

MAYARA RIBEIRO LAGE

**RAVINAS E VOÇOROCAS: BIOENGENHARIA E RETARDANTES QUÍMICOS
COMO TECNOLOGIA DE CONTROLE E TRATAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Fillipe Tamiozzo Pereira Torres

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L174r
2023 Lage, Mayara Ribeiro, 1990-
Ravinas e voçorocas: bioengenharia e retardantes químicos
como tecnologia de controle e tratamento / Mayara Ribeiro Lage.
– Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (46 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Fillipe Tamiozzo Pereira Torres.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.509>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Incêndios florestais - Prevenção. 2. Solos - Erosão.
3. Materiais - Propriedades térmicas. I. Torres, Fillipe Tamiozzo
Pereira, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.943216

MAYARA RIBEIRO LAGE

**RAVINAS E VOÇOROCAS: BIOENGENHARIA E RETARDANTES QUÍMICOS
COMO TECNOLOGIA DE CONTROLE E TRATAMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Floresta, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de junho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 MAYARA RIBEIRO LAGE
Data: 24/08/2023 11:25:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mayara Ribeiro Lage
Autora

Documento assinado digitalmente
 FILLIPE TAMIOZZO PEREIRA TORRES
Data: 24/08/2023 12:37:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fillipe Tamiozzo Pereira Torres
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus e à Nossa Senhora, toda honra e glória para todo sempre.

Ao Fillipe Tamiozzo, meu orientador nesta fase, sempre solícito e humano, minha eterna admiração e gratidão.

Aos meus coorientadores, Gumercindo e Alexandre, cada um me auxiliando como podia, seja presencial seja remotamente, pela cooperação extremamente necessária.

Ao Gilberto Lana, técnico do Laboratório de Incêndios, meu amigo de campo e de laboratório, meu grande companheiro do início ao fim; sem ele a parte prática deste trabalho não seria possível. Obrigada pelas grandes ideias.

Aos meus pais, Gorete Ribeiro e Juracy Lage; este título de Dra. é nosso, vocês são os grandes responsáveis desta realização.

Ao meu irmão, Mateus Ribeiro Lage, minha referência de disciplina, foco e sabedoria. À minha cunhada, Elaíne Santana, alegria da nossa família, e à minha sobrinha que está a caminho; Maria Elisa, tia já te ama muito.

Ao meu noivo, Vinícius Sant'Anna, que sempre com paciência e muito respeito, nos dias mais difíceis, me reanimava e me mantinha forte para chegar até o fim.

Aos meus sogros, Dona Elzani e Sr. Aleixo, pelo amparo, carinho e zelo de sempre. Aos meus cunhados, Victor e Aline, companhias para a vida.

Aos grandes amigos Jackson Araújo, Thamíres Carvalho, Dayane Lopes Maria Cunha, Fabrício Vasconcelos, Tales Mendes, Hiohanes Cardoso e Wiane Meloni. Levarei sempre comigo um pouquinho de cada de um de vocês e dos momentos bons, e às vezes complicados, que passamos juntos neste tempo, que nos divertiram, distraíram e acima de tudo nos ensinaram. Muito obrigada!

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), instituição que sempre admirei e da qual sonhava fazer parte desde a infância, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Incêndios Florestais e Conservação da Natureza, que sempre estiverem de portas abertas, a qualquer dia e horário, para a realização do experimento ou da escrita deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à INGA Engenharia e à CEMIG, pela concessão da bolsa de estudos e pela parceria desde o início.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O estudo em questão faz parte como produto do Projeto de P&D da Aneel N° PD-04951-0581/2017, com o título: “Desenvolvimento de técnicas de bioengenharia de solos para drenagem superficial e controle de erosões lineares em linhas de transmissão e distribuição”. Esse Projeto de P&D foi desenvolvido pela Cemig Geração e Transmissão S/A juntamente com a empresa Ingá Engenharia e Consultoria Ltda.

Algo sempre parece impossível, até que seja feito.

Nelson Mandela

RESUMO

LAGE, Mayara Ribeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2023. **Ravinas e voçorocas: Bioengenharia e retardantes químicos como tecnologia de controle e tratamento.** Orientador: Fillipe Tamiozzo Pereira Torres.

Atividades antrópicas causam uma pressão substancial sobre o meio ambiente, o que gera a procura por soluções ambientais rápidas. Dentre os diversos agentes de degradação do ambiente, podemos destacar os incêndios florestais e a ameaça aos solos por processos erosivos. Este trabalho foi composto por dois capítulos, com os seguintes objetivos: avaliar o processo de evolução das propriedades físico-químicas, indicadoras de controle e estabilização da erosão, em solos em processo de recuperação por dois anos; avaliar o comportamento do fogo em mantas de controle de erosão, sintéticas e de fibras naturais e o efeito de retardantes químicos de longo prazo sobre o comportamento do fogo; determinar o produto de maior eficiência para cada tipo de material. No primeiro estudo, os resultados evidenciaram que, após dois anos, a aplicação das técnicas adotadas na recuperação de ravinas e voçorocas presentes em Cambissolo e Latossolo promoveu aumento de SB, CTC, pH7 e MOS combinado, com redução dos teores de Al^{3+} . No entanto, mudanças significativas nas propriedades físicas do solo em ravinas e voçorocas não foram observadas. No segundo capítulo, os resultados encontrados mostraram que as mantas Sintemax e Fibrax 400BF com composição de fibra de coco já apresentam, por si só, características retardantes de fogo e que as mantas Macmat3 e Biotextil 400TF não são recomendadas em áreas de alto risco de incêndio. Em relação à eficiência dos retardantes, a metodologia Índice de Eficiência Efetiva (IEE) indicou o uso de Phos-Chek. O Fertil Fire Líquido foi mais indicado para as mantas.

Palavras-chave: Química do solo. Física do solo. Fibras naturais. Fibras sintéticas. Índice de Eficiência Efetiva.

ABSTRACT

LAGE, Mayara Ribeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2023. **Ravines and gullies: Bioengineering and chemical retardants as control and treatment technology.** Advisor: Fillipe Tamiozzo Pereira Torres.

Anthropogenic activities cause substantial pressure on the environment, which generates the demand for quick environmental solutions. Among the various agents of environmental degradation, we can highlight forest fires and the threat to soils by erosion processes. This work was composed of two chapters, with the following objectives: to evaluate the process of evolution of physical-chemical properties, indicators of erosion control and stabilization, in soils undergoing a recovery process for two years; to evaluate fire behavior in natural fiber and synthetic erosion control blankets and the effect of long-term chemical retardants on fire behavior; determine the most efficient product for each type of material. In the first study, the results showed that, after two years, the application of the techniques adopted in the recovery of ravines and gullies present in Cambisol and Oxisol promoted an increase in SB, CEC, pH7 and combined SOM, with a reduction in Al³⁺ contents. However, significant changes in soil physical properties in ravines and gullies were not observed. In the second chapter, the results found showed that the blankets Sintemax and Fibrax 400BF with coconut fiber composition already present, by itself, fire retardant characteristics and that the blankets Macmat3 and Biotextil 400TF are not recommended in areas of high risk of fire. . Regarding the efficiency of the retardants, the Effective Efficiency Index (IEE) methodology indicated the use of Phos-Chek. The liquid Fertil Fire was more suitable for the blankets.

Keywords: Soil chemistry. Soil physics. Natural fibers. Synthetic fibers. Effective Efficiency Index.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	9
CAPÍTULO 1	12
USO DE TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA NA RECUPERAÇÃO DE RAVINAS E VOÇOROCAS: IMPACTO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E NA FERTILIDADE DO SOLO	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 Processo Metodológico	16
2.1.1 Coleta e análise físico-química do solo	16
2.1.2 Análise estatística	17
3 RESULTADOS	18
3.1 Análise estatística descritiva das propriedades físicas do solo	18
3.1.1 Análise estatística descritiva das propriedades químicas do solo	20
3.1.2 Análise de Cluster	20
4 DISCUSSÕES	21
5 CONCLUSÕES	25
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26
CAPÍTULO 2	30
COMPORTAMENTO DO FOGO E EFICIÊNCIA DE RETARDANTES EM MANTAS DE CONTROLE DE EROSÃO	30
1 INTRODUÇÃO	31
2 MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 Processo Metodológico	33
2.1.1 Análises dos dados	36
3 RESULTADOS	37
4 DISCUSSÕES	40
5 CONCLUSÕES	43
6 REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO GERAL

Globalmente, existem 17 processos de degradação da terra a serem estudados, mitigados e tratados, estando entre eles os processos erosivos e os incêndios florestais, atualmente considerados por muitos autores problemas ambientais críticos da humanidade (DE PEREIRA, 2022).

Processos erosivos têm sido agravados pelas atividades humanas, sobretudo em virtude da ocorrência de incêndios florestais, que afetam milhares de hectares a cada ano (LAL, 2019). Em florestas, a erodibilidade é aumentada em áreas queimadas, uma vez que os solos ficam diretamente expostos à ação da água, podendo, assim, ser rapidamente danificados e gerar perdas tanto de camadas como de matéria orgânica e nutrientes (PASTOR et al., 2019).

Diversas técnicas para recuperação de áreas degradadas por erosão vêm sendo utilizadas: desde as mecânicas convencionais da engenharia civil, como enrocamento de rocha, terraplenagem e estruturas de alvenaria, até o uso da bioengenharia, que é um método mais antigo e tradicional, mas que recentemente recuperou interesse e popularidade, combinando vegetação viva com ou sem componentes inertes, como rochas, madeira, metal e produtos laminados de controle de erosão (COELHO et al., 2021).

Ainda de acordo com os autores, *Rolled Erosion Control Products*, conhecidos na literatura internacional como RECPs, são materiais poliméricos, fabricados com fibras sintéticas, naturais ou mistas, com design, forma, tamanho, composições e nomes diferentes, de acordo com as necessidades funcionais.

Com os avanços dos métodos da bioengenharia nos últimos 20 anos, houve um crescimento notável da presença de RECPs no mercado. Estes materiais geralmente se enquadram em duas categorias (COELHO et al., 2021).

- Manta de controle de erosão: Produto laminado, degradável e temporário, composto de fibras naturais ou sintéticas, processadas mecanicamente, estruturalmente ou quimicamente unidos para formar uma matriz contínua, para fornecer controle de erosão e facilitar o estabelecimento da vegetação.
- Tapete de reforço de vegetação: Um produto de controle de erosão laminado, composto por fibras sintéticas não degradáveis, filamentos, redes, telas de arame e/ou outros elementos, transformados em uma matriz tridimensional permanente. São projetados para fornecer proteção contra erosão imediata,

melhorar o estabelecimento da vegetação e fornecer funcionalidade a longo prazo, reforçando permanentemente a vegetação durante e após a maturação.

Contudo, apesar da evolução constante de suas características básicas, como resistência mecânica e elasticidade, o comportamento dessas estruturas, quando submetidas ao fogo e aos meios de protegê-las de incêndios florestais, é desconhecido na literatura.

Por sua vez, das técnicas preventivas e de combate a incêndios florestais conhecidas, o uso de retardantes químicos de longo prazo pode ser o mais adequado a esses materiais. Os retardantes são constituídos por produtos químicos inibidores de chama que, aplicados sozinhos ou misturados com água, atrasam ou interrompem o processo de combustão (GAO; SCHWILK, 2022).

Os retardantes são um grupo diversificado de substâncias químicas, podendo ser de curto prazo, usados em uma ampla gama de aplicações, que atuam simplesmente pela intensificação da capacidade de extinção da água, através da maior retenção da água pelo combustível ou pelo retardamento da evaporação, ou ambos; E, neste estudo avaliados, retardantes químicos florestais ou de longa duração, que deixam resíduos de agentes inibidores da combustão sobre o material combustível depois de toda água ter sido evaporada (RIBEIRO et al., 2006; PAGE et al., 2023).

Nesta perspectiva, este estudo foi composto por dois capítulos, cujos objetivos foram, respectivamente:

1 - Avaliar o processo de evolução das propriedades físico-químicas indicadoras de controle e estabilização da erosão em áreas em recuperação por dois anos.

2 - Avaliar o comportamento do fogo em mantas de controle de erosão; avaliar o efeito de retardantes químicos de longo prazo sobre o comportamento do fogo; e determinar o produto de maior eficiência para cada tipo de material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COELHO, A.T.; MENEZES, G.B.; BRITO, T.C.; COELHO, J.F. Performance of Rolled Erosion Control Products (RECPs) as Bioswale Revetments. **Sustainability**, v.13, n.14, e7731, 2021. DOI:[https:// doi.org/10.3390/su13147731](https://doi.org/10.3390/su13147731)
- GAO, X.; SCHWILK, D.W. Burn hot or tolerate trees: Flammability decreases with shade tolerance in grasses. **Oikos**, n.4, e080930, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/oik.08930>
- LAL, R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO2. **Soil and Tillage Research**, v.188, p.27-34, 2019. DOI: [https:// 10.1016/j.still.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.001)
- MAJEED, M.T.; TAUQIR, A. Effects of urbanization, industrialization, economic growth, energy consumption, financial development on carbon emissions: an extended STIRPAT model for heterogeneous income groups. **Pakistan Journal of Commerce and Social Sciences (PJCSS)**, v.14, n.3, p.652-681, 2020. DOI: <http://hdl.handle.net/10419/224955>
- PAGE, J.; WHALEY, P.; BELLINGHAM, M.; BIRNBAUM, L.S.; CAVOSKI, A.; DILKE, D.F.; WOOLLEY, T. A new consensus on reconciling fire safety with environmental & health impacts of chemical flame retardants. **Environment international**, v.173, e107782, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107782>
- PASTOR, A.V.; NUNES, J.P.; CIAMPALINI, R.; KOOPMANS, M.; BAARTMAN, J.; HUARD, F.; RACLOT, D. Projecting future impacts of global change including fires on soil erosion to anticipate better land management in the forests of NW Portugal. **Water**, v.11, n.12, e2617, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11122617>
- PRĂVĂLIE, R. Major perturbations in the Earth's forest ecosystems. Possible implications for global warming. **Earth-Science Reviews**, v.185, p.544-571, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.06.010>
- RIBEIRO, G.A.; LIMA, G.S.; OLIVEIRA, A.L.S.D.; CAMARGOS, V.L.D., MAGALHÃES, M. U. Eficiência de um retardante de longa duração na redução da propagação do fogo. **Revista Árvore**, v.30, p.1025-1031. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000600018>

CAPÍTULO 1

USO DE TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA NA RECUPERAÇÃO DE RAVINAS E VOÇOROCAS: IMPACTO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E NA FERTILIDADE DO SOLO

RESUMO: A erosão afeta diretamente as funções do solo, sendo um problema ambiental crítico que a humanidade tem enfrentado nas últimas décadas. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da utilização de técnicas de bioengenharia nas propriedades físico-químicas e na fertilidade do solo durante a recuperação de ravinas e voçorocas. Foram selecionadas áreas com presença de ravinas (no Latossolo) e voçorocas (no Cambissolo), submetidas e não submetidas a técnicas de bioengenharia para recuperação. Após 2 anos de tratamento, amostras de solo correspondentes foram coletadas para análise de suas propriedades físicas e químicas. Os atributos químicos da soma de base (SB) e potencial CTC (T) apresentaram aumentos significativos, enquanto o pH do solo e Al^{3+} diminuíram. No entanto, não foi possível observar diferenças nas propriedades físicas entre os locais sem e com a execução de técnicas de bioengenharia. A ausência de melhorias nas propriedades físicas dos solos das ravinas e voçorocas, indica que 2 anos de tratamento sejam insuficientes para o restabelecimento dos mesmos. Consequentemente, um monitoramento de longo prazo é sugerido para verificar a eficiência na estabilidade dos processos erosivos.

Palavras-chave: Erosão hídrica; física do solo; química do solo.

1 INTRODUÇÃO

A área correspondente a solos degradados no mundo já chega a 2 bilhões de hectares, nos quais os processos erosivos têm sido apontados como um dos maiores desafios para a saúde do solo e desenvolvimento sustentável (GUPTA, 2019). No Brasil, estimativas projetam perdas anuais de 822,7 milhões de toneladas de solo em áreas ocupadas por lavouras e pastagens (DE MIRANDA et al., 2015).

A erosão ocorre, sobretudo, pela interação de alguns fatores, como a erosividade causada pelas chuvas, a erodibilidade do solo, as características das encostas e a cobertura vegetal (SANTOS et al., 2017). No entanto, estes processos erosivos podem acelerar devido às ações antrópicas, por efeito da pressão demográfica ligada aos avanços tecnológicos, que permitem modificar cada vez mais o ambiente (OSMAN, 2014).

A erosão hídrica, tipo de erosão mais frequente no Brasil, tem efeitos devastadores quando comparada a outros processos de degradação do solo, pois as perdas são rápidas e não compensadas pelas taxas de formação do solo (TAVARES et al., 2019). O clima tropical e subtropical úmido, devido às características de distribuição e intensidade das chuvas, é suscetível à formação de inundações, independentemente do tipo de uso e manejo do solo (ARE et al., 2018).

Dentre os processos erosivos que ocorrem no solo, as voçorocas são os mais graves, pois envolvem mecanismos mais complexos, ligados a escoamentos superficiais e subterrâneos de água infiltrada no solo. Frequentemente apresentam um fluxo livre e contínuo de água em seu fundo, alimentado pelo "vazamento" do lençol freático, que, neste caso, foi interceptado pelo cisalhamento da terra, e que está escavado em suas encostas na forma de sobretensões ou através de tubulações naturais denominadas dutos ou tubulações (TAVARES et al., 2019). As ravinas, por outro lado, envolvem movimentos de massa, representados por pequenos deslizamentos de terra. O desenvolvimento lateral ocorre através do escoamento das águas pluviais em seu interior, causando erosão na base do talude e, conseqüentemente, deslizamentos (REY et al., 2019).

Esse tipo de degradação pode afetar diretamente as funções do solo, sendo um problema ambiental crítico que a humanidade tem enfrentado nas últimas décadas, com ameaças à produção agrícola e aos ecossistemas terrestres (ARE et

al., 2018). Assim, reparar ambientes degradados é ainda mais urgente, mas como atingir esses objetivos e otimizar as ações?

São inúmeras as medidas de prevenção e correção desenvolvidas e utilizadas na recuperação de processos erosivos. Com o avanço da informação, conhecimento e tecnologia, técnicas mais novas e inovadoras têm substituído ou modificado métodos convencionais para um melhor tratamento das erosões (ZHANG et al., 2022). A bioengenharia é uma dessas técnicas, embora antiga, recentemente recuperou o interesse e a popularidade para uso no controle da erosão (PAUL et al., 2022). Combina vegetação viva com ou sem componentes inertes (por exemplo, rochas, madeira, metal, mantas, etc.) podendo simultaneamente proteger de forma eficiente encostas e estabilizar processos erosivos (COELHO et al., 2021).

Em um contexto de crescente necessidade de atender a sustentabilidade em projetos de engenharia, tais técnicas apresentam algumas vantagens, pois além de serem financeiramente viáveis, apresentam menor perturbação ambiental em comparação aos métodos convencionais de estabilização que contam com estruturas rígidas, como muros de contenção, por exemplo (GARRETA, 2021). Por conta disso, em diversos países da Europa e América do Norte, a bioengenharia de solos tem sido amplamente utilizada (PAUL et al., 2022).

Essa tecnologia verde também atraiu a comunidade científica, com um aumento significativo nos últimos 20 anos, levando a grandes avanços de acordo com Rey et al. (2019), com estudos de caso de sucesso em transportes, ambientes urbanos ou restauração de margens de rios (PITON et al., 2020).

Nesse contexto, embora o Brasil possua clima e condições edáficas favoráveis ao crescimento vegetal que favoreçam o uso de técnicas de bioengenharia, poucos estudos investigaram essa tecnologia em ambientes brasileiros (HOLANDA et al., 2021), principalmente em experimentos de campo, como o apresentado neste artigo.

Diante disto, este estudo teve como objetivos avaliar o processo de evolução das propriedades físico-químicas apenas como indicadores de controle e estabilização da erosão, em recuperação por 2 anos, a partir de um conjunto de técnicas de bioengenharia e procedimentos de recuperação de áreas degradadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Duas voçorocas e duas ravinas tratadas com técnicas de bioengenharia e duas áreas controle com o mesmo tipo de erosão, mas sem tratamento, foram analisadas neste estudo. As duas voçorocas em tratamento, denominadas V1 e V2, bem como as respectivas áreas controle, CV1 e CV2, estão localizadas na mesorregião Noroeste de Minas Gerais, município de São Gonçalo do Abaeté, a 390 km da capital Belo Horizonte. O clima é do tipo Aw, as temperaturas variam anualmente entre 19 e 28°C, uma precipitação média anual de 1.449 mm (CLIMATE DATA, 2021). O solo é classificado como Cambissolo Háplico Distrófico (EMBRAPA SOLOS, 2013). A região possui um variado e elevado aporte sedimentar, com altitude mínima de 555 m e altitude máxima de 1.029 m (REZENDE et al., 2018). A vegetação das áreas é uma transição entre Cerrado típico e Mata Seca (IEF, 2014).

Localizados na Mesorregião Oeste do Estado, as duas ravinas em tratamento, R1 e R2, e os respectivos controles, CR1 e CR2, pertencem ao município de Córrego Danta, com classificação climática também do tipo Aw, quente de inverno seco e verão chuvoso, temperaturas médias entre 19 e 27 °C, precipitação média anual de 1.309 mm (CLIMATE DATA, 2021). O solo predominante é o Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA SOLOS, 2013). A vegetação varia entre Campo Cerrado e Mata de Galeria (IEF, 2014).

O tratamento para estabilização e controle da erosão dos locais estudados teve início em janeiro de 2019, com o desenvolvimento de técnicas tradicionais de RAD (Recuperação de Áreas Degradadas) aliadas à bioengenharia de solos (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição da sequência das Técnicas utilizadas e materiais e métodos utilizados em cada uma das áreas em tratamento.

Técnicas Implementadas	Fase	Atividades e Material Usados
Isolamento dos locais degradados	1	Instalação de cercas de arame farpado em todo o perímetro das áreas
Implementação de um sistema de drenagem	2	Construção dos drenos principais, realizados de jusante para a montante, fazendo interligações laterais. A ligação entre as linhas foi feita cruzando caixas a cada 100 m. A manta, sobrepõe as suas abas pelo menos 20 cm;
Preparação do local para a instalação do mantas	3	Re-slope: Redução da inclinação das encostas.
		Correções: Eliminação de sulcos erosivos e preenchimento de vazios.
		Regularização dos sites para adesão plena das geomantas: Escarificação das encostas: furos no sentido horizontal.
Preparo do solo para revegetação	4	5x5cm, equidistantes horizontalmente 12cm . NPK 06:30:06 (40g/m ²); NPK 20:05:20 (20g/m ² , 30 dias após o plantio); Calcário dolomítico PRNT 100%, 30g/m ² ; Sementeira: <i>Braquiária humidicola</i> (Rendle) Schweick, 5g/m ² ; <i>Urochloa decumbens</i> (Stapf) R. 5g/m ² ; <i>Hyparrhenia rufa</i> (Nees) 4g/m ² ; <i>Crotalaria juncea</i> L. 4g/m ² ; <i>Melinis minutiflora</i> e <i>Pal de Beauv</i> 2g/m ² ; <i>Avena strigosa</i> Schreb 6g/m ² ;
		Estendendo o produto de montante a jusante, próximo à superfície do talude.
Instalação de mantas	5	A fixação da manta foi realizada com grampos metálicos "U" invertidos, confeccionados a partir da dobragem de barra de aço car50 .
Construção de paliçadas	6	Postes de eucalipto tratado;
		Mudas de espécies arbóreas nativas da região; Fardos de material vegetativo enraizável;
Manutenção das obras	7	Manutenção periódica dos canais;
		Controle de pragas quando necessário ; Irrigação e pulverização no local sob condições severas de seca

2.1 Processo Metodológico

2.1.1 Coleta e análise físico-química do solo

Devido à heterogeneidade *in situ*, foi necessário subdividir V1 em ambientes homogêneos, considerando: (i) cor do solo, (ii) profundidade, (iii) presença ou ausência de vegetação, (iv) textura do solo, (v) posicionamento dentro da voçoroca (terço superior, médio ou inferior). Ambientes de mesma classe de erosão, adjacentes aos locais estudados, sem nenhum tratamento, foram adotados como testemunhas. As amostras foram coletadas ao acaso, formadas por seis amostras simples deformadas na camada de 0 a 20 cm, com cerca de 500 cm³ de solo e uma amostra indeformada em cada ambiente, resultando em 12 amostras, representativas dos estratos definidos. As análises químicas e físicas das amostras foram realizadas de acordo com o protocolo da Embrapa (1997) no Laboratório de Análises do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Foram obtidas as proporções de areia, silte e argila, resistência à penetração, densidade de partículas (pelo método do balão volumétrico; Dp) e Densidade

aparente (Ds). Além disso, a Porosidade Total (PT), Micro (MiP) e Macroporosidade (MaP) foram determinadas nas amostras indeformadas de solo usando o método do anel volumétrico a partir da coleta de amostras de solo com estrutura indeformada com um anel de aço (Kopecky, volume de 50 cm³). Dentre as análises químicas, foram determinados os parâmetros de pH na água, teores de P, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ e Al³⁺, acidez potencial (H+Al), saturação por bases (V%), soma de bases (SB), CTC a pH 7 (T), CTC efetiva (t), saturação de alumínio (m%) e matéria orgânica do solo (MOS).

2.1.2 Análise estatística

A hipótese estatística foi avaliar se havia diferença entre os tratamentos aplicados nos sítios quando comparados com o grupo controle, utilizando os dados químicos e físicos do solo. Para isso, foi utilizada a análise de cluster com k-means (algoritmo de aprendizado de máquina). O objetivo desta análise é separar o banco de dados em “k” grupos (“clusters”), onde “k” representa o número de grupos. Assim, objetos dentro de um mesmo grupo (“cluster”) são os mais semelhantes possíveis. Para definir o número ótimo de clusters, o método “gap statistic” foi usado. Este método compara a variação total dentro do cluster (intracluster) para diferentes valores de “k” com seus valores esperados sob a distribuição de referência nula dos dados (KASSAMBARA, 2017). A análise K-means pode ser muito sensível em bancos de dados pequenos. Portanto, como análise complementar para localizar os subgrupos, construiu-se um dendrograma. O cálculo da distância entre os elementos para o dendrograma foi realizado usando a distância euclidiana (KASSAMBARA, 2017).

Em ambas as análises, os dados foram pré-processados escalonando os valores para que não houvesse pesos diferentes para as quantidades. As análises foram realizadas no R (R CORE TEAM, 2018) com os pacotes “factoextra” (KASSAMBARA, 2017) e “NbClust” (CHARRAD et al., 2014).

3 RESULTADOS

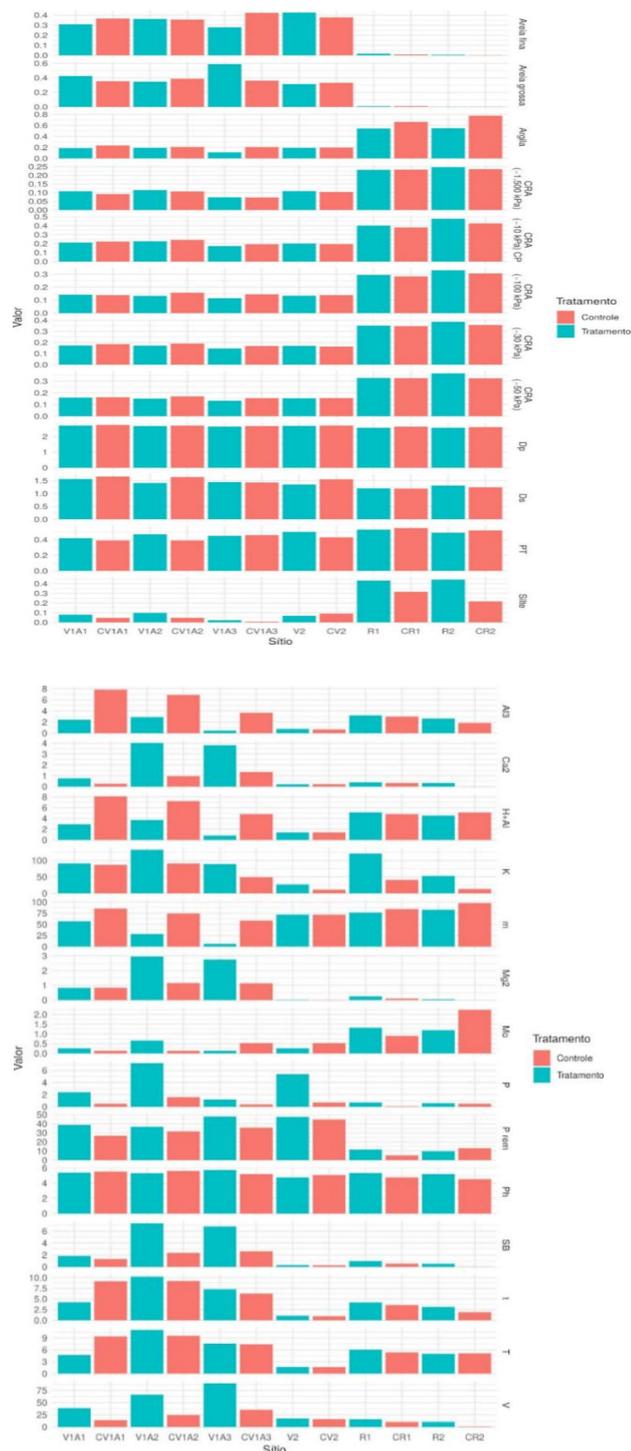
3.1 Análise estatística descritiva das propriedades físicas do solo

As erosões do tipo voçoroca em tratamento apresentaram valores altos para quantidade de areia (média de 0,453 para V1 e 0,314 para V2), com maior quantidade para areia fina (0,316 e 0,426) (Figura 1).

O teor de argila da camada superficial foi reduzido no solo das áreas em tratamento, R1 e R2 e V1 (Figura 1); Essa redução levou a uma mudança na classificação textural para V1 em relação ao CV1, de Franco-Argila-Arenosa para Franco-Arenosa; Ravinas sem tratamento CR1 e CR2, classificadas como Muito Argilosas, para Silteargilosas em ravinas em restauração, R1 e R2 (EMBRAPA SOLOS, 2013). Porém, para composição granulométrica, em todos os sítios tratados houve aumento significativo no teor de Silte. Apenas V2 não apresentou o mesmo comportamento, manteve sua classificação textural.

Houve uma sutil redução na densidade do solo dos dois primeiros ambientes de V1, passando de 1,66 e 1,64 para 1,56 e 1,41, enquanto para o terceiro estrato, pouco aumento, de 1,43 para 1,44 g/cm³. Em V2 reduziu de 1,55 para 1,35 g/c A V1 foi a única área erodida que apresentou heterogeneidade *in situ*, sendo estratificada em diferentes ambientes (V1A1, V1A2 e V1A3), considerando a presença ou ausência de cobertura vegetal, cor do solo e textura aparente do solo.

Figura 1. Caracterização física e química do solo das voçorocas e ravinas estudadas.



Em que CRA = Curva de Retenção de Água; Pd = Densidade da partícula; Sd = Densidade do solo; TP = Porosidade Total. SB = Soma das Bases Trocáveis; t = Capacidade efetiva de troca catiônica; V = Índice de Saturação de Base; T = Capacidade de troca catiônica em pH 7,0; P-rem = Fósforo Restante; m = Índice de Saturação de Alumínio; MO = Mat. orgânico; V = Voçoroca; A = Ambiente; R = Ravina; e C = Controle.

Para as diferentes tensões na curva de retenção de água a que as amostras foram submetidas, foram encontradas diferenças significativas entre os solos das ravinas e voçorocas; Não houve diferenças significativas entre os locais tratados e

os locais usados como controle, mas com uma ligeira superioridade nos valores para os locais sem nenhum tratamento.

3.1.1 Análise estatística descritiva das propriedades químicas do solo

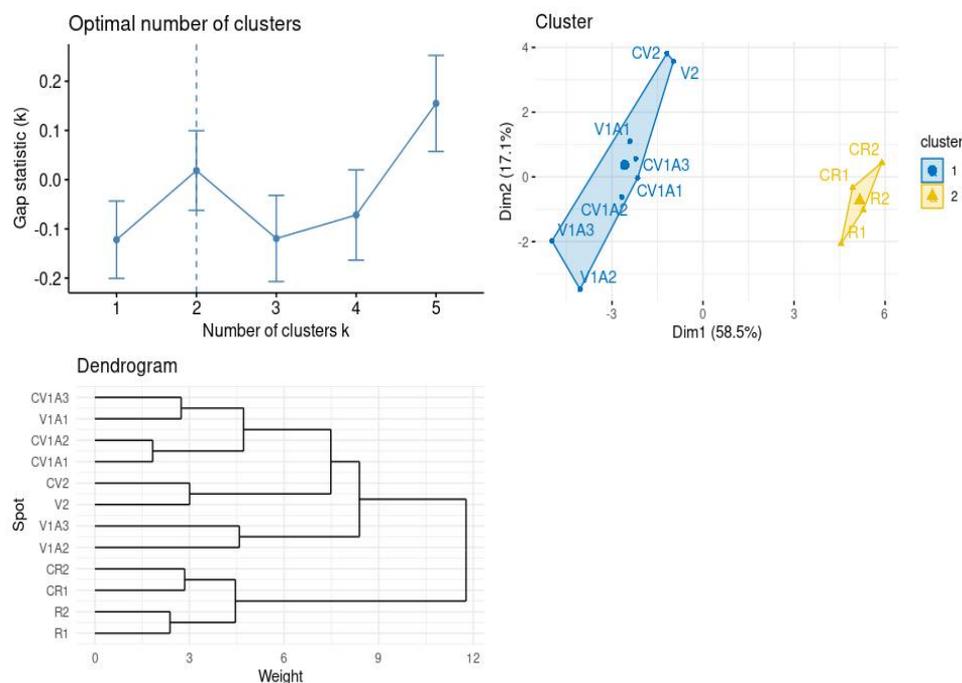
Os teores de MOS foram maiores para os sítios de erosão do tipo Ravinas. Para os sítios em recuperação, apenas os dois primeiros ambientes de voçoroca 1 (V1A1 e V1A2) e ravina 1 apresentaram aumento nos níveis de MOS. Os dados de pH obtidos mostraram uma redução nos valores para as voçorocas em recuperação em relação às voçorocas sem tratamento, enquanto para as ravinas observou-se uma tendência inversa, com aumento dos valores de pH para R1 e R2 em tratamento (4,75 para 5,33; 4,52 a 5,17) (Figura1) .

Quanto ao aumento das bases trocáveis (Ca, P, Mg^{2+} , SB e V), os três ambientes V1 produziram diferentes respostas aos tratamentos. Embora tenha sido observado um aumento nos valores desses parâmetros para todos os locais tratados, os ambientes V1A2 e V1A3 apresentaram melhores resultados. A saturação de Al (m; %) reduziu em todos os locais de recuperação, sendo mais pronunciada em V1, com reduções de 58,5 para 6,6 e 74,5 para 28,4. Da mesma forma, também foram observadas reduções na acidez potencial ($H+Al$) e alumínio trocável (Al^{3+}).

3.1.2 Análise de Cluster

O número ideal de clusters usando estatística, foi dois, com tamanhos 8 e 4. As áreas V2, CV2, V1A1, CV1A1, V1A2, CV1A2, V1A3 e CV1A3 foram distribuídas no cluster 1, enquanto as áreas R2, CR2, R1 e CR1 estavam em cluster 2. Ou seja, houve apenas separação das ravinas das voçorocas, sem discriminar os tratamentos. Em relação ao dendrograma com os 12 sítios, os sítios CV1A2 e CV1A1 foram os mais semelhantes, seguidos dos sítios R1 e R2, e dos sítios CR2 e CR1 (Figura 2).

Figura 2. Resultado da análise de cluster e dendrograma, onde: V = Voçoroca; A = Meio Ambiente; R = Ravina; C = Controle.



4 DISCUSSÕES

A pedologia, por meio de procedimentos de caracterização, identificação, classificação e mapeamento de solos, auxilia no planejamento de atividades de recuperação a serem implementadas no local (XIE et al., 2020), devendo, portanto, ser analisada no planejamento de projetos de recuperação de áreas erodidas. Foram encontradas distintas classificações texturais, sendo esta uma das principais propriedades a influenciar a erodibilidade de um solo e por esta razão, a eficácia dos resultados das técnicas de recuperação utilizadas em cada local será fortemente influenciada (SANTOS et al., 2017).

A fração de areia fina nos locais de recuperação, ainda está presente em quantidades superiores à areia grossa nas voçorocas. Este fato os torna mais susceptíveis à erosão, devido à sua baixa capacidade de agregação. A areia grossa é mais resistente a processos erosivos, por sua maior dificuldade de remoção devido a sua massa, além de alterar a coesão das partículas e o ângulo de atrito interno (SANTOS et al., 2017).

A seletividade do arrasto do material caracteriza o processo de erosão hídrica que transporta principalmente as partículas mais finas, as frações mais reativas do

solo e, conseqüentemente, com maior capacidade de carrear nutrientes e carbono orgânico (PINHEIRO et al., 2010). Aliado a isso, as alterações na estrutura do solo, geradas pelo preparo, principalmente mecânicos, como enxada e maquinários, utilizados para re-inclinação e ajustes durante a instalação das mantas, provavelmente promoveram a quebra dos agregados e a dispersão das partículas de solo aumentando o grau de dispersão de argila (NIAZ et al., 2022). Comportamento semelhante em relação à textura foi observado por Wen et al. (2021) ao estudar a restauração de barrancos de diferentes tipos de vegetação, em que não encontraram mudanças significativas nas propriedades físicas do solo, no período de 2 anos.

O leve aumento da Porosidade Total e redução da Densidade de Partículas obtidos são resultados importantes para a recuperação, pois se a rede porosa do solo estiver comprometida, favorece a ocorrência de erosão laminar, bem como erosão linear (fluxo concentrado) (TURINI et al., 2022). Uma série de estudos demonstram a redução da densidade do solo com a restauração da vegetação, promovendo o aumento da condutividade hidráulica do solo e permitindo a infiltração de água no subsolo (HAO et al., 2020). No presente estudo, a revegetação apresentou resultados ainda incipientes para benefícios nas propriedades físicas do solo, o que pode ser explicado pelo curto tempo de recuperação (2 anos) e pelo baixo grau de desenvolvimento da estrutura natural do solo (WEN et al., 2021).

Assim, embora os sítios de referência (CR1, CR2) também estejam degradados pela erosão, eles apresentaram maiores valores de Porosidade Total e menores valores de Densidade do Solo, o que possivelmente se deve ao maior teor de argila e silte (DE ARAÚJO FILHO et al., 2017). A retenção de água no solo depende da distribuição dos poros, que é influenciada por outros fatores como estrutura, distribuição granulométrica, matéria orgânica, mineralogia da argila, além da atividade biológica (AL MAJOU et al., 2022). Na literatura, vários estudos indicam uma forte influência da fração argila na retenção de água em Latossolos (CARDUCCI et al., 2011) e afirmam que Latossolos argilosos favorecem um maior teor de água e uma diminuição mais gradual do teor de água no solo com o aumento do potencial da matriz (em valor absoluto).

A influência da mineralogia na retenção de água no solo é explicada pela presença de carga elétrica nos minerais argilosos. Fontes et al. (2001) demonstraram que quanto maior a área superficial específica e maior a carga

elétrica, maior quantidade de água pode ser retida em argilominerais por forças eletrostáticas. Este fato explica os maiores valores de retenção de água para todas as tensões e maior retenção, um pouco maior para locais não tratados.

Os três diferentes ambientes encontrados em V1 podem ser explicados pela diversidade de textura, profundidade, permeabilidade, entre outras características dos Cambissolos, onde são muito comuns voçorocas e ravinas, com erodibilidade altamente variável (CUNHA et al., 2010). Outra explicação seria a variação na composição das partículas do solo na direção do fluxo, indicando diferentes estágios de desenvolvimento dentro de uma mesma voçoroca, causando variações espaciais nas propriedades físicas do solo. Conforme encontrado no estudo de Huang et al. (2021), que avaliou a evolução da fertilidade em solos erodidos durante a recuperação dessas áreas.

Os processos do tipo voçoroca caracterizam-se pela seletividade do arrasto de material no processo de erosão hídrica, incluindo matéria orgânica. Major (2023) aponta que os teores de matéria orgânica influenciam no processo hidroerosivo, pois possuem a capacidade de agregar o solo, tornando-o resistente à ação das chuvas, além de estar relacionado com a ciclagem de nutrientes, o que auxilia na boa qualidade do solo para sua recuperação.

O aumento do teor de matéria orgânica do solo nos dois primeiros ambientes do Voçoroca 1 é justificado por sua localização na bacia erosiva superior, com os menores teores observados no canal erosivo e nas paredes colapsadas. Huang et al. (2021), demonstraram que grande quantidade de areia se acumula no canal de erosão durante o processo erosivo, dificultando a sobrevivência da vegetação, associada ao colapso das paredes afetando a sobrevivência e culminando em baixo teor de Matéria Orgânica.

Neste estudo, não foram observadas alterações no teor de Matéria Orgânica após dois anos de recuperação da vegetação com as técnicas de bioengenharia utilizadas. No entanto, para o efetivo sequestro líquido de C no solo, o fator tempo é decisivo, conforme observado em estudos de mudança de uso da terra de culturas agrícolas para florestas (SHI et al., 2013).

Desta forma, o tempo desde o início da revegetação é um fator chave para aumentar os níveis de Matéria Orgânica nos ecossistemas terrestres, havendo o mesmo, uma dinâmica de acúmulo de matéria orgânica complexa durante a restauração da vegetação (MIU et al., 2022). Assim, a remoção da cobertura

superficial do solo nos locais recuperados provavelmente promoveu a perda da MOS, conforme observado em outros estudos envolvendo a recuperação de áreas degradadas (HAO et al., 2020).

A principal justificativa para a elevação do Ph nas ravinas é a reação de troca entre H^+ e Al^{3+} , principais cátions ácidos do solo, por Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ adicionados via adubação e que provavelmente após serem absorvidos pelas plantas retornaram ao solo via ciclagem biogeoquímica, fato corroborado pelo aumento da Saturação de Bases (COULIBALY et al., 2020). Os valores de pH 6 do solo foram considerados valores ótimos para os parâmetros de tamanho de partícula do solo e limites de Atterberg que incluem Liquid Soil Limit e Plastic Index para solos de clima tropical ao fazer modelos de erosão hídrica. Com isso, o aumento geral dos valores de pH do solo nos locais de recuperação, indicam uma eficácia na melhoria das propriedades químicas para o desenvolvimento das plantas pelas técnicas de recuperação aplicadas (MATSUMOTO et al., 2018).

A alta diferenciação espacial de nutrientes em ambientes de voçorocas se deve à lixiviação e escoamentos preferenciais de superfície causados por águas pluviais sob ação de erosão hidráulica e gravidade onde os nutrientes do solo não se acumulam (HUANG et al., 2021). Esse escoamento prejudica o processo de recuperação, com a maior parte desses nutrientes sendo perdida em poucos meses por lixiviação (HATTORI et al., 2019). Por outro lado, em todos os locais submetidos às técnicas de recuperação, reboco, calagem e adubação promoveram aumentos na Soma de Bases (SB) e redução na saturação de Al (m%) após 2 anos de implantação. Segundo Da Silva et al. (2018), o aumento destes parâmetros junta-se a utilização de leguminosas, que são capazes de produzir elevadas quantidades de resíduos associados a maiores níveis de N, com consequentes efeitos no aumento de MOS, aumentando o CTC efetivo (t) e reduzindo a lixiviação de cátions em profundidade.

Neste estudo, foi possível observar que os níveis de erosão ainda estão em fase ativa. Porém, apesar das propriedades químicas permitirem o fornecimento de nutrientes para o desenvolvimento da vegetação, as melhorias nas propriedades físicas não foram significativas nesses 2 anos de recuperação. Da mesma forma, Huang et al. (2021), ao estudar três estágios de recuperação ecológica em uma voçoroca (estado ativo, semi-estável e já estabilizado) de recuperação, em que consideraram a estabilidade da cobertura vegetal na região subtropical da China,

observaram que nos estágios de recuperação estável o cascalho, a areia e a densidade do solo diminuíram, enquanto a porosidade do solo, o teor de MOS, a capacidade de troca catiônica e os nutrientes disponíveis no solo aumentaram.

O agrupamento dos dados gerados em dois Clusters justifica-se estatisticamente pelas diferentes características dos atributos químicos e físicos das duas classes de solos e, portanto, pelo diferente padrão de respostas de cada uma delas aos tratamentos aplicados. Estudos sobre a erodibilidade para esses dois solos, Cambissolo Háptico Típico (CXbd), onde estão localizadas as voçorocas, e Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf), as ravinas, identificaram perdas anuais de solo em erosões que chegaram a 205,65 para CXbd, enquanto apenas 14,90 Mg ha⁻¹ em LVdf (SILVA et al., 2009). Uma relação semelhante foi registrada na zona fisiográfica Campos das Vertentes (MG), por Santos et al. (2017), que estimou perdas de 151 Mg ha⁻¹ por ano no CXbd; e para LVdf na região de Dourados (MS), Hernani et al. (1999) encontraram 6,9 Mg ha⁻¹ por ano.

O LVdf possui uma mineralogia mais gibbsítica que, aliada aos maiores teores de óxidos de ferro e matéria orgânica, contribui para uma estrutura granular, maior floculação, maior porosidade total e maior permeabilidade, proporcionando menores valores de perdas de solo pelo escoamento superficial. Por sua vez, o CXbd, mais caulinitico, com baixos teores de óxidos de ferro, apresenta estrutura laminar e baixa permeabilidade, justificando um maior potencial erosivo (SILVA et al., 2009). Por se tratar de um solo raso, tais aspectos devem ser considerados nos projetos de uso e recuperação dessas áreas. As semelhanças observadas para os sítios de referência (CV1A2 e CV1A1) podem ser explicadas pelo fato de apresentarem o mesmo tipo de processos erosivos sob o mesmo tipo de solo. O mesmo acontece com os locais em tratamento, que foram submetidos à erosão e agora, aos mesmos tratamentos, em que a desagregação proporcionada pela preparação inicial do projeto de recuperação levou a alterações semelhantes nos parâmetros do solo.

5 CONCLUSÕES

Após 2 anos, a aplicação das técnicas adotadas na recuperação de ravinas e voçorocas presentes no Cambissolo e Latossolo, promoveu aumento de SB, CTC, pH7 e MOS combinado com diminuição dos teores de Al³⁺. No entanto, mudanças significativas nas propriedades físicas do solo em ravinas e voçorocas não foram

observadas. Assim, este estudo sinalizou a necessidade de monitoramento em prazo mais longo para que efeitos nas propriedades físicas possam ser observados ao longo do estabelecimento da vegetação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL MAJOU, H.; MULLER, F.; PENHOUD, P.; BRUAND, A. Prediction of water retention properties of Syrian clayey soils. **Arid Land Research and Management**, v.36, n.2, p.125-144, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15324982.2021.1965674>.

ARE, K.S.; OSHUNSANYA, S.O.; OLUWATOSIN, G.A. Changes in soil physical health indicators of an eroded land as influenced by integrated use of narrow grass strips and mulch. **Soil and Tillage Research**, v.184, p.269-280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.009>

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.D.; SEVERIANO, E.D.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.77-86, 2011. DOI: <https://doi.10.1590/S0100-06832011000100007>.

CHARRAD, M.; GHAZZALI, N.; BOITEAU, V.; NIKNAFS, A. NbClust: an R package for determining the relevant number of clusters in a data set. **Journal of Statistical Software**. V. 61, p.1-36, 2014. DOI: <https://doi.10.1590/S0100-06832011000100007>

CLIMATE DATA. 2021. **Dados climáticos para cidades mundiais**. Disponível em: <<http://climate-data.org/>>. Acesso em: 31 ago. 2022.

COELHO, A. T.; MENEZES, G. B.; DE BRITO, G. T. C.; COELHO, J. F. Performance of Rolled Erosion Control Products (RECPs) as Bioswale Revetments. **Sustainability**, v.13, n.14, e7731, 2021. DOI: <https://doi.10.3390/su13147731>

COULIBALY, S.S.; TOURÉ, M.; KOUAMÉ, A.E.; KAMBOU, I.C.; SORO, S.Y.; YÉO, KI.; KONÉ, S. Incorporation of Crop Residues into Soil: A Practice to Improve Soil Chemical Properties. **Agricultural Sciences**, v.1, n.12, p.1186-1198, 2020. DOI: <https://doi.10.4236/as.2020.1112078>

CUNHA, T.J.F.P.V.G.; SILVA, D.J.; MENDES, A.M.S.; DE MELO, R. F.; DE OLIVEIRA NETO, M. B.; ALVAREZ, I. A. *In*: CUNHA, T.J.F.; PETRERE, G. V.; SILVA, J.D. **Principais solos do semiárido tropical brasileiro**: Caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. Cap.2, 2010. p.51-87. ISBN: 978-85-7405-012-6

DA SILVA, C.J.S.; DE SOUSA, S.A.; NIKKEL, M.; DEUSDARÁ, T.T.; MACHADO, Â. F.; DA SILVA, R.R. Supercalagem: alterações em atributos químicos de um Latossolo Vermelho amarelo. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.16, n.1, p.31-38, 2018. DOI: <https://10.5327/rcaa.v16i1.1522>

DE ARAÚJO FILHO, R.N.; HOLANDA, F.S.R.; PEDROTTI, A.; DE OLIVEIRA, S.T.; DA ROCHA, I.P. Influência dos atributos físicos-mecânicos do solo na estabilidade do talude do Baixo São Francisco. **Scientia Agraria**, v.18, n.4, p.107-113, 2017. Disponível em: <http://www.rdalyc.org/articulo.oa?id=9955498014de>, Acesso em: 02 jan. 2023.

DE MIRANDA, R.B.; SCARPINELLA, G.D.A.; DA SILVA, R.S.; MAUAD, F.F. Water erosion in Brazil and in the World: a brief review. **Modern Environ Science and Engineering**, v.1, n.1, p.17-26, 2015. DOI: [https://10.15341/mese\(2333-2581\)/01.01.2015/003](https://10.15341/mese(2333-2581)/01.01.2015/003)

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Vol. 3, 2013. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 13 nov. 2022.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.D.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v.58, p.627-646, 2001. DOI: <https://10.1590/S0103-90162001000300029>

GARRETA, E. Rethinking organoid technology through bioengineering. **Nature Materials**, v.20, n.2, p.145-155, 2021. DOI: <https://10.1038/s41563-020-00804-4>

GUPTA, G.S. Land degradation and challenges of food security. **Review of European Studies**, v.11, e63, 2019. Doi: [10.5539/res.v11n1p63](https://doi.org/10.5539/res.v11n1p63)

HAO, H.X.; WEI, Y.J.; CAO, D.N.; GUO, Z.L.; SHI, Z.H. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils. **Soil and Tillage Research**, v.198, e104542, 2020. DOI: [10.1590/S0103-90162001000300029](https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029)

HATTORI, D.; KENZO, T.; SHIRAHAMA, T.; HARADA, Y.; KENDAWANG, J.J.; NINOMIYA, I.; SAKURAI, K. Degradation of soil nutrients and slow recovery of biomass following shifting cultivation in the heath forests of Sarawak, Malaysia. **Forest Ecology and Management**, v.432, p.467-477, 2019. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2018.09.051>

HERNANI, L.C.; KURIHARA, C.H.; SILVA, W.D. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.145-154, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000100018>

HOLANDA, F.S.R.; DE ARAÚJO, R.N.; WILCOX, B.P.; MARINO, R.H.; SANTOS, L. D.V. Um panorama da Bioengenharia de solos no nordeste do Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v.16, n.4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2650>

HUANG, J.; JIANG, D.; DENG, Y.; DING, S.; CAI, C.; HUANG, Z. Soil physicochemical properties and fertility evolution of permanent gully during ecological restoration in granite hilly region of south China. **Forests**, v.12, n.4, e510, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12040510>

KASSAMBARA, A. **Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning** (Multivariate Analysis Book 1. (English Edition). Sthda, 2017. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Practical-Guide-Cluster-Analysis-Unsupervised-ebook/dp/B077KQBXTN>>. Acesso em: 25 out. 2022.

MAJOR, J.J. Subaerial volcanoclastic deposits – Influences of initiation mechanisms and transport behavior on characteristics and distributions. **Geological Society London, Special Publications**, v.520, n.1, p.29-100, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP520-2021-142>

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF. Biota, Belo Horizonte, v.7, n.1, 2014 21<<http://www.ief.mg.gov.br/areasprotegidas/205?task=view>> Acesso em: 28 dez. 2012.

MATSUMOTO, S.; OGATA, S.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T.; HAMANAKA, A.; KUSUMA, G.J. Effects of pH-induced changes in soil physical characteristics on the development of soil water erosion. **Geosciences**, v.8, n.4, e134, 2018. DOI: <https://10.3390/geosciences8040134>

MIU, B.A.; POP, C.E.; CRACIUN, N. Bringing life back into former mining sites: A mini-review on soil remediation using organic amendments. **Sustainability**, v.14, n.19, e12469, 2022. Doi: <https://doi.org/10.3390/su141912469>

NAIAZ, S.; WEHR, J. B.; DALAL, R. C.; KOPITKE, P. M.; MENZIES, N. W. Organic amendments and gypsum reduce dispersion and increase aggregation of two sodic Vertisols. **Geoderma**, v.425, e116047, November 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116047>

OSMAN, K. T. **Soil degradation, conservation and remediation**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. DOI 10.1007/978-94-007-7590-9

PAUL, B.; PURKAYASTHA, K.D.; BHATTACHARYA, S.; GOGOI, N. Eco-bioengineering tools in ecohydrological assessment of eutrophic water bodies. **Ecotoxicology**, n.314, p.581-601, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-021-02509-z>

PINHEIRO, D.T.C.; DA COSTA, C.C.; MOTTA, L.L.; GODINHO, F.C.; DA SILVA, J.V. Monitoramento da fertilidade do solo submetido à erosão hídrica em área cultivada com Eucalyptus sp. em São João Evangelista, MG. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 1, p.57-65, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18406/2316-1817v2n12010252>

PITON, G.; LOUCOUGARAY, G.; DAUMERGUE, N.; BRETON, V.; EVETTE A. The beaver's menu: species and spatial selection of a European beaver population and implications for riverbank bioengineering. **Wetlands Ecology and Management**, n.28, v.6, p.901-908, 2020. DOI: <https://10.1007/s11273-020-09754-9>

R CORE TEAM. R: A **Language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 08 nov. 2022.

REY, F.; BIFULCO, C.; BISCHETTI, G.B.; BOURRIER, F.; DE CESARE, G.; FLORINETH, F.; STOKES, A. Soil and water bioengineering: Practice and research

needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. **Science of The Total Environment**, n.648, p.1210-1218, January 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>

REZENDE, E. A.; SALGADO, A.A.R.; CASTRO, P. de T.A. Evolução da rede de drenagem e evidências de antigas conexões entre as bacias dos rios grande e São Francisco no sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, p. 483-501, 2018. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1304/386386392>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

SANTOS, R.C.; DOS SANTOS, P.L.; GUERRA, A.J.T. Análise da erodibilidade de um Cambissolo por meio de um transecto em encosta íngreme da bacia hidrográfica do rio Pequeno, Paraty-RJ. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v.1, p.4426-4437, 2017. DOI: <https://10.20396/sbgfa.v1i2017.1931>

SHI, S.; ZHANG, W.; ZHANG, P.; YU, Y.; DING, F. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. **Forest Ecology and Management**, v. 296, p.53-63, 2013. DOI: <https://10.1016/j.foreco.2013.01.026>

SILVA, A. M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.A.J.C.; FERREIRA, M.M. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.6, p.1811-1820, 2009. DOI: <https://10.1590/S0100-06832009000600029>

TAVARES, A.S.; SPALEVIC, V.; AVANZI, J.C.; ALVES, D. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin in southern Minas Gerais. **Semina: Ciências Agrárias**, n.40, v.2, p.555-572, 2019. DOI: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/41132>

TURINI, L.R.; CÂNDIDO, E.; DE ABREU, V.H.S.; MARTINS, B.S. Determinação dos parâmetros fisiográficos da microbacia do Córrego Buritizinho–Mato Grosso-Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.15, n.2, p.767-782, 2022. Doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p767-782>

WEN, H.; NI, S.; WANG, J.; CAI, C. Changes of soil quality induced by different vegetation restoration in the collapsing gully erosion areas of southern China. **International Soil and Water Conservation Research**, n.9, v.2, p.195-206, 2021. DOI: <http10.1016/j.iswcr.2020.09.006>

XIE, H.; ZHAN, Y; WU, Z.; LV, T.A bibliometric analysis on land degradation: Current status, development, and future directions. **Land**, n.9, v.1, e28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9010028>

ZHANG, Y.; LUO, P.; ZHAO, S.; KANG, S.; WANG, P.; ZHOU, M.; LYU, J. Control and remediation methods for eutrophic lakes in the past 30 years. **Water Science and Technology**, n.81, v.6, p.1099-1113, 2022. DOI: [10.2166/wst.2020.218](https://doi.org/10.2166/wst.2020.218)

CAPÍTULO 2

COMPORTAMENTO DO FOGO E EFICIÊNCIA DE RETARDANTES EM MANTAS DE CONTROLE DE EROSIÃO

RESUMO: Dentre as perturbações mais frequentes em áreas florestais, destacam-se os incêndios e a erosão do solo. Diversas técnicas de controle de processos erosivos têm sido implantadas em todo o mundo, sendo uma delas o uso de mantas de controle de erosão. No entanto, os incêndios podem interferir na recuperação das áreas tratadas com esse material. Este estudo teve como objetivos: avaliar o comportamento do fogo em mantas sintéticas e de fibras naturais; avaliar o efeito de retardantes químicos de longo prazo sobre o comportamento do fogo; e determinar o produto de maior eficiência para cada tipo de material. Constatou-se que as mantas Sintemax e Fibrax 400BF com composição de fibra de coco já apresentam, por si só, características retardantes de fogo, portanto são indicadas para áreas em situação de risco de incêndio. As mantas Macmat3 e Biotextil 400TF, por outro lado, não são recomendadas em áreas de alto risco de incêndio. Na avaliação dos retardantes pela metodologia IEE, o Phos-chek apresentou maior índice de eficiência. Entretanto, os três retardantes testados demonstraram alta eficiência em mantas, sendo o Fertil Fire Líquido o mais indicado para elas.

Palavras-chave: Incêndios florestais; erosões; fibras naturais; fibras sintéticas.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as perturbações mais frequentes, destacam-se os incêndios florestais e a erosão do solo. O risco de incêndios aumenta consideravelmente nas áreas próximas às atividades antrópicas (MOCELLIN et al., 2020). Os incêndios florestais podem expor o solo à ação de agentes erosivos como o vento e a chuva, até que a vegetação se recupere. A estrutura do solo também pode ser alterada devido à destruição da matéria orgânica, o que favorece o escoamento e o desprendimento de partículas, aumentando, assim, as perdas de sedimentos (LOPES et al., 2021).

Diversas técnicas de controle de processos erosivos têm sido implantadas em todo o mundo, dentre elas a utilização de mantas de controle de erosão. Essas mantas são usadas em técnicas de bioengenharia e em projetos civis, e têm por objetivo melhorar o desempenho estrutural do solo (REY et al., 2019). Elas são fabricadas a partir de fibras sintéticas, naturais ou mistas, com design, forma, tamanho e composições diferentes, de acordo com as necessidades funcionais. Suas principais funções são: separação de agregados, reforço do solo, filtragem, drenagem e barreiras de líquidos (COELHO et al., 2021).

Diante deste contexto, as mantas de controle de erosão surgem como alternativas para os processos de recuperação dos solos, culminando com o desenvolvimento constante de estudos de suas características básicas, como resistência à corrosão, durabilidade, flexibilidade, facilidade de armazenamento e instalação, além do fato de serem favoráveis à degradação biológica e química (MITTAL, 2018).

Embora as mantas se sobressaiam quanto à resistência e durabilidade em campo, o comportamento dessas estruturas, quando submetidas a altas temperaturas ainda é desconhecido. Estes materiais podem ser afetados por incêndios florestais, o que pode comprometer a recuperação de áreas em tratamento com técnicas de bioengenharia, conseqüentemente é necessário realizar estudos para avaliar seus possíveis impactos.

Das muitas técnicas preventivas de incêndios florestais, os retardantes químicos de longo prazo podem ser eficazes na prevenção da queima desses materiais. Eles são constituídos por produtos químicos inibidores de chama que, aplicados sozinhos ou misturados com água, atrasam ou interrompem a reação de combustão de um determinado material combustível florestal. Essas substâncias são

geralmente compostas de sais fertilizantes, com um espessante ou uma mistura de tensoativos, umectantes e solventes (GAO; SCHWILK, 2022).

Não há na literatura estudos relacionados ao comportamento do fogo nesses materiais, bem como também não se tem conhecimento sobre a eficiência de retardantes químicos de longo prazo como alternativa de proteção dessas estruturas.

Desta forma, os objetivos deste estudo foram avaliar o comportamento do fogo em mantas utilizadas em controle de erosão; avaliar o efeito de retardantes químicos de longo prazo sobre o comportamento do fogo; e determinar o retardante de maior eficiência para cada tipo de manta.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido nas dependências do Laboratório de Incêndios Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

Para a realização do experimento, foram utilizados os três produtos retardantes de chamas de mais fácil acesso no mercado brasileiro, que conforme as informações dos fabricantes possuem propriedades anticomburentes e anticombustíveis, com capacidade de uso na prevenção e no combate de incêndios florestais, chamados de retardantes de longo prazo. Foram eles: Phos-chek G-75 (Perimeter Solutions), Fertil Fire granulado e Fertil fire líquido (ambos da Ecoplus Company). Todos os três produtos apresentam princípio ativo nitrogenado.

As quatro mantas avaliadas são variedades empregadas em projetos de engenharia (VIANNA et al., 2020), sendo elas: Biotextil 400TF - fibras desidratadas dilaceradas (palha), entrelaçadas por meio de uma costura longitudinal, com fios resistentes degradáveis de polipropileno, unidimensional e peso de 400 g/m²; Fibrax 400BF – composta de 100% de fibras de coco, entrelaçadas e incorporadas em redes de polipropileno nos dois lados, por meio de costura longitudinal, por processo industrial, com fios resistentes degradáveis de polipropileno; Sintemax - fibras mistas, palha e fibra de coco, entrelaçadas por meio de uma costura industrial longitudinal, com redes resistentes de polipropileno, podendo ser unidimensional (U) ou bidimensional, e incorporando ainda uma terceira malha, dando a condição tridimensional; e Macmat3 - associação entre manta de alta flexibilidade,

tridimensional, com mais de 90% de vazios de filamentos de polietileno e fundidos nos pontos de contato, acoplada a uma tela de poliéster e peso de 500 g/m².

2.1 Processo Metodológico

O estudo foi dividido em três fases.

Fase 1 - Comportamento do fogo em mantas de controle de erosão, em condições de laboratório

Amostras de 1,0 x 2,0m para cada tipo de manta foram padronizadas e colocadas sobre uma plataforma experimental de combustão, inclinada a 60°, com o intuito de reproduzir a declividade de taludes, onde esses produtos são empregados em campo.

A queima foi iniciada com o auxílio de um pinga-fogo diretamente sobre a manta, em condições controladas de laboratório (sem influência do vento). Foram mensurados: (a) o tempo gasto para queima do material combustível, até sua queima total ou a extinção do fogo (uso de cronômetro); (b) a porcentagem de área queimada, por meio de uma inspeção visual da área queimada, mensurada com uma régua; e (c) com o auxílio de um termohigrômetro, foram mensuradas a temperatura do ar e a umidade relativa do ar no laboratório. Foram realizadas seis repetições para cada tipo de manta, totalizando 24 repetições.

Fase 2 – Determinação do Índice de Eficiência Efetiva (IEE) para três retardantes químicos de longo prazo em laboratório

A partir desta fase, procedeu-se à execução da metodologia Índice de Eficiência Efetiva (IEE), desenvolvida por Beutling (2018). A metodologia IEE, baseada nos estudos de Ribeiro et al. (2006), utiliza uma relação da velocidade do fogo e altura de chama para avaliar a eficiência de um retardante de fogo, segundo o *Global Efficiency index* (Ie).

O IEE apresenta um processo de análise que possibilita avaliar o retardante em diferentes condições de formulação e concentração, pois utiliza também a variável efeito martelo (EfM), que avalia a capacidade do retardante suprimir o fogo

(BEUTLING, 2018). O IEE considera diferentes pesos para a capacidade retardante e a capacidade supressora.

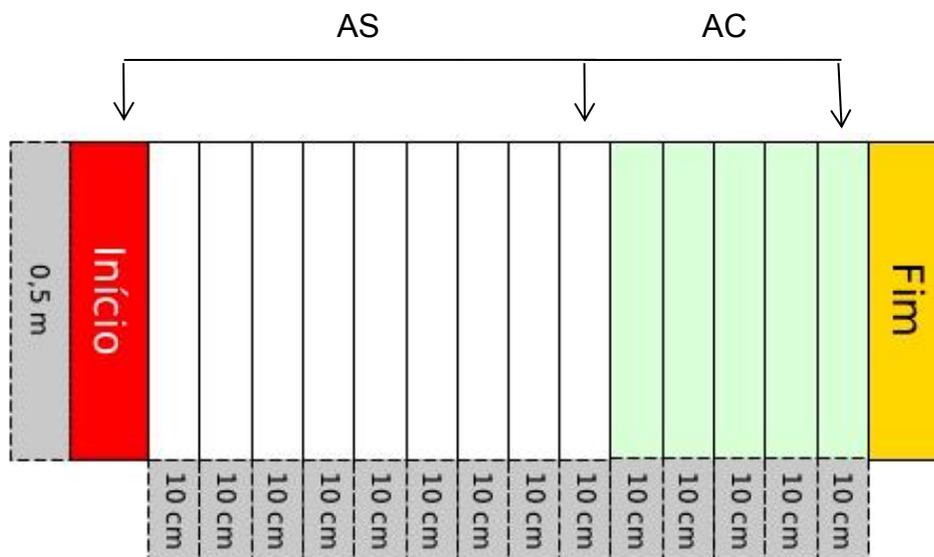
Para determinar a eficiência efetiva dos produtos retardantes, foram conduzidas dez queimas, denominadas de “queimas padrão” pela metodologia IEE, que consiste na realização de queimas sem aplicação de qualquer produto retardante, com a finalidade de gerar o IEE para a testemunha e de treinar o operador (preparo das amostras, aplicação padronizada da solução, leitura de chamas, cronometragem do tempo de queima e confecção da ficha de queima com dados coletados), de forma a padronizar condicionantes relacionadas às queimas, definidas pelo Protocolo, que é dependente de boas práticas laboratoriais.

O material combustível padronizado pela metodologia IEE é o feno de Tifton, seco em estufa por 12 horas, a 80 °C, e distribuído homoganeamente em plataforma experimental com carga de 1,0 kg/m², espessura de manta de 9 cm e inclinação de 60°.

Os retardantes foram aplicados com aparelho pulverizador de compressão prévia 1,25 L, modelo PCP-1P, marca Guarany, em três amostras sequencialmente para cada tipo de produto, de acordo com a capacidade da plataforma. O volume aplicado foi 125 mL em 0,25 m², seguindo as diluições indicadas pelos fabricantes (10% para todos), reproduzindo em cada amostra o esquema de aplicação padronizado (Figura 1).

As dimensões das parcelas foram 1,5 m de comprimento e 0,5 m de largura, subdivididas em intervalos de 10 cm. Os 10 cm iniciais foram reservados para o início do fogo (*start*), e os 10 cm finais, para o seu fim (*end*); 90 cm foram considerados como área de livre propagação (AS – área sem produto) e 40 cm foram reservados à aplicação do retardante em teste, sendo denominada de área de aplicação (AC) (Figura 1)

Figura 1 – Croqui de preparo das amostras em laboratório, com esquema direcional de aplicação dos retardantes nas amostras e dimensões da área com aplicação de produto (AC) e sem aplicação (AS).



Fonte: Beutling (2018).

As amostras foram preparadas e deixadas para secagem do produto aplicado por 24 horas. Uma amostra de feno foi pesada no dia da queima, seca em estufa e pesada novamente para aferição da umidade adquirida. Para realização da queima, a ignição da linha de fogo foi realizada com o auxílio de álcool, em laboratório fechado, com oscilação mínima de umidade e temperatura, sem qualquer influência do vento. Para melhor padronização, as queimas iniciavam a partir das 10 horas e finalizavam, no máximo, às 16 horas. Foram seis repetições para três tipos de retardantes, totalizando 18 amostras nesta etapa.

Fase 3 - Índice de Eficiência Efetiva de retardantes químicos de longo prazo aplicados sobre as mantas

Para obter o Índice de Eficiência Efetiva (IEE) dos retardantes em mantas, a metodologia IEE foi adaptada, utilizando estes produtos como material combustível na área com aplicação do produto retardante (AC).

As mantas foram preparadas em amostras de 0,25 m², colocadas sobre uma superfície de papelão, e, então, foi realizada a aplicação dos retardantes. Elas foram reservadas por dez dias, ficando expostas no laboratório para secagem. Esse tempo está dentro do intervalo médio estipulado de 10 a 20 dias de duração da proteção

em campo, indicado pelos respectivos fabricantes. Após esse período, sequencialmente, três amostras foram preparadas na plataforma de queima, e, posteriormente queimadas. Foram realizadas seis repetições de cada um dos três retardantes químicos, nos quatro tipos de mantas, totalizando 72 amostras.

2.1.1 Análises dos dados

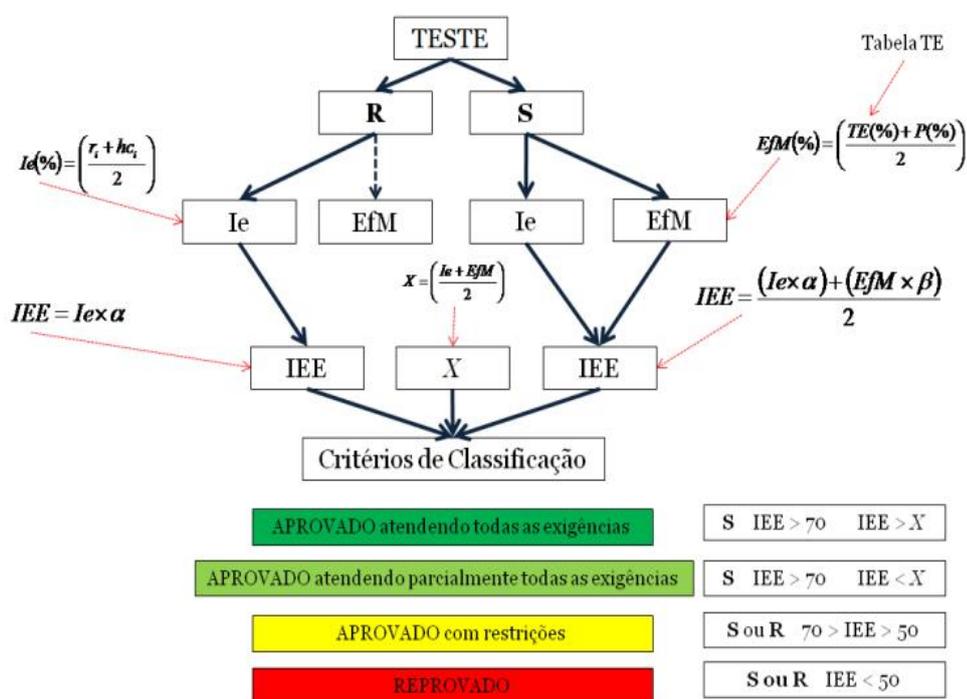
A análise dos dados para a primeira fase foi processada no software R, utilizando Modelos Lineares Generalizados (CRAWLEY, 2007). As variáveis respostas foram (a) a velocidade e (b) a porcentagem de queima entre as mantas, com os tipos de mantas como variável explicativa. As variáveis umidade relativa do ar e temperatura do ar no momento da queima foram colocadas como covariáveis no modelo estatístico. Depois de construídos, os modelos passaram por uma análise de resíduos, para ajustes da distribuição de erros, quando necessário, como sugerido por Crawley (2007).

A partir da segunda fase do experimento, os resultados foram avaliados segundo o Índice de Eficiência Efetiva (IEE), que utiliza uma adaptação do Índice de Eficiência Global (Ie) proposto por Ribeiro et al. (2006). Esse índice proporciona uma avaliação do efeito “retardante”, que expressa a interferência de uma solução retardante sobre as variáveis do comportamento do fogo, em que se verifica a redução da altura das chamas e da velocidade do fogo, sem, no entanto, levar a frente de fogo à extinção.

Também utiliza uma variável denominada Efeito Martelo (EfM), que avalia a eficiência do retardante em extinguir a frente de fogo assim que ela entra na área de aplicação do retardante (BEUTLING, 2018). Essa variável leva dois fatores em consideração: tempo de extinção (TE) e distância média de penetração (P) da frente de fogo na área de aplicação do retardante, ambos em porcentagem. Esses dois fatores são calculados tendo por base o tempo cronometrado e as dimensões físicas da área de aplicação. Para o cálculo do Índice de Eficiência Efetiva (IEE), que estabelece uma relação entre Ie e EfM, existe ainda a multiplicação por um “fator de valorização de resultado” e “ajuste de escala”, de modo que os resultados “retardantes” nunca superem os 70% na escala IEE e os resultados “extintores do fogo” possam utilizar toda a amplitude da escala (de 0 a 100).

Para filtrar os resultados e estabelecer o nível de aprovação, a metodologia IEE estabelece “critérios de classificação”, que balizam a interpretação e possibilitam a comparação de diferentes retardantes e concentrações em laboratório, independentemente de seus efeitos “retardante” ou “supressante” (ou seja, um retardante que forneça em laboratório apenas resultado “retardante” não significa necessariamente que será inferior a um retardante que forneça resultado “supressante”) (Figura 2).

Figura 2. Organograma com sequência para determinação do Índice de Eficiência Efetiva,



Fonte: Beutling (2018)

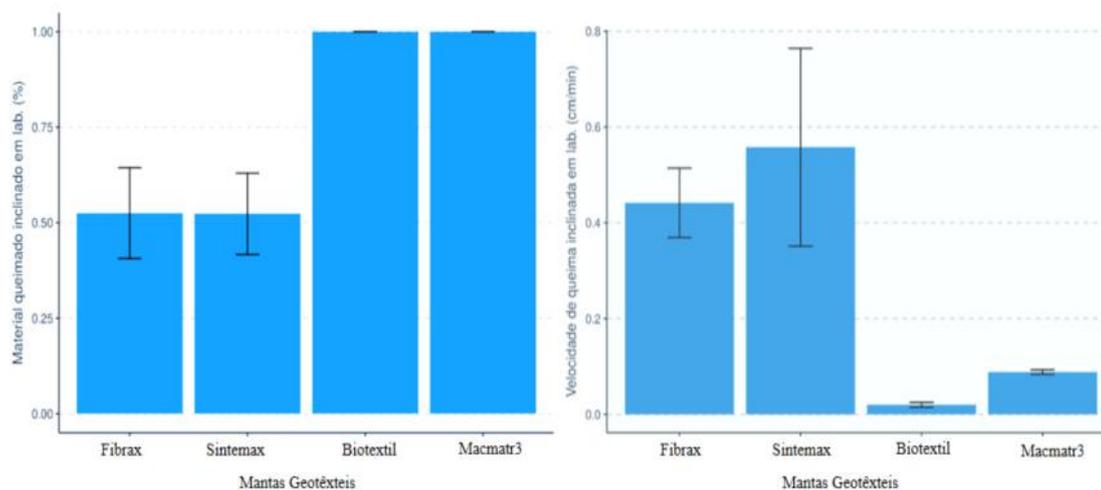
Em que $ri = \frac{(r.A.C)}{(r.A.S)} \times 100(\%)$; $hc = \frac{hc.A.S}{hc.A.C} \%$; $TE = n[n_i; n_i + 3] = 1,0s$; $x = \frac{distx100}{200}$; e $P(\%) = 100 - x$.

3 RESULTADOS

Os dados que descrevem o padrão de queima dividiram as mantas em dois grupos, tendo Fibrax 400BF e Sintemax ficado em um mesmo grupo, enquanto a tela Biotextil 400TF e a Macmat3, em outro. A tela Biotextil 400TF e a MacMat3 obtiveram maiores valores para porcentual de material consumido pelo fogo, uma vez que suas amostras foram quase totalmente consumidas pelo fogo. As análises mostraram maior velocidade de queima nas mantas Fibrax 400BF e Sintemax

(Figura 3). Não foi constatada influência da temperatura ($p = 0.51$) ou da umidade ($p = 0.18$)

Figura 3 - Gráficos de porcentagem de material queimado (%) e velocidade de queima (cm/min) das mantas, em condições de laboratório.



Na fase 2, a metodologia IEE classificou os três produtos comerciais como “aprovado com restrições” para potencial efeito retardante (R) e supressante (S), sendo Phos-Chek o retardante de IEE mais alto, 59,946 e maior redução na altura das chamas, enquanto Fertil Fire Líquido e Fertil Fire granulado apresentaram 55,762 e 51,075, respectivamente (Tabela 1).

Fertil Fire Líquido e Fertil Fire Granulado, apresentaram valores menores para altura das chamas.

Tabela 1 - Tabela com resultados de variáveis de comportamento do fogo da segunda fase do experimento.

Retardante	Redução da Altura das Chamas (%)	Redução da Velocidade de Propagação (%)	Desvio Padrão	IEE
Phos-Chek	93,51	89,73	4,48	59,94
Fertil Fire liq.	75,53	88,60	6,22	55,76
Fertil Fire gran.	87,13	93,28	4,08	51,07

Na terceira fase, a metodologia IEE adaptada às mantas como material combustível classificou os três produtos retardantes como “aprovado e atendendo parcialmente a todas as exigências”, em todas as mantas. Foram obtidos valores de IEE acima de 70%, valores esses superiores aos obtidos para feno do protocolo. (Tabela 2)

Para as quatro variedades de manta, o Fertil Fire líquido apresentou maior média de valores de IEE (85,7) e maiores médias para redução da velocidade de propagação das chamas (92,37%), tendo sido um pouco inferior (91,43%) apenas em relação ao Fertil Fire granulado (95,54%) para a variável redução da altura de chamas.

A geotextil Sintemax, mesmo na terceira fase do ensaio, ou seja, para as três variedades de retardantes, manteve-se demonstrando os melhores resultados para IEE e para redução da altura das chamas e da velocidade de propagação das chamas (Tabela 2).

No ensaio testado com a manta Sintemax e o retardante Fertil Fire líquido, os valores foram próximos a 100% para as duas variáveis dos comportamento do fogo estudadas. Já Biotextil 400TF combinado com Pos-Check, resultaram nos menores valores para redução da altura das chamas (55%).

Tabela 2 - Tabela com resultados de variáveis de comportamento do fogo da terceira fase do experimento.

Mantas	Retardante	Redução da Altura das Chamas (%)	Redução da Velocidade de Propagação (%)	Desvio Padrão	IEE
Fibrax 400BF	Phos-Chek	97,66	89,57	10,60	80,40
	Fertil Fire liq.	86,66	90,81	7,75	71,43
	Fertil Fire gran.	98,04	82,97	6,87	69,03
Sintemax	Phos-Chek	98,33	92,06	2,88	96,41
	Fertil Fire liq.	100	97,19	1,10	96,15
	Fertil Fire gran.	99,83	96,21	0,83	97,57
Biotextil 400TF	Phos-Chek	55,00	91,55	2,20	83,29
	Fertil Fire liq.	66,67	91,92	6,66	81,09
	Fertil Fire gran.	88,00	93,55	8,77	83,33
MacMat3	Phos-Chek	93,73	92,48	5,80	68,72
	Fertil Fire liq.	96,20	89,55	2,3	91,41
	Fertil Fire gran.	96,29	88,65	9,24	83,57

4 DISCUSSÕES

O comportamento do fogo em mantas comerciais, especificamente, é desconhecido. No estudo de retardantes químicos, há a necessidade de entender como o material se comporta a altas temperaturas, uma vez que a termoresistência do material combustível pode afetar ou beneficiar, por efeito sinérgico, a eficácia dos retardantes de chamas (HONG et al., 2023).

Para quantificar a eficiência de retardantes químicos de chamas nesses produtos, inicialmente foram avaliadas as propriedades térmicas em quatro variedades de mantas comerciais, que foram selecionadas na tentativa de abranger tipos de mantas compostas por fibras naturais, sintéticas e mistas.

Desta forma, as mantas Fibrax 400BF e Sintemax apresentarem os valores mais altos para velocidade de queima (cm/s), o que na prática significa menor tempo de residência do fogo na amostra do material combustível, que resulta em menor área em cm² da amostra consumida pelo fogo (KRIX et al., 2022). Esse comportamento se justifica pela composição semelhante, sendo ambas basicamente constituídas por fibra de coco e polipropileno.

As fibras naturais têm despertado interesse em termos de aplicações industriais, por serem benígnas ambientalmente, podendo reduzir a carga sobre o ecossistema e construir um ciclo de vida mais sustentável a materiais. Além disso, elas já demonstraram ter alta resistência física, são leves, baratas e portam propriedades termo físicas importantes (JANG et al., 2019; KANDULA et al., 2022).

Em diversos estudos, utilizando metodologias variadas em trabalhos de engenharia de materiais, constatou-se que parâmetros significativos para avaliar a propagação e a intensidade do fogo, como condutividade térmica e liberação de calor total, reduziram com o aumento do teor de fibras naturais (MANFREDI et al., 2006; SUMMERSCALES et al., 2010; KANDULA et al., 2022). Assim, fibras naturais têm sido cada vez mais empregadas em indústrias aeroespacial, automobilística, naval e de construção, onde há normas exigentes a serem cumpridas, em termos de segurança contra incêndios (VERMA et al., 2019).

A rede dupla de polipropileno presente na Sintemax justifica os valores mais altos para velocidade de propagação, em relação à Fibrax 400BF. Na execução do experimento, foi observado que as chamas percolavam rapidamente pelas linhas de polipropileno, contudo a fibra de coco impedia que o fogo se propagasse pela matriz do material combustível e o consumisse totalmente.

O processo de combustão do polipropileno explica sua alta inflamabilidade. Os radicais livres gerados na pirólise desempenham papel fundamental na etapa de ignição, desencadeando reações de combustão altamente exotérmicas, cujo calor liberado dá início a um processo denominado retroalimentação térmica. Esse mecanismo sustenta os processos de pirólise e ignição, enquanto houver material combustível disponível que forneça condições de propagação, ou seja, material inflamável (GALLO, 1998).

Neste sentido, a tela Biotextil 400TF, composta basicamente de capim seco, e a MacMat3, estruturada por filamentos de polietilenos, não demonstraram a mesma termo resistência que as mantas do primeiro grupo, devido ao fato de ambas serem construídas de materiais com alta inflamabilidade, ou seja, com maior facilidade de ignição e consumo do combustível (VARNER, 2015).

Quanto à MacMat3, os polietilenos estão entre os materiais mais inflamáveis, devido ao seu alto calor de combustão, ao baixo índice de oxigênio limitado (LOI) e à alta liberação de calor, deixando pouco ou nenhum caractere residual (LUYT et al., 2019). Essa manta é ainda acoplada a uma tela de poliéster, que também é um material extremamente inflamável, devido à sua tendência muito limitada de carbonização (WANG et al., 2021). Ela também apresenta um problema de gotejamento pelo derretimento, quando inflamada, fato esse observado na execução deste experimento, o que muitas vezes pode levar a danos secundários e à propagação de chamas.

Na segunda fase do experimento, embora os resultados para o Índice de Eficiência Global (Ie) tenham se diferenciado, estando o Phos-Chek com maiores valores, os três obtiveram a mesma classificação dentro dos critérios da metodologia IEE. Logo, quanto à eficiência do efeito retardante de valores para altura de chama, velocidade de propagação e consumo de material combustível, os três demonstraram desempenho semelhantes.

O Phos-chek já demonstrou bons resultados em experimentos com herbáceas (RIBEIRO et al., 2006). Seu mecanismo de ação se resume a desviar o sentido da reação da combustão quando exposto ao fogo. Na presença do retardante, com a liberação dos gases inflamáveis, que contribuem para o pré-aquecimento no processo de combustão, o espalhamento do fogo não ocorre, devido ao produto retardante transformar o material em combustão diretamente para carvão, com liberação de água (MANZI-NSHUTI et al., 2009).

Os valores mais baixos para IEE, podem ser justificados pela carga do material combustível de 1Kg/m² e composição de campim-tifton, pertencente à classe I de materiais combustíveis (material com dimensões menores que 0,6 cm), considerada ideal no estudo de Ribeiro et al. (2006) para comprovar a eficiência de retardantes, uma vez que as condições eram propícias para gerar uma queima de alta intensidade.

Na terceira e última fase, o Fertil Fire Líquido em cooperação com Sintemax, resultaram em 100% de redução de altura das chamas e 97,19% para redução da velocidade de propagação. Reação semelhante, ocorreu com Fertil Fire Granulado com esta mesma manta, em que este, obteve maior IEE para retardante aplicado neste tipo de material combustível, 97,57. Assim, Fertil Fire Líquido e Granulado aplicados em Sintemax, demonstraram os melhores resultados para a prevenção de um processo de combustão.

Os retardantes Fertil Fire líquido e granulado, apenas pela presença de calor, instantaneamente resfriam o ambiente (solo, vegetação, atmosfera), não permitindo que elementos naturais ali presentes se precipitem na emissão de particulados, solventes, resinas, entre outros compostos alimentadores do fogo em campo. Os produtos criam um efeito tamponante refrigerante na presença de calor excessivo e quando há fogo propriamente dito. Os elementos minerais neles presentes agem como redutores, o que resulta em uma reação de competição entre o consumidor

(fogo) e o elemento de resistência (mineral), portanto a supressão se dá por meio de compostos nitrogenados, ureia e sulfato de amônio (ECOPLUS COMPANY, 2020).

A composição dos retardantes Fertil Fire líquido e granulado é muito parecida; o que os difere de fato é a maior quantidade de óleo vegetal no Fertil Fire granulado, para formação dos grânulos, e uma maior concentração de nitrogenados no Fertil Fire líquido, o que resulta em maior aderência e melhor diluição do produto (ECOPLUS COMPANY, 2020).

Quanto às fibras de coco, são constituídas por cerca de 46% de lignina, o que justifica sua resistência mecânica e a elevadas temperaturas (JANG et al., 2019). Reti et al. (2008) encontraram valores que comprovam que altas proporções de lignina agem como retardante de variáveis do comportamento do fogo. Isto ocorre devido à lignina influenciar a degradação da celulose, estimulando a desidratação e levando à formação de carvão (KANDULA et al., 2022).

Enquanto o Phos-Check, retardante de menor IEE para mantas de controle de erosão na terceira fase, para Macmat e Biotexteil 400TF, produtos que na fase 1 apresentaram menores termo resistência, quando sob ação do Phos check, refletiram no menor valor de IEE (68,72) e menor redução da altura da chama (55). Logo, não sugere-se esta combinação retardante-manta. Zhang et al. (2020) em seus estudos, demonstraram que a estimativa da intensidade de queima, pode ser feita através da correlação do comprimento ou altura das chamas, destacando a importância desta variável no comportamento do fogo.

A aplicabilidade também é outro fator importante a ser avaliado. Neste estudo, o Fertil Fire na forma de concentrado líquido proporcionou melhor aplicação e permitiu maior homogeneidade do produto nas amostras, refletida pelo erro padrão baixo entre as repetições e os valores altos de eficiência efetiva. A viscosidade do Phos-chek dificultou a aplicação por pulverizador. Fertil Fire em apresentação granulométrica gerou material residual no pulverizador, causando, assim, perda de produto, o que evidencia uma dissolução lenta e difícil dos grânulos em água.

5 CONCLUSÕES

As mantas Sintemax e Fibrax 400BF com composição de fibra de coco já apresentam, por si só, características retardantes de fogo, portanto são indicadas para áreas em situação de risco de incêndio.

As mantas Macmat3 e Biotextil 400TF não são recomendadas para uso em áreas de alto risco de incêndio.

Para retardante/supressante na prevenção e no combate de incêndios florestais, a metodologia IEE indica o Phos-chek como o melhor retardante.

A combinação retardante e manta mais eficiente de prevenção de incêndios florestais é Sintemax e Fertil fire Líquido ou Fertil Fire Granulado.

A combinação retardante e manta menos eficiente é Phos-chek e Biotextil 400TF.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, M.E.; CRUZ, M.G. Interdependencies between flame length and fireline intensity in predicting crown fire initiation and crown scorch height. **International journal of wildland fire**, v. 21, n. 2, p. 95-113, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/WF11001>

BEUTLING, A. **Nova Metodologia para Avaliação da eficiência de retardantes químicos para combate a incêndios florestais**. Relatório de Estágio (Pós Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Curitiba, 2018.

CRAWLEY, M.J. **The R Book**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2007.

DE SOUZA, F.M.; GUPTA, R.K. Nitrogen-based green flame retardants for biopolyurethanes. **Biopolymeric Nanomaterials**, p.469-497, 2021. DOI:10.1016/B978-0-12-824364-0.00020-4

ECOPLUS COMPANY. Fertil Fire: Registro junto a Biblioteca Nacional – **Manual de aplicação**. Número de publicação 208/2020. Patente de exclusividade junto ao INPI nº PI 1106423-4.

GALLO, J. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros**, v.8, p.23-38, 1998. DOI: <https://10.1590/S0104-14281998000100005>

GAO, X.; SCHWILK, D. W. Burn hot or tolerate trees: flammability decreases with shade tolerance in grasses. **Oikos**, n.4, e08930, 2022. DOI: <https://10.1111/oik.08930>

HONG, M.; CHEN, D.; ZHU, W.; LI, G.; ZHOU, X.; LI, W.; LIAO, Y. Synergistic effect of inorganic Mg (OH) 2 and organic triphenyl phosphate-based coating layers on flame-retardant separator for high-voltage Li|| LiNi0. 8Co0. 1Mn0. 1O2 cell. **Solid State Ionics**, v.393, e116184, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2023.116184>

JANG, J.Y.; JEONG, T.K.; OH, H.J.; YOUN, J.R.; SONG, Y.S. Thermal stability and flammability of coconut fiber reinforced poly (lactic acid) composites. **Composites**

Part B: Engineering, v.43, n.5, p.2434-2438. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.003>

KANDULA, R.; SANAKA, S.P.; REDDY, K.H. Thermo-physical and Fire Properties of Natural Fiber Composites for Energy Saving Applications. **Journal of Natural Fibers**, p.1-13. 2022. DOI: <https://10.1080/15440478.2022.2044964>

KRIX, D.W.; MURRAY M.L.; MURRAY, B.R. Increasing radiant heat flux affects leaf flammability patterns in plant species of eastern Australian fire-prone woodlands. **Plant Biology**, v.24, n.2, p.302-312, 2022. DOI: <https://10.1111/plb.13381>

LOPES, A.R.; GIRONA-GARCÍA, A.; CORTICEIRO, S.; MARTINS, R.; KEIZER, J. J.; VIEIRA, D.C.S. What is wrong with post-fire soil erosion modelling? A meta-analysis on current approaches, research gaps, and future directions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.46, n.1, p.205-219, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.5020>

LUYT, A. S.; MALIK, S. S.; GASMI, S. A.; PORFYRIS, A.; ANDRONOPOULOU, A.; KORRES, D.; VOUYIOUKA, S.; GROSSHAUSER, M.; PFAENDNER, R.; BRÜLL, R.; PAPASPYRIDES, C. Halogen-free flame-retardant compounds. Thermal decomposition and flammability behavior for alternative polyethylene grades. **Polymers**, v.11, n.9, e1479, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11091479>

MANFREDI, L. B.; RODRÍGUEZE, S.; WLADYKA-PRZYBYLAK, M.; VÁZQUEZ A. Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composites with natural fibres. **Polymer degradation and stability**, v.91, n.2, p.255-261, 2006. DOI: <https://10.1016/j.polymdegradstab.2005.05.003>

MITTAL, A. Geosynthetics: An overview. **IJSRSET**, v.4, n.4, p.231-238, 2018,

MOCELLIN, P.; TACCALITI, F.; MASCHIO, G.; LINGUA, E.; Interface Fires in Built-up Areas. a Real-case Study on the Risk Assessment of Fires Interacting with Urban Domains. **Chemical Engineering Transactions**, v.82, p.259-264, 2020. DOI: <https://10.3303/CET2082044>

PIERONI, M.C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. Retardantes de chama bromados: uma revisão. **Química Nova**, v.40, n.3, p.317-326, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160176>

REY, F.; BIFULCO, C.; BISCHETTI, G.B.; BOURRIER, F.; DE CESARE, G.; FLORINETH, F.; STOKES, A. Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. **Science of the total environment**, v.648, p.1210-1218, 2019. DOI: <https://10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>

RETI, C.; CASETTA, M.; DUQUESNE, S.; BOURBIGOT, S.; DELOBEL, R. Flammability properties of intumescent PLA including starch and lignin. **Polymers for Advanced Technologies**, v.19, n. 6, p.628-635, 2008. DOI: <https://10.1002/pat.1130>

RIBEIRO, G. A.; LIMA, G. S.; OLIVEIRA, A. L. S. D.; CAMARGOS, V. L. D.; MAGALHÃES, M. U. Eficiência de um retardante de longa duração na redução da

propagação do fogo. **Revista Árvore**, v.30, n.6, p.1025-1031, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000600018>

SUMMERSCALES, J.; DISSANAYAKE, N.; VIRK, A.; HALL, W.A review of bast fibers and their composites. Part 1 – fibers as reinforcements. *Composites Part A*, **Compósitos Parte A**, v.41, p.1329-35, 2010.

VARNER, J.M. The flammability of forest and woodland litter: a synthesis. **Current Forestry Reports**, v.1, n.2, p.91-99, 2015. DOI: <https://10.1007/s40725-015-0012-x>

VERMA, S. K.; GUPTA, A.; PATEL, V. K.; GANGIL, B.; RANIKOTI, L. The potential of natural fibers for automotive sector. **Automotive Tribology**, p.31-49, 2019. DOI:10.1007/978-981-15-0434-1_3

VIANNA, V.F.; FLEURY, M.P.; MENEZES, G.B.; COELHO, A.T.; BUENO, C.; LINS DA SILVA, J.; LUZ, M.P. Bioengineering techniques adopted for controlling riverbanks' superficial erosion of the simplicio hydroelectric power plant, Brazil. **Sustainability**, v.12, n.19, e7886, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12197886>

WANG, Q.Z.; LIU, C.; XU, Y.J.; LIU, Y.; ZHU, P.; WANG, Y.Z. Highly efficient flame retardation of polyester fabrics via novel DOPO-modified sol-gel coatings. **Polymer**, v.226, n.23, e123761, 2021. DOI:10.1016/j.polymer.2021.123761

YU, A.C.; REINHART, M.; HUNTER, R.; LU, K.; MAIKAWA, C. L.; RAJAKARUNA, N.; APPEL, E.A. Seasonal impact of phosphate-based fire retardants on soil chemistry following the prophylactic treatment of vegetation. **Environmental Science & Technology**, v.55, n.4, p.2316-2323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05472>

ZHANG, Z.; ZONG, R.; TAO, C.; REN, J.; LU, S. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. **Process Safety and Environmental Protection**, v.139, p.182-190, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.019>