150 gramas e, após 8 horas, reduziu para 121 gramas. Já a amostra do teste 3 iniciou com 142 gramas e, após 9 horas, estabilizou sua massa em 117 gramas, como demonstrado na Figura 6.

FIGURA 6 – Curva de secagem do material combustível



Fonte: O autor (2020).

Com base na observação destes resultados, ficou claro a não necessidade de secar o material combustível por 48 horas para alcançar 0% de umidade e, sim, que um período de secagem de 24 horas foi mais que o suficiente para homogeneizar a umidade do feno das amostras a 0% de umidade.

Foram encontrados, para as áreas sem aplicação de retardante, as seguintes variáveis de comportamento do fogo: altura média do fogo de 69,55 cm, velocidade média de propagação de $0,0072 \text{ m.s}^{-1}$ e intensidade do fogo de $28,23 \text{ kcal.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

5.1.2 Resultados da análise de homogeneidade entre as amostras

Os dados das médias de velocidade de propagação estão dispostos no apêndice 2 (Tabela 8) e os resultados da análise de variância das médias de velocidade de propagação, das áreas sem aplicação de retardante, estão na Tabela 4.

Tabela 4 – ANOVA para as médias de velocidade de propagação das áreas sem tratamento

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Observado	F Requerido	
					5%	1%
Tratamentos	6	2,893E-06	4,823E-07	1,5038 ^{ns}	2,352	1,869
Erro	63	2,020E-05	3,207E-07			
Total	69					

Nota: ns – não significativo.

Fonte: O autor (2021).

Os valores de F de Fischer-Snedecor requeridos para 6 e 63 Graus de Liberdade são de 2,352 para 5% de significância e 1,869 para 1% de significância, sendo o valor do F observado, 1,5038^{ns}, inferior aos valores de F requeridos. Não sendo verificadas diferenças significativas entre as médias das velocidades de propagação nas áreas sem aplicação de retardante, portanto a hipótese de nulidade foi aceita e descartou-se a hipótese alternativa.

Os dados das médias de altura de chama estão dispostos no apêndice 2 (Tabela 9) e os resultados da análise de variância das médias de velocidade de propagação, das áreas sem aplicação de retardante, estão na Tabela 5.

Tabela 5 – ANOVA para as médias de altura de chama das áreas sem tratamento

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Observado	F Requerido	
					5%	1%
Tratamentos	6	654,5859	109,0976	1,2534 ^{ns}	2,352	1,869
Erro	63	5483,3428	87,0372			
Total	69					

Nota: ns – não significativo. Fonte: O autor (2021).

O valor do F observado de 1,2534^{ns} mostrou-se inferior aos valores de F requeridos, portanto, não foram verificadas diferenças significativas entre as médias das alturas de chama nas áreas sem aplicação de retardante, portanto a hipótese de nulidade foi aceita e descartou-se a hipótese alternativa.

Tais análises de variância indicam homogeneidade das velocidades de propagação e altura de chama das áreas sem aplicação de retardante entre as parcelas, e, portanto, permitem inferir que as diferenças do IEE encontradas sejam interpretadas diretamente como resultados da ação dos tratamentos com retardantes.

5.2 RESULTADOS DOS TRATAMENTOS EMPREGADOS

A partir dessa sessão serão apresentados e discutidos os resultados das capacidades extintoras dos produtos retardantes utilizados, bem como da água, usada como uma testemunha, considerando-se que um produto retardante tem que apresentar eficiência melhor do que a água no combate ao fogo para justificar o seu uso. Os resultados estão dispostos no apêndice 3, nas Tabelas 10, 11 e 12.

5.2.1 Resultados água

A água proporcionou apenas resultados retardantes, reduzindo aproximadamente pela metade as variáveis de altura de chama e velocidade de propagação, apresentando uma média de RHC de 47,85% e média RVP de 51,66%, portanto, atingindo um IEE médio de 35,54. Segundo a metodologia empregada, a água foi reprovada como retardante de chamas de longa duração.

5.2.2 Resultados Bt

Os resultados do *Bt* foram pouco notórios no combate indireto às chamas, apesar da solução empregada ter conseguido reduzir aproximadamente pela metade as variáveis de altura de chama e velocidade de propagação. Em nem uma das repetições o produto conseguiu apresentar resultado supressante.

O produto foi capaz de atingir uma média RHC de 46,94%, que pouco se difere da capacidade da água na redução da velocidade de propagação, por outro ângulo, analisando unicamente a média RVP encontrada de 45,92%, o produto apresentou capacidades inferiores à da água no combate ao fogo. Tais características, bem como a incapacidade do produto em suprimir o avanço do fogo, conferiram ao *Bt* o IEE de 33,16.

Avaliado o produto, mesmo que a solução aplicada do *Bt* tenha apresentado algum resultado retardante de longa duração, ele ainda

apresentou singelo resultado inferior ao da água e é classificado pelo método como reprovado e inapto a combater chamas como retardante de longo prazo.

5.2.3 Resultados Fe

Os produtos *Fe*, nas formulações líquida e sólida por se tratarem basicamente do mesmo produto, apenas diferindo na formulação de apresentação, demonstraram resultados muito parecidos. Ambos conseguiram em 70% das repetições a que cada formulação foi submetida, resultado supressor de chamas superficiais.

A formulação sólida apresentou média RHC de 69,56%, média RVP de 71,36% e IEE de 50,33. Comparando com as variáveis de RHC, RVP e IEE da água, a versão sólida superou, em todas as análises, a eficiência de combate ao fogo somente com água.

A formulação líquida apresentou média RHC de 70,31%, média RVP de 75,39% e IEE de 52,04. Comparando com as variáveis de RHC, RVP e IEE da água, a versão líquida também superou, em todas as análises, a eficiência de combate ao fogo da água e, mesmo sendo indicada uma concentração de uso menor que a outra, a versão líquida apresentou efeitos pouco superiores aos da formulação sólida.

Ambas as formulações foram aprovadas como retardantes de chamas para combustíveis classe A com restrições de uso pela metodologia. Tais restrições ressaltam-se pela incapacidade dos produtos *Fe* em suprimir o avanço do fogo.

5.2.4 Resultados Pk

Os resultados do Pk foram bastante promissores no combate às chamas. Dadas as capacidades extintoras do produto, as chamas superficiais foram extintas em todas as repetições antes de percorrem 20 centímetros dentro da área com aplicação da calda, porém, o produto também se mostrou efetivo na extinção das chamas no interior da manta combustível, tendo conseguido êxito na supressão de chamas por completo em 50% das repetições.

O produto apresentou uma média da RVP de 84,84%, a média da RHC de 85,22% e um IEE médio de 68,00 e, apesar do produto ter apresentado efeito supressante de chamas em metade das amostras analisadas, em nem um dos testes que o produto foi supressante a variável X foi superada pelo IEE. Tal efeito enaltece as limitações da capacidade supressora de chamas do produto e, apesar da aprovação, destacam-se suas restrições de uso como agente supressor de chamas de longa duração.

5.2.5 Resultados Ce

Os resultados obtidos pelos testes com o produto *Ce* foram muito aquém dos esperados de um produto retardante de longa duração, não conseguindo êxito em nem uma das repetições a capacidade de extinguir as chamas superficiais da cama. Tais resultados são constatados pelos índices RVP de 25,25%, RHC de 39,06 e IEE de 23,11 e, comparando com os obtidos pela água, é clara a pouca capacidade do produto de agir como bloqueador de chamas.

Portanto, segundo a metodologia aplicada, o *Ce* foi reprovado e não é indicado para uso como retardante de longa duração para fogo em combustíveis classe A.

5.2.6 Resultados Ft

O produto *Ft* apresentou, assim como o *Pk*, resultados bastante promissores no combate ao fogo. As chamas superficiais foram extintas em todas as repetições, também, antes de percorrem 20 centímetros dentro da área com aplicação da calda, entretanto, o produto mostrou bom efeito na extinção das chamas no interior da manta combustível, tendo conseguido êxito na supressão de chamas por completo em 80% das repetições. Apesar de expressivo o número de resultados supressantes, deve-se ter em mente que a distância de penetração ultrapassou sempre 50% da área com aplicação retardante e o tempo de permanência da frente de fogo ativa foi longo (maior que 4 minutos).

O *Ft* apresentou uma média da RVP de 91,13%, a média da RHC de 88,00% e um IEE médio de 68,78 e, assim como o *Pk*, em nenhuma das repetições que o produto foi supressante, a variável X foi superada pelo IEE. Tal efeito indica as limitações da capacidade supressora de chamadas do produto e, apesar do índice estar perto do limiar de transição entre a aprovação como retardante com restrições ao uso e a aprovação parcial como supressante de chamadas, o *Ft* foi aprovado como retardante de chamadas com restrições de uso.

5.3 Análises estatísticas dos tratamentos e discussão dos resultados

Com base nos resultados apresentados, as variáveis RVP, RHC e IEE foram submetidas à ANOVA e, em todos os casos, foram detectadas diferenças significativas entre as médias dos tratamentos nas variáveis de RVP, RHC e IEE, estando estas dispostas no apêndice 4 nas tabelas 13, 14 e 15, respectivamente.

Constatadas diferenças significativas entre as médias dos tratamentos, estes foram submetidos ao teste comparador de médias *Tukey*, estando agrupados os resultados na tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios das variáveis de inflamabilidade

Tratamento	RVP	RHC	IEE
Ft	91,13 a	89,81 a	68,78 a
Pk	84,84 a	85,22 a	68,00 a
Fe L	75,39 b	70,31 b	52,04 b
Fe S	71,36 b	69,56 b	50,33 b
Água	51,66 c	47,85 c	35,54 c
Bt	45,92 c	46,94 c	33,16 cd
Ce	25,25 d	39,06 c	22,97 d

Nota: letras iguais indicam que, ao nível de 1%, não há diferença significativa entre as médias. RVP – taxa de redução na velocidade de propagação (%); RHC – taxa de redução de altura de chama (%); IEE – índice de eficiência efetiva; Fe L – Fe versão líquida; Fe S – Fe versão sólida.

Fonte: O autor (2021).

Os resultados observados nos testes de comparação de médias evidenciam as semelhanças entre os resultados obtidos entre o *Ft* e o *Pk*, entre as versões líquida e sólida do *Fe*, e entre a água e o *Bt*.

O *Ce* apresentou os piores resultados dos tratamentos empregados, inclusive do que foi empregada apenas água, em estudos realizados por Liodakis *et al*, (2008) com diferentes elementos retardantes, como o carbonato de cálcio e hidróxido de magnésio, o autor constatou que tais substâncias possuem excelente capacidades antichamas, porém no tangente aos efeitos de longa duração o produto *Ce* foi muito pouco eficiente.

O *Bt* apresentou resultados pouco expressivos em comparação aos demais produtos analisados, Liodakis, Vorisis e Agiovlasis, (2006) também encontrou efeitos retardantes inferiores do carbonato de amônio em comparação com o polifosfato de amônia e fosfato diamônico, componentes principais dos produtos *Ft* e *Pk*.

As versões sólida e líquida do *Fe* apresentaram resultados muito semelhantes, porém inferiores aos dos produtos *Ft* e *Pk*, tal resultado foi contrário aos dos encontrados por Tzamtzis *et al*, (1997) que ao comparar produtos, produtos a base de sulfato de amônio e polifosfato de amônio, concluiu que produtos à base de sulfato de amônio são mais eficientes no retardo do fogo.

Constatou-se que os produtos mais eficientes na prevenção e combate, *Ft* e *Pk*, ambos possuem em sua composição polifosfato de amônia e fosfato diamônico, tal potencial ignífugo dessas substâncias em combustíveis Classe A foi constata em estudos realizados por George e Susott em 1971, Pappa *et al*, (1995), Statheropoulos *et Kyriakou*, (2000) e Liodakis, Vorisis e Agiovlasis em 2006.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises dos resultados obtidos, pode-se concluir que os produtos *Ce* e *Bt* não foram capazes de apresentar ação retardante superior ao da água sozinha e, levando em consideração o risco ambiental e custo para a aquisição destes, não se recomenda o uso desses produtos como retardantes de chamas de longa duração para fins florestais.

O *Fe*, nas versões sólida e líquida, apresentou apenas resultados retardantes de chamas. Portanto, com base nos índices encontrados, classifica-se o uso dos produtos *Fe* como retardantes de fogo de longa duração com restrições ao uso.

O *Pk* apresentou resultados bastante significativos no combate ao fogo, porém, apesar dos resultados expressivos nos índices RVP e RHC, o IEE estar abaixo de 70 ainda o classifica como retardante de chamas de longa duração com restrições ao uso.

O *Ft*, assim como o *Pk*, apresentou resultados bastante significativos no combate ao fogo, porém, apesar dos resultados expressivos pelo RVP e RHC, o IEE estar abaixo de 70 ainda o classifica como retardante de chamas de longa duração com restrições ao uso.

REFERÊNCIAS

BATISTA, A. C.; MARTINI, A.; PEREIRA, J. F.; FERREIRA, J. Avaliação da eficiência de um retardante de longa duração, à base de polifosfato amônico, em queimas controladas em condições de laboratório **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 79, p. 223-229, 2008.

BATISTA, A. C. **Incêndios florestais**. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 1990. 115 p.

BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; STOLLE, L.; BEUTLING, F. Effective efficiency index (IEE): methodology for analyzing the efficiency of fire retardants in laboratory. **Advances in Forest Fire Research**, 2018.

BLAKELY, A. Flammability reduction comparisons of four forest fire retardants. **USDA Forest Service**, Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper INT-381 (Ogden, UT), 1988.

BOWMAN, D. M. J. S.; BALCH, J.; ARTAXO, P.; BOND, W. J.; COCHRANE, M. A.; D'ANTONIO, C. M.; DEFRIES, R.; JOHNSTON, F. H.; KEELEY, J. E.; KRAWCHUK, M. A.; KULL, C. A.; MACK, M.; MORITZ, M. A.; PYNE, S.; ROOS, C. I.; SCOTT, A. C.; SODHI, N. S.; SWETNAM, T. W. The human dimension of fire regimes on Earth. **Journal of Biogeography**, v 38, p. 2223–2236, 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego, portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978 - Norma Regulamentadora 23 - Proteção Contra Incêndios. Disponível em: <<http://www.pncq.org.br/uploads/2012/09/NR-23.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2021.

BYRAM, G. M. **Combustion of forest fuels**. Forest fire: control and use. New York, NY: McGraw-Hill, 1959. p. 61-89.

FIEDLER, N. C.; CANZIAN, W. P.; MAFIA, R. G.; RIBEIRO, G. A.; JUNIOR, J. K. Intensidade de queima de diferentes retardantes de fogo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 39, n. 4, p. 691 - 696, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (IBAMA). **Prevfogo controla incêndio na terra indígena Arariboia, no Maranhão**, 2015. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/component/tags/tag/maranhao>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS (IBAMA). **Parecer Técnico nº 514/2018-COASP/CGASQ/DIQUA**. Brasília, 2018. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/quimicos-e-biologicos/retardantes-de-chamas/2018-SEI_IBAMA-Parecer-Tecnico-5142018-9COASP-CGASQ-DIQUA.pdf>. Acesso em: 23 ago 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) **Monitoramento dos focos ativos por países**, 2018. Disponível em: <http://www.inpe.br/queimadas/estatistica_paises>. Acesso em: 07 ago 2020.

GEORGE, C.; SUSOTT, R. Effects of ammonium phosphate and sulfate on the pyrolysis and combustion of cellulose. **USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper INT-18** (Ogden, UT), 1971.

LIODAKIS, S.; AGIOVLASITIS, I.; ANTONOPOULOS, I.; STAMATAKIS, M. Fire retarding performance of hydromagnesite on forest species from a wildland/urban interface area in Athens. In: **Proceedings of the 5th international conference on forest fire research**, 27–30 November, Figueira da Foz, Portugal, 2006.

LIODAKIS, S.; ANTONOPOULOS, I.; AGIOVLASITIS, I.P.; KAKARDAKIS, T. Testing the fire retardancy of Greek minerals hydromagnesite and huntite on WUI forest species *Phillyrea latifolia* L. **Thermochimica Acta**, v. 469 p. 43-51, 2008.

LIODAKIS, S.; STATHEROPOULOS, M. K.; TZAMTZIS, N. E.; PAPPA, A. A.; PARISSAKIS, G. K. The effect of salt and oxide-hydroxide additives on the pyrolysis of cellulose and *Pinus halepensis* pine needles. **Thermochimica Acta**, v. 278 p. 99–108, 1996.

LIODAKIS, S.; VORISIS, D.; AGIOVLASITS, L. P. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles. **Thermochimica Acta**, v. 444 p. 157–165, 2006.

MACEDO, F. W. **Fogos florestais**. Lisboa: Ciência e Vida, 1987.

MACHADO FILHO, C.; MARTINS, M. C.; RIBEIRO, G. A.; LIMA, G. S.; CARDOSO, M. T.; TORRES, C. M. M. E.; PINTO, F. B. Eficiência de um retardante de fogo de longa duração utilizado em incêndios florestais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 365 - 371, abr.-jun., 2012.

MCCOLL-GAUSDEN S.C.; PENMAN TD. Pathways of change: predicting the effects of fire on flammability. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 243-253, 2019.

MUÑOZ, V. R.; RUIZ, E. M. **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencia**. Madrid: McGraw Hill, 2010.

MYERS, R. L. **Convivendo com o fogo** – manutenção dos ecossistemas e subsistência com o manejo integrado do fogo. USA: TNC, 2006. 28 p.

PAPPA, A.; TZAMTZIS, N.; STATHEROPOULOS, M.; PARISSAKIS, G. Thermal analysis of *Pinus halepensis* pine-needles and their main components in the presence of $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. **Thermochim Acta** 1995; 261:165–73.

PASTOR, F. E. **Contribució a l'estudi dels efec - tes dels retardants en l'extinció d'incendis forestals**. 304 p. Tese (Doutorado) - Centre de Estudis del Risc tecnològic, Departament d'Enginyeria Química, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona, 2004.

PETRICCIONE, M. **Infiammabilità della lettiera di diverse specie vegetali di ambiente Mediterraneo**. 48 f. Tese (Doutorado em Biologia Aplicada) - Dipartimento di Biologia Strutturale e Funzionale, Università Degli Studi Di Napoli Federico II, Napoli, 2006.

PIERONI, M. C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. Retardantes de chama bromados: uma revisão. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 317-326, Apr. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422017000300317&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 16 jul 2019.

PLANAS, E.; ÀGUEDA, A.; PASTOR, E. Different scales for studying the effectiveness of long-term forest fire retardants. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 34, p. 782-796, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000324>>. Acesso em: 17. jul. 2018.

PLUCINSKI, M. P.; SULLIVAN, A. L.; HURLEY, R. J. A methodology for comparing the relative effectiveness of suppressant enhancers designed for the direct attack of wildfires. **Fire Safety Journal**, Oxford, v. 87, p. 71-79, 2017.

RIBEIRO, G. A.; LIMA, G. S.; OLIVEIRA, A. L. S.; CAMARGOS, V. L.; MAGALHAES, M. U. Eficiência de um retardante de longa duração na redução da propagação do fogo. **Revista Árvore**, v. 30, p. 1025-1031, 2006.

RIBEIRO, M. L.; VIEGAS, D. X.; BATALHA, M. Assessment of fire retardant efficiency. **V International Conference on Forest Fire Research**, 2006.

ROTHERMEL R.; PHILPOT, C. **Reducing fire spread in wildland fuels**. In: Proceedings of the meeting to honor Clay Preston Butler. Stanford, CA: Stanford Research Institute; 1975. Disponível em: <https://www.fs.fed.us/rm/fire/wfcs/documents/Reducing_Fire_Spread_in_Wildl_and_Fuels.pdf>. Acesso em: 20. jul. 2018.

SANT'ANNA, C. M.; FIEDLER, N. C.; MINETTE, L. J. **Controle de incêndios florestais**. Alegre - ES: UFV, 2007. 152 p.

SCOTT, A. C., BOWMAN, D. M. J. S., BOND, W. J., PYNE, S. J., ALEXANDER, M. E., **Fire on Earth: introduction**, Wiley-Blackwell, Chichester, England, 2014.

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. 2 ed. Curitiba, 2017. 250 p.

SOARES, R. V. Prevenção de incêndios florestais-II. Técnicas preventivas, **Revista Floresta**, v. 3, n. 1, p. 43-49, 1971.

STATHEROPOULOS, M.; KYRIAKOU, S.A. Quantitative thermogravimetric-mass spectrometric analysis for monitoring the effects of fire retardants on cellulose pyrolysis **Analytica Chimica Acta** 409, 203–214, 2000.

VALETTE, J. C. **Inflammabilities of mediterranean species**. Porto Carras: Research and Development of the European Commission European School of Climatology and Natural Hazards, 1992. 12 p. (Document PIF9208).

TZAMTZIS, N. E.; LIODAKIS, S. E.; PAPPA, A. A.; STATHEROPOULOS, M. K.; PARISSAKIS, G. K. The effect of $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ on the composition of volatile organic pyrolysis products of cellulose. **Polymer Degradation and Stability**, v.56, p.287 – 290, 1997.

APÊNDICE 1

Tabela 7 - Dados do teste em epirradiador

Repetição	Massa (g)	T. ignição (s)	T. Combs (s)	h chama
1	1,004	12	12	35
2	1,007	6	11	33
3	1,023	3	16	35
4	0,969	4	12	35
5	1,015	6	10	41
6	0,991	5	16	32
7	1,028	4	11	36
8	1,011	5	14	37
9	1,005	6	10	36
10	1,026	4	15	28
11	0,987	7	14	32
12	0,995	6	13	26
13	0,951	8	18	33
14	0,972	4	14	31
15	0,972	6	13	33
16	0,975	6	14	29
17	1,017	3	14	28
18	1,017	5	15	32
19	1,004	6	13	32
20	1,009	5	14	33
21	1,02	5	16	34
22	1,024	5	15	36
23	1,001	4	17	31
24	1,027	4	19	29
25	0,976	4	16	28
26	1,009	9	11	41
27	1,003	7	10	40
28	1,009	9	12	31
29	1,008	6	11	32
30	1,006	6	12	32
31	1,001	7	10	33
32	1,009	9	13	37
33	0,998	5	16	32
34	1,011	6	14	40
35	1,004	6	12	36
36	1,011	7	11	38
37	1	6	14	27
38	1,008	4	16	33
39	1,006	7	13	29
40	0,995	6	13	31
41	1,011	6	14	33
42	0,993	6	9	39
43	1,001	8	12	40

44	0,995	4	16	35
45	1,006	7	14	32
46	1,009	4	16	32
47	1	6	12	38
48	0,999	4	16	34
49	1,005	7	15	34
50	1,001	8	14	32

Fonte: O autor (2020).

Apêndice 2

Tabela 8 – Médias de velocidade de propagação das áreas sem aplicação de retardante (m.s⁻¹)

Repetição	Água	Bt	Fe Sólido	Fe Líquido	Ft	Ce	Pk
1	0,0073	0,0078	0,0074	0,0068	0,0067	0,0074	0,0072
2	0,0060	0,0072	0,0065	0,0070	0,0066	0,0075	0,0071
3	0,0072	0,0088	0,0068	0,0069	0,0068	0,0074	0,0072
4	0,0076	0,0083	0,0074	0,0071	0,0077	0,0076	0,0073
5	0,0074	0,0083	0,0079	0,0081	0,0073	0,0073	0,0082
6	0,0081	0,0077	0,0069	0,0068	0,0071	0,0075	0,0064
7	0,0059	0,0066	0,0076	0,0071	0,0070	0,0080	0,0084
8	0,0071	0,0065	0,0072	0,0067	0,0071	0,0072	0,0084
9	0,0075	0,0068	0,0068	0,0069	0,0071	0,0080	0,0067
10	0,0081	0,0072	0,0080	0,0068	0,0074	0,0078	0,0080

Fonte: O autor (2020).

Tabela 9 – Médias de altura de chama das áreas sem aplicação de retardante (cm)

Repetição	Água	Bt	Fe Líquido	Fe Líquido	Ft	Ce	Pk
1	71,25	68,13	71,25	63,75	66,25	78,13	65,00
2	58,75	69,38	66,88	70,00	66,25	75,63	68,13
3	64,38	70,63	68,75	71,88	71,25	73,75	66,25
4	71,25	68,13	67,50	67,50	76,25	71,88	75,63
5	66,88	70,63	73,75	74,38	74,38	76,88	78,75
6	74,38	73,13	66,25	65,00	72,50	71,25	65,00
7	63,13	65,63	75,00	68,75	62,50	71,25	78,75
8	64,38	66,25	71,25	66,88	73,13	67,50	74,38
9	67,50	64,38	71,88	61,25	68,13	72,50	65,00
10	73,13	66,25	73,13	65,63	61,88	74,38	74,38

Fonte: O autor (2020).

Apêndice 3

Tabela 10 – Médias das taxas de redução de velocidade de propagação (RVP)

Repetição	Tratamento						
	Água	Bt	Fe Sólido	Fe Líquido	Ft	Ce	Pk
1	56,08	58,85	86,66	88,29	92,59	30,13	90,11
2	44,07	46,11	67,78	65,87	90,11	27,62	76,91
3	52,96	44,75	69,12	61,18	82,85	25,98	81,40
4	51,17	42,20	63,41	75,02	89,22	17,05	81,99
5	56,14	41,46	64,57	78,05	92,66	0,14	81,12
6	57,10	51,05	87,26	90,82	94,00	38,84	88,17
7	44,31	34,19	69,25	71,46	93,40	31,71	91,34
8	50,74	45,38	67,38	69,36	94,50	31,86	87,43
9	45,90	53,38	64,79	77,33	92,26	26,32	84,38
10	58,14	41,81	73,35	76,56	89,68	22,79	85,59

Fonte: O autor (2021).

Tabelas 11 – Médias das taxas de redução de altura de chama (RHC)

Repetição	Tratamento						
	Água	Bt	Fe Sólido	Fe Líquido	Ft	Ce	Pk
1	50,88	51,56	80,35	76,47	88,68	60,32	73,08
2	40,43	55,32	67,85	67,14	77,36	41,82	85,32
3	44,08	41,95	60,00	77,74	95,79	45,76	86,42
4	48,07	47,16	62,96	68,89	90,82	34,61	85,45
5	50,65	51,86	72,88	69,08	91,93	40,16	86,03
6	55,63	43,93	83,40	73,85	89,66	36,84	87,18
7	42,97	42,10	70,67	70,91	88,00	32,63	85,19
8	42,52	39,62	66,32	64,11	94,87	33,33	86,55
9	51,11	48,74	73,57	60,82	91,19	31,03	90,38
10	52,14	47,17	57,61	74,10	71,72	34,12	86,55

Fonte: O autor (2021).

Tabela 12 – Médias dos índices de eficiência efetiva (IEE)

Repetição	Tratamento						
	Água	Bt	Fe Sólido	Fe Líquido	Ft	Ce	Pk
1	38,20	39,43	59,65	58,84	80,36	32,30	78,78
2	30,18	36,22	48,44	47,51	77,90	24,80	75,67
3	34,66	30,96	46,11	49,61	63,80	25,62	59,93
4	35,44	31,91	45,13	51,40	66,61	18,45	59,80
5	38,14	33,33	49,09	52,55	58,53	14,39	59,70
6	40,26	33,92	60,95	58,81	81,66	27,03	78,41
7	31,17	27,25	49,97	50,84	64,09	22,98	74,46
8	33,31	30,36	47,75	47,67	62,71	23,28	62,14
9	34,65	36,47	49,41	49,34	57,04	20,48	69,64
10	39,39	31,78	46,77	53,80	79,00	20,33	61,48

Fonte: O autor (2021).

Apêndice 4

Tabela 13 - ANOVA médias das taxas de redução de velocidade de propagação (RVP)

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Observado	F Requerido	
					5%	1%
Tratamentos	6	33386,4612	5564,4102	102,2005	2,35	1,87
Erro	63	3430,09865	54,4460			
Total	69					

Fonte: O autor (2021).

Tabela 14 - ANOVA médias das taxas de redução de altura de chama (RHC)

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Observado	F Requerido	
					5%	1%
Tratamentos	6	19681,9840	3280,3306	21,2767	2,35	1,87
Erro	63	9712,9887	154,1744			
Total	69					

Fonte: O autor (2021).

Tabela 15 - ANOVA médias dos Índices de eficiência efetiva (IEE)

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F Observado	F Requerido	
					5%	1%
Tratamentos	6	15768,2707	2628,0451	26,0935	2,35	1,87
Erro	63	6345,0658	100,7153			
Total	69					

Fonte: O autor (2021).