

FABRICIO GOMES DE OLIVEIRA SEBOK

**SORÇÃO DO HERBICIDA INDAZIFLAM EM DIFERENTES MATERIAIS
ORGÂNICOS NO SOLO COMO ESTRATÉGIA QUE PERMITA A GERMINAÇÃO E
DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES FLORESTAIS**

Botucatu

2024

FABRICIO GOMES DE OLIVEIRA SEBOK

**SORÇÃO DO HERBICIDA INDAZIFLAM EM DIFERENTES MATERIAIS
ORGÂNICOS NO SOLO COMO ESTRATÉGIA QUE PERMITA A GERMINAÇÃO E
DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Proteção de Plantas).

Orientador: Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini

Coorientador: Dr. Ernst Michael Kilian

Botucatu

2024

S443s

Sebok, Fabricio Gomes de Oliveira

Sorção do herbicida indaziflam em diferentes materiais orgânicos no solo como estratégia que permita a germinação e desenvolvimento de sementes florestais / Fabricio Gomes de Oliveira Sebok. -- Botucatu, 2024

101 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Edivaldo Domingues Velini

Coorientador: Ernst Michael Kilian

1. Matocompetição. 2. Fitotoxicidade. 3. Carvão ativado. 4. Urochloa
decumbens. 5. Restauração florestal. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

Por meio deste trabalho, buscaram-se formas para viabilizar potenciais manejos da matocompetição, articulados à restauração florestal via semeadura, com o uso do herbicida residual e não seletivo indaziflam. De forma conceitual, o desenvolvimento de soluções para a mitigação dos efeitos fitotóxicos desse herbicida, em plantas de interesse para o restabelecimento de áreas naturais, poderá garantir a segurança e a eficiência nas operações de campo, pela redução de custos e aceleração da restauração de florestas naturais.

Potential impact of this research

Through this work, we sought ways to enable potential weed competition management, articulated with forest restoration via sowing, with the use of the residual and non-selective herbicide indaziflam. Conceptually, the development of solutions to mitigate the phytotoxic effects of this herbicide, in plants of interest for the reestablishment of natural areas, can ensure safety and efficiency in field operations, by reducing costs and accelerating the restoration of natural forests.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SORÇÃO DO HERBICIDA INDAZIFLAM EM DIFERENTES MATERIAIS ORGÂNICOS NO SOLO COMO ESTRATÉGIA QUE PERMITA A GERMINAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE SEMENTES FLORESTAIS

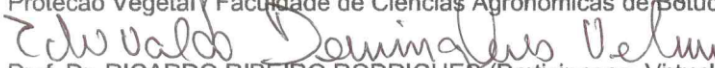
AUTOR: FABRICIO GOMES DE OLIVEIRA SEBOK

ORIENTADOR: EDIVALDO DOMINGUES VELINI

COORDENADOR: MICHAEL KILIAN

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Proteção de Plantas), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI (Participação Presencial)
Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

p/ 
Prof. Dr. RICARDO RIBEIRO RODRIGUES (Participação Virtual)
Ciências Biológicas / Universidade de São Paulo


Prof. Dr. CARLO ANTONIO CARBONARI (Participação Presencial)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Botucatu, 16 de fevereiro de 2024

*A todos que me apoiaram,
se dedicaram e suportaram esta jornada!*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meus avós (*in memoriam*) e pais pela educação. À minha esposa e filha, agradeço profundamente pelo companheirismo constante, paciência incansável e incentivo ao longo desta jornada.

Ao Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, sou imensamente grato pela orientação, troca de conhecimentos e oportunidades proporcionadas ao longo desses anos. Seu papel foi fundamental não apenas na pesquisa, mas também no meu amadurecimento profissional.

Ao meu Coorientador Dr. Ernst Michael Kilian, agradeço a confiança e o estímulo contínuo e contribuições essenciais ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Caio Antonio Carbonari, expresso meu reconhecimento pelo valioso suporte ao longo destes anos e por servir de inspiração para a busca constante por conhecimento.

À UNESP, à FCA, e aos professores do departamento de Proteção Vegetal, expresso meu agradecimento pelo compartilhamento do conhecimento durante as disciplinas cursadas.

Aos colaboradores do laboratório NUPAM, agradeço a parceria constante e apoio vital durante esses anos. Aos amigos do NUPAM, em especial Bruno Flaibam, Natalia Bevilaqua, Ivana Moisinho, Plínio Saulo Simões e Renato Costa, agradeço a fundamental colaboração e ensinamentos.

Ao Viveiro Bioflora por todo o conhecimento compartilhado sobre a restauração florestal e sementes fornecidas para os experimentos.

À Bayer – Environmental Science — atualmente Envu —, expresso minha gratidão pelo apoio contínuo, abertura e estímulo à ciência.

Ao time que tive a honra de liderar, Bárbara Demattê, Jéssica Faria, Natalia Bevilaqua, Nathalia Sigolo e Tercílio Roberto Laurindo, agradeço pela dedicação incansável e pela superação das etapas deste trabalho. Aos inúmeros amigos que contribuíram, emocional e intelectualmente, para a continuidade deste esforço, especialmente à Gisele Silveira, meus sinceros agradecimentos.

A todos que, de alguma maneira, fizeram parte deste momento, meu sincero reconhecimento.

RESUMO

O indaziflam é um herbicida pré-emergente com amplo espectro de ação e persistência devido às suas características físico-químicas e meia-vida de 150 dias. Entretanto, a capacidade sorativa pode reduzir sua disponibilidade e eficácia, e, assim, promover seletividade por posicionamento. Nessa perspectiva, investigaram-se diversos materiais potencialmente sorventes do herbicida em solução. Além disso, construiu-se a curva dose-resposta para a sorção em carvão ativado, e analisaram-se diferentes marcas comerciais além de seus efeitos biológicos para a proteção contra a fitotoxicidade em bioindicadores. Realizou-se, nesse sentido, um experimento com 10 diferentes materiais puros ou em mistura com solo, no qual o carvão ativado apresentou maior capacidade de retenção do ingrediente ativo. Neste estudo utilizou-se bomba de vácuo para a extração da solução do solo após 24 horas de descanso em seringas, e, posteriormente, analisados por cromatografia. Conduziu-se outro experimento com a mesma metodologia para a criação de curva dose-resposta do carvão ativado, em relação à retenção do herbicida, considerando-se as doses de 0; 0,15625; 0,3125; 0,625; 1,25; 2,5; 5 e 10% da massa de carvão ativado pela massa de solo seco superficial, em que a dose de 0,3125% foi suficiente para a redução da quantidade disponível do ingrediente ativo na solução. Para a investigação de possíveis diferenças entre marcas comerciais de carvão, realizou-se outro experimento, seguindo a mesma metodologia, com as doses de 0,15 e 0,5% m/m. Após essas etapas, definido o carvão ativado e as marcas com maior potencial de sorção do indaziflam, sucederam-se outros 4 experimentos com bioindicadores, em casa-de-vegetação. Em dois destes, com delineamento experimental totalmente casualizado, com 5 repetições e em três solos diferentes, com o bioindicador *Urochloa decumbens*. Em cada tratamento, semearam-se 25 sementes misturadas à camada superficial do solo, com ou sem mistura de carvão ativado na dose de 0,6% m/m, juntamente à aplicação proporcional à área dos vasos de 75 g de indaziflam por hectare sobre a superfície do solo. Aos 60 dias após a aplicação, observaram-se, a partir do acúmulo de biomassa seca das partes aéreas, raízes e total. Definiu-se que, nas condições estudadas, quando houve a presença do carvão ativado em mistura no solo superficial, ocorreu também a proteção da germinação da gramínea nos três solos estudados, enquanto sua ausência resultou, por sua vez, em redução ou ausência de biomassa. Por fim, conduziram-se outros dois experimentos, seguindo a

mesma metodologia, com duas espécies de adubação verde e sete florestais nativas da Mata Atlântica, com avaliações da contagem de plântulas germinadas e estabelecidas, aos 47 DAA. Considerando os resultados obtidos, é possível concluir que o uso do carvão ativado é eficaz para a germinação, emergência e desenvolvimento inicial de todas as espécies estudadas, oferecendo proteção contra os efeitos herbicidas do indaziflam. Considerando a capacidade pré-emergente desse herbicida, este estudo sugere a possibilidade de soluções sustentáveis em escala real contra a matocompetição e o estabelecimento eficiente da restauração florestal ou de outros ecossistemas.

Palavras-chave: matocompetição; fitotoxicidade; carvão ativado; *Urochloa decumbens*; restauração florestal.

ABSTRACT

Indaziflam is a pre-emergent herbicide with a broad spectrum of action and persistence due to its physicochemical characteristics and half-life of 150 days. However, sorptive capacity can reduce its availability and efficacy, promoting selectivity. From this perspective, several potential sorbent materials of the herbicide in solution were investigated, in addition to constructing the dose-response curve for sorption on activated carbon, studying different commercial brands in addition to their biological effects on protection against phytotoxicity in bioindicators. To this end, an experiment was carried out with 10 different potential sorbent materials pure or in mixture with soil, which defined activated carbon as the one with the highest sorption capacity among the materials studied, for the study a vacuum pump was used to extract the solution from the soil after 24 hours of rest in syringes and analyzed by chromatography. Another experiment was conducted with the same methodology for the creation of a dose-response curve of charcoal, in relation to herbicide sorption, considering the doses of 0, 0.15625, 0.3125, 0.625, 1.25, 2.5, 5 e 10% of the activated carbon mass by the mass of dry topsoil, where the dose of 0.3125% was sufficient to reduce the available amount of the active ingredient in the solution. To investigate differences between commercial brands of charcoal, another experiment was conducted, following the same methodology with the doses of 0.15 and 0.5% w/w. After these steps, the activated carbon and the brands with the highest potential for indaziflam sorption were defined, and four other experiments with bioindicators were conducted, this time in a greenhouse. In two of these, conducted in a completely randomized design with five replications and in three different soils, the bioindicator *Urochloa decumbens* was used. In each treatment, twenty-five seeds were sown mixed with the topsoil, with or without a mixture of activated charcoal at a dose of 0.6% w/w, together with the application proportional to the area of the pots of 75 g of indaziflam per hectare on the soil surface. At 47 days after application, it was observed from the accumulation of dry biomass of the aerial parts, roots and total, the protection of grass germination in all situations, compared to the non-application of charcoal, which resulted, in turn, a drastic reduction in biomass production. Finally, two other experiments were conducted, following the same methodology and using, in turn, two species of green manure and seven native forest species of the Atlantic Forest, with evaluations of the germinated and established seedling count, at 47 DAA. Considering the results

obtained, it is possible to conclude that the use of activated charcoal is effective for the germination, emergence and initial development of all species studied, offering protection against the herbicidal effects of indaziflam. Considering its potential as pre-emergent herbicide this study suggests sustainable solutions in real scale against weeds competition and efficient natural forest establishment also in other ecosystems.

Keywords: weeds competition; phytotoxicity; activated charcoal; *Urochloa decumbens*; forest restoration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1 – Capacidade sortiva de diferentes materiais e análise do carvão ativado para sorção do indaziflam

- Figura 1 – Esquema ilustrativo do processo utilizado para a implementação dos experimentos. Iniciando com o preparo dos materiais e solo, pesagem, saturação, descanso, pesagem novamente, extração da solução, filtragem e análise cromatográfica.....33
- Figura 2 – Procedimento para saturação dos substratos e extração da solução de indaziflam. Separação (A), pesagem (B), saturação (C e D), extração (E) e filtragem (F) das amostras.....34
- Figura 3 – Cromatógrafo líquido (Prominence UFLC) acoplado ao espectrômetro de massas (Triple Quad 4500, AB Sciex).....35
- Figura 4 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de diferentes tipos de solo e substratos.....37
- Figura 5 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de solo com diferentes quantidades de carvão ativado.....40
- Figura 6 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de solo em mistura com diferentes fontes de carvão ativado.....42

Capítulo 2 – Análise do carvão ativado para sorção do indaziflam com bioindicadores vegetais

- Figura 1 – Esquema representativo do processo de preenchimento dos copos com os substratos e sementes da gramínea *Urochloa decumbens* antes da aplicação do herbicida indaziflam.....54
- Figura 2 – Copos preenchidos com os substratos e sementes da gramínea *Urochloa decumbens* antes da aplicação do herbicida indaziflam.....57
- Figura 3 – Temperatura máxima, mínima e média, em graus Celsius, no interior da casa-de-vegetação ao longo das repetições 1 (A) e 2 (B).....58
- Figura 4 – Coleta (A) e lavagem (B e C) do material vegetal, separação da parte aérea e radicular para posterior secagem e pesagem da massa seca.....58
- Figura 5 – Vasos estilo jardineira sendo preenchidos (A), acomodados para irrigação prévia à aplicação (B) e dentro da câmara para aplicação (C).....60

Figura 6 – Temperatura máxima, mínima e média, em graus Celsius, no interior da casa de vegetação ao longo das repetições 1 (A) e 2 (B).....	62
Figura 7 – Plântulas estabelecidas das espécies canafístula (<i>Peltophorum dubium</i>) e ipê-roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>) e contabilizadas em censo.....	63
Figura 8 – Plântulas estabelecidas do bioindicador <i>Urochloa decumbens</i> , em areia pura sob os diferentes tratamentos.....	67
Figura 9 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em areia com e sem carvão ativado (0 e 0,6%).....	68
Figura 10 – Plântulas estabelecidas do bioindicador <i>Urochloa decumbens</i> , em solo arenoso sob os diferentes tratamentos.....	70
Figura 11 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em solo arenoso com e sem carvão ativado (0 e 0,6%).....	72
Figura 12 – Plântulas estabelecidas do bioindicador <i>Urochloa decumbens</i> em solo argiloso sob os diferentes tratamentos.....	74
Figura 13 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em solo argiloso com e sem carvão ativado (0 e 0,6%).....	75
Figura 14 – Esquema representativo do preenchimento dos copos com substratos e do estabelecimento da gramínea nos diferentes tratamentos.....	77
Figura 15 – Porcentagem de germinação de espécies nativas sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam....	80
Figura 16 – Esquema representativo do preenchimento dos vasos jardineiras copos com substratos e do estabelecimento das espécies da restauração florestal nos diferentes tratamentos.....	81
Figura 17 – Feijão-de-porco (<i>Canavalia ensiformis</i>) aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A - esquerda e B) e ausência (A - direita e C) do carvão ativado (C).....	84
Figura 18 – Feijão guandu (<i>Cajanus cajan</i>) e ipê-amarelo (<i>Handroanthus vellosi</i>), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado	85

Figura 19 – Canafístula (<i>Peltophorum dubium</i>) e ipê-roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado	86
Figura 20 – Capixingui (<i>Croton floribundus</i>) e mutamba-verdadeira (<i>Guazuma ulmifolia</i>), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado	87

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Capacidade sortiva de diferentes materiais e análise do carvão ativado para sorção do indaziflam

Tabela 1 – Identificação dos tratamentos, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam e volume da solução.....	31
Tabela 2 – Identificação dos tratamentos, quantidade de carvão ativado, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam e volume da solução.....	32
Tabela 3 – Identificação dos tratamentos, marca comercial, quantidade do carvão ativado pela massa de solo, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam a 200 ppb e volume da solução.....	32
Tabela 4 – Análise de variância das concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de diferentes tipos de solo e substratos.....	36
Tabela 5 – Valores de quadrado médio (QMe), coeficiente de variação (CV), coeficiente de determinação (R^2) e constantes da equação de regressão para concentrações de indaziflam extraído de diferentes quantidades de carvão ativado em mistura com solo.....	39
Tabela 6 – Análise de variância das concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de solo em mistura com diferentes fontes de carvão ativado...	41

Capítulo 2 – Análise do carvão ativado para sorção do indaziflam com bioindicadores vegetais

Tabela 1 – Tratamentos testados com a adição ou não do carvão ativado, e curva dose-resposta do herbicida pré-emergente indaziflam.....	55
Tabela 2 – Tratamentos com carvão ativado e o herbicida pré-emergente indaziflam em diferentes doses.....	59
Tabela 3 – Seleção de espécies para restauração florestal na Mata Atlântica: nomes comuns e científicos, famílias e características ecológicas sucessionais.....	61
Tabela 4 – Espécies para restauração florestal na Mata Atlântica e procedimentos utilizados para quebra de dormência específica de cada espécie.....	62
Tabela 5 – Valores de F e coeficiente de variação para acúmulo de massa seca na parte aérea, raiz e total de braquiária em função da aplicação de	

indaziflam na presença e ausência de carvão ativado em areia, solo arenoso e solo argiloso.....64

Tabela 6 – Valores de F e coeficiente de variação para porcentagem de germinação de nove espécies nativas sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam.....78

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	23
CAPÍTULO 1 – CAPACIDADE SORTIVA DE DIFERENTES MATERIAIS E ANÁLISE DO CARVÃO ATIVADO PARA SORÇÃO DO INDAZIFLAM.....	26
1.1 INTRODUÇÃO.....	26
1.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	27
1.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
1.4.1 Experimento 1 – Seleção de materiais sorventes do indaziflam.....	36
1.4.2 Experimento 2 – Curva dose-resposta da retenção do indaziflam em diferentes quantidades de carvão ativado em mistura com solo.....	39
1.4.3 Experimento 3 – Diferentes marcas comerciais de carvão ativado e suas capacidades de retenção do indaziflam quando em mistura com solo.....	41
1.5 CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIAS.....	46
CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DO CARVÃO ATIVADO PARA SORÇÃO DO INDAZIFLAM COM BIOINDICADORES VEGETAIS.....	48
2.1 INTRODUÇÃO.....	48
2.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	49
2.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	54
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
2.4.1 Proteção do carvão ativado aos efeitos de diferentes doses do indaziflam em três tipos de solo.....	64
2.4.2 Potencial do carvão ativado em curva de doses do herbicida indaziflam e os efeitos no estabelecimento de plântulas de espécies utilizadas para a restauração da Mata Atlântica.....	78
2.5 CONCLUSÕES.....	90
REFERÊNCIAS.....	91
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
REFERÊNCIAS.....	97
APÊNDICE A – Análise da homogeneidade das variâncias residuais (F_{máximo}), entre os experimentos realizados em duplicata, para acúmulo de massa seca na parte aérea, raiz e total das plantas do	

capim-braquiária após aplicação de indaziflam em diferentes texturas de solo com e sem carvão ativado.....	100
APÊNDICE B – Análise da homogeneidade das variâncias residuais (F _{máximo}), entre os experimentos realizados em duplicata, para porcentagem de germinação de nove espécies da restauração florestal sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam.....	100
APÊNDICE C – Análise física e química dos solos.....	101

INTRODUÇÃO GERAL

Diante da contínua evolução da agricultura e silvicultura brasileira, é importante a busca e a consolidação do uso de novas tecnologias em prol da produtividade e proteção dos recursos naturais (EMBRAPA, 2018). Dentre as inovações, destaca-se, nas últimas décadas, por sua relevância e acessibilidade, o uso dos produtos fitossanitários (MORAES, 2019). Contudo, apesar dos benefícios, conhecê-los a fundo é fundamental para evitar riscos à saúde humana e ambiental, ademais garantindo a produtividade esperada dos cultivos.

Dentre esses produtos, a classe dos herbicidas tem papel fundamental. No Brasil, estão registrados mais de 125 ingredientes ativos herbicidas (MAPA, 2023). Isso permite maior disponibilidade de opções, trazendo maior flexibilidade e qualidade no controle da matocompetição, além de contribuição direta para o manejo da resistência. Classificam-se os ativos herbicidas por grupos químicos, mecanismos de ação, translocação nas plantas, residualidade, seletividade aos cultivos, além de outros. Portanto, conhecer suas propriedades e recomendações tem implicações para o desempenho e a segurança.

Após sua aplicação, o destino desses compostos pode ser múltiplo e variado, podendo sofrer retenção, serem transformados ou transportados. Sendo assim, todo uso de herbicidas no campo poderá atingir o solo, seja direta ou indiretamente (CORREIA, 2018). No caso dos herbicidas pré-emergentes, cujo principal alvo é o próprio solo, faz-se importante o conhecimento de atributos como Capacidade de Troca de Cátions (CTC), pH, carbono orgânico e textura do solo. Além das condições ambientais de temperatura, umidade e luminosidade, interagindo com as características intrínsecas dos produtos, consideram-se as seguintes propriedades: solubilidade em água, capacidade sortiva, afinidade às partes orgânicas, ionização, pressão de vapor, entre outras (OLIVEIRA JR.; REGINATO, 2009; MANCUSO *et al.*, 2011).

A retenção pode ocorrer devido à sorção dos herbicidas no solo e refletir diretamente em seu uso, uma vez que reduz sua disponibilidade, afetando a eficácia e a seletividade. Pode também reduzir os riscos de contaminação de águas subterrâneas, com a redução da lixiviação. Entretanto, o manejo do solo, também, pode influenciá-la (OLIVEIRA JR. *et al.*, 2011). Em solos arenosos, onde naturalmente possuem pouca matéria orgânica e argila, observa-se maior suscetibilidade à

movimentação desses ingredientes ativos e seus derivados, pois possuem poucas cargas com capacidade de reter aqueles que teriam afinidade aos compostos orgânicos do solo (CORREIA *et al.*, 2010). Em contrapartida, manejos que permitam a manutenção ou ainda que agreguem matéria orgânica ao solo podem reduzir ou desacelerar esses processos (PEREIRA *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2006).

Conforme Burr *et al.* (1972), o carvão ativado tem potencial de proteção para plantas, sendo utilizado há décadas contra os efeitos herbicidas do diuron em plantas de azevém; até a atualidade, com a aplicação indaziflam em gramíneas (DAVIES *et al.*, 2023). Desenvolveram-se vários trabalhos científicos com esse fim para os herbicidas, sendo considerado o tebutiuron, hexazinona, diuron, ametrina (PRETE *et al.*, 2017), imazapir, imazapique (YAVARI *et al.*, 2016), flumioxazina (SEBASTIAN *et al.*, 2017a), aminociclopiraclo, aminopiralde e indaziflam (SEBASTIAN *et al.*, 2017b).

No entanto, necessitam-se estudos específicos para verificar a disponibilidade de tais moléculas herbicidas na solução do solo. Como exemplo, o uso da cromatografia obtém, em pouco tempo e com boa resolução, resultados quantitativos e de alta sensibilidade (TEJU *et al.*, 2017), principalmente em comparação às análises biológicas. Ainda, estudos atuais têm revelado a possibilidade de estimar o potencial de sorção e lixiviação de herbicidas, considerando-se ensaios com bioindicadores (CELIS *et al.*, 2002; FREITAS *et al.*, 2014; MEHDIZADEH *et al.*, 2017). Essas duas formas de análises podem ser utilizadas complementarmente.

O indaziflam é um dos ingredientes ativos herbicidas mais recentes registrados no Brasil. Desde 2016 possui produtos registrados no país. Ele compõe o grupo químico das alquilazinas, e, como mecanismo de ação, inibe a produção de celulose quando atinge regiões meristemáticas. Inibindo a deposição dos seus cristais na parede celular, prejudicando sua formação, alongamento e divisão celular (BRABHAM, 2014), afetando, diretamente, os tecidos vegetais em desenvolvimento (GUERRA *et al.*, 2013).

Recomendam-se os produtos com base no indaziflam para serem aplicados ainda durante a pré-emergência das plantas daninhas. Com isso, seus efeitos serão dependentes das relações físico-químicas do solo com o herbicida e das condições ambientais. Atua tanto em gramíneas quanto nas plantas eudicotilêdoneas, assim amplo espectro de controle. Seus usos abrangem culturas agrícolas e florestais, além

das áreas de conservação da natureza (IBAMA, 2023), que abrangem, entre outras, a restauração florestal.

Sabe-se que gramíneas exóticas são as principais causas do insucesso no estabelecimento natural de florestas em ecossistemas tropicais e do aumento de custos em operações de campo. Principalmente, devido às recorrentes intervenções desde o plantio até a formação do dossel florestal, momento em que o sombreamento desfavorece o estabelecimento das heliófilas (CAMPOE *et al.*, 2010), processo similar ao controle cultural que ocorre nos cultivos agrícolas e nas florestas comerciais. Devido às operações de manejo serem onerosas na restauração ativa, quanto menos eficientes, maior será a carga de manutenção necessária, aumentando, assim, proporcionalmente, o custo total (BRANCALION *et al.*, 2019). Além disso, outros custos devem ser considerados como relacionados à logística desfavorável das áreas comumente utilizadas para esse fim (WEIDLICH *et al.*, 2020), por serem fragmentadas e de difícil acesso.

Assim, entende-se que o uso do herbicida indaziflam, no manejo da matocompetição em áreas de restauração florestal, pode ser relevante. Em razão de seu comportamento e riscos, é fundamental investigar seu uso e implicações na busca por mitigar efeitos indesejados nas plantas de interesse. Assim, deve-se buscar o desenvolvimento sustentável da restauração de florestas e outros ecossistemas, promovendo tecnologias que viabilizem e tragam atratividade para a adoção dessas práticas.

Neste trabalho, buscou-se compreender potenciais capacidades sortivas de materiais orgânicos ao indaziflam, sendo puros ou em mistura com solo, ademais de sua interação com o carvão ativado em diferentes quantidades e fabricantes. Consequentemente aos resultados obtidos, realizaram-se experimentações com bioindicadores de forma a compreender a proteção causada pela sorção do herbicida contra os efeitos do indaziflam em *Urochloa decumbens*, além de outras 9 espécies de interesse para a restauração florestal da Mata Atlântica via semeadura.

CAPÍTULO 1

CAPACIDADE SORTIVA DE DIFERENTES MATERIAIS E ANÁLISE DO CARVÃO ATIVADO PARA SORÇÃO DO INDAZIFLAM

1.1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas desempenham um papel crucial para o desenvolvimento agrícola e florestal ao controlar plantas daninhas que competem por recursos essenciais. No Brasil, há uma ampla variedade de ingredientes ativos e produtos herbicidas registrados. No entanto, compreender a disponibilidade e os riscos ambientais associados ao uso desses produtos é fundamental para desenvolver estratégias de manejo sustentáveis. Os processos que determinam a disponibilidade dos herbicidas no ambiente são complexos e interativos, influenciados por características físico-químicas dos ingredientes ativos, solos, fatores climáticos e manejo do solo. Esses processos incluem retenção, transformação e transporte, que são afetados por interações entre os herbicidas e componentes do solo. Análises cromatográficas e bioindicadores constituem métodos eficazes para avaliar a disponibilidade de herbicidas no solo, oferecendo uma compreensão abrangente de seus efeitos ambientais. Um exemplo é o indaziflam, um herbicida pré-emergente com amplo espectro de ação. Sua seletividade depende do manejo do solo e de sua aplicação. Para mitigar os impactos ambientais do indaziflam, a adsorção em diferentes materiais sorventes, como o carvão ativado, tem sido estudada. O carvão ativado, produzido por carbonização e ativação de materiais orgânicos, demonstra grande potencial para adsorver substâncias em solução. Sua capacidade adsorvente é influenciada pela matéria-prima, processos de produção, tamanho e características dos poros. Simularam-se hipóteses para investigar a capacidade de adsorção do indaziflam em diferentes materiais adsorventes e quantidades de carvão ativado, além de comparar diferentes marcas comerciais. Realizaram-se experimentos e análises laboratoriais para avaliar a retenção do indaziflam, fornecendo informações essenciais para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficazes e seguras, contribuindo para a compreensão de seu comportamento em diferentes sistemas agrícolas, florestais e de restauração de ecossistemas naturais.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

Os herbicidas possuem papel fundamental para o desenvolvimento agrícola e florestal, pois auxiliam na redução de fatores que afetam negativamente os cultivos e os impossibilitam de atingir seu maior potencial produtivo. O controle das plantas daninhas é fundamental, evitando a competição interespécies por recursos do meio, como luz, água e nutrientes (PITELLI, 2014). No Brasil há grande diversidade de ingredientes ativos e produtos herbicidas registrados (MAPA, 2023).

Os processos que determinam a disponibilidade dos herbicidas no ambiente, assim como seu potencial e riscos atrelados ao seu uso são complexos e interativos. Sua compreensão é essencial para avaliar esses riscos associados e desenvolver estratégias de manejo sustentáveis. As características físico-químicas, tanto dos ingredientes ativos quanto dos solos, além de fatores climáticos e do manejo do solo, refletem no seu comportamento ambiental. Assim, ocorrerão os processos de retenção, transformação e transporte, além das interações entre eles (GEBLER; SPADOTTO, 2004).

Ainda, os mesmos autores explicam que a retenção pode ocorrer devido à adsorção, que consiste na adesão de moléculas de herbicidas às superfícies dos sólidos do solo ou à absorção, com a entrada dessas moléculas na matriz do solo. A capacidade de um solo reter herbicidas está relacionada à sua textura, matéria orgânica e pH. Já a transformação pode ocorrer devido à degradação química ou biológica no solo.

Processos como fotólise, hidrólise, degradação química ou biológica são exemplos da transformação (SPADOTTO, 2002). A composição química dos herbicidas e as características do solo afetam esses processos, juntamente ao transporte por deriva, volatilização, lixiviação e carreamento superficial. As interações entre os herbicidas e os componentes do solo, como argila, matéria orgânica e minerais, influenciam, significativamente, sua eficácia e persistência no ambiente.

Análises cromatográficas são eficazes para avaliar a disponibilidade de herbicidas na solução do solo. Elas proporcionam resultados quantitativos com alta sensibilidade e boa resolução, além de requererem menos tempo em comparação com abordagens biológicas (SOUZA, 2018). No entanto, as análises com bioindicadores também são valiosas e podem ser utilizadas com consistência, proporcionando uma abordagem complementar, aumentando a robustez dos

resultados (NUNES; VIDAL, 2009). Essa combinação de métodos pode oferecer uma compreensão mais abrangente dos efeitos dos herbicidas no ambiente.

O indaziflam é uma molécula herbicida pré-emergente com amplo espectro de ação, pertencente ao grupo químico das alquilazinas. Possui baixa solubilidade em água ($0,0028 \text{ kg m}^{-3}$ a 20°C), moderada mobilidade no solo ($K_{oc} < 1.000 \text{ ml g}^{-1}$ de carbono orgânico), e moderada lipofilicidade (K_{ow} em pH 4; 7 ou 9 = 2,8) (ALONSO *et al.*, 2011). Comporta-se como um ácido fraco com pK_a de 3,5 e meia-vida de 150 dias (TOMPKINS, 2010). Sua seletividade é condicional às plantas de interesse, dependendo do manejo do solo, momento e posicionamento de sua aplicação. Além disso, a incorporação de alguns materiais com potencial de sorver compostos podem contribuir com esse comportamento, como os inorgânicos: vermiculita expandida (TEODORO *et al.*, 2020), e os orgânicos: húmus (SENA, 2018), esterco de gado (TEIXEIRA, 2019) e lodo de esgoto (VIANA, 2013).

O carvão ativado também possui grande potencial de adsorver gases e moléculas e íons em solução. Esse produto é amplamente utilizado nas mais diversas aplicações industriais e ambientais, tais como na remoção e remediação de contaminações por substâncias tóxicas no solo e água (MOSSOUT *et al.*, 2018; BANSAL; GOYAL, 2005). Ele é produzido por meio da carbonização e ativação de materiais orgânicos. Isso garante a formação de microporos gerando assim uma ampla superfície e definindo suas características. Pode ser gerado por meio de diversas fontes de matéria-prima, desde que sejam ricas em carbono (DANISH; AHMAD, 2018). Os mesmos autores ainda complementam que a produção pode ocorrer de três formas, com ativação física, química ou físico-química, dependendo da finalidade.

Cândido (2019) resume os processos de ativação da seguinte forma: sendo a física com duas etapas de carbonização, na primeira com temperaturas entre 300 e 800°C , seguida da aeração, em temperaturas que atingem de 700 a 1000°C , resultando em poros mais uniformes em comparação com a ativação química. Já na ativação química, ocorre a impregnação de produtos químicos além da carbonização em temperaturas variando entre 400 e 950°C , possui alto rendimento e tempo de ativação curto, criando menor densidade de poros. Por fim, há a ativação físico-química, que mescla as duas formas, gerando porosidade desenvolvida e densidade aparente relativamente alta.

Além da matéria-prima e qualidade dos processos, segundo Ahmed *et al.* (2019), a quantidade e tamanho dos poros, área superficial e volume total podem influenciar a capacidade de adsorção do carvão produzido. O tamanho da partícula também pode influenciar os processos adsorptivos, sendo comumente encontrados em pó ($< 0,2$ mm) ou granulado (0,2 e 5 mm). Ressalta-se que quanto menor a partícula, mais facilmente ela se dispersa em líquidos, pastas e géis. Quanto aos poros do carvão ativado, segundo Silva *et al.* (2020), dividem e classificam-se pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) (THOMMES *et al.*, 2015) em três grupos: microporos (< 2 nm), mesoporos (2-50 nm) e macroporos (> 50 nm). Os microporos também podem ser subdivididos em supermicroporos (0,7 ~ 2 nm) e ultramicroporos ($< 0,7$ nm).

A química da superfície do carvão ativado também pode ter um efeito significativo, sendo determinada pela presença de heteroátomos como oxigênio, nitrogênio, enxofre e fósforo, na forma de grupos funcionais, derivados da natureza do material precursor e do processo de ativação (ROMERO RAMÍREZ, 2018).

Andia (2009) descreve que o adsorvente presente em solução, quando em contato com um sítio ativo na superfície dos poros do carvão, pode sofrer adsorção. Contudo, o tempo de contato determina as taxas de adsorção e dessorção até o equilíbrio, momento em que atinge seu máximo potencial. Quando a capacidade de adsorção for associada à concentração de equilíbrio (líquido) ou pressão de equilíbrio (gás) do adsorvente em temperatura constante, a curva resultante representa a distribuição entre a fase sólida (carvão ativado) e o líquido ou gás em cada estado de equilíbrio. Ainda segundo o autor, dependendo da natureza das forças envolvidas, a adsorção pode ser dividida em dois tipos: a adsorção física, que é reversível e pode formar camadas, e a adsorção química formando ligações monocamadas e irreversíveis.

Portanto, formularam-se três hipóteses com base no conhecimento do potencial de sorção do indaziflam em potenciais materiais sorventes e orgânicos, como o carvão ativado:

- diferentes materiais adsorventes possuem diferentes capacidades de adsorver o indaziflam;
- diferentes quantidades de carvão ativado possuem diferentes capacidades de adsorver o indaziflam;

– diferentes marcas comerciais de carvão ativado possuem diferentes capacidades de adsorver o indaziflam.

Buscou-se verificar, por meio de experimentos e análises laboratoriais, a retenção do indaziflam por diversos materiais orgânicos, assim como o carvão ativado, bem como investigar possíveis variações na capacidade adsorvente do carvão ativado de diferentes marcas comerciais. Esses estudos podem oferecer informações valiosas para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e seguras, contribuindo para a compreensão do comportamento do indaziflam em sistemas agrícolas, florestais e de restauração de ecossistemas naturais.

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

Conduziram-se os experimentos em laboratório, no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP, campus de Botucatu-SP, no período compreendido entre junho de 2021 e junho de 2022. Para os três experimentos, aplicou-se a mesma metodologia, apesar de seus diferentes objetivos.

Realizaram-se os experimentos em delineamento inteiramente casualizado com 5 repetições. Sendo cada unidade experimental constituída por seringas plásticas contendo na parte inferior um filtro de papel de fibra de vidro para evitar perdas dos materiais e preenchidas com substratos secos referentes a cada tratamento. Após a montagem, as unidades foram pesadas, e posteriormente saturadas com solução de água pura, com indaziflam na concentração de 200 ppb.

A saturação ocorreu no sentido de baixo para cima da coluna da seringa de forma forçada, utilizando-se de vácuo por bomba de pressão, garantindo maior eficiência e homogeneidade no processo. Logo após essa etapa, cada seringa foi novamente pesada para identificar a quantidade de solução necessária para a saturação completa e obtenção da quantidade de indaziflam para cada unidade.

Depois de saturados, esses substratos permaneceram em repouso durante 24 horas, à temperatura ambiente e protegidos da luz, sendo cobertos totalmente por papel alumínio. Extraiu-se a solução por vácuo, em câmara hermética e coletada em frascos plásticos, coletada e filtrada em filtros da marca Millex – HV (membrana de PVDF 0,45 micrômetros e 13,00 mm de diâmetro), armazenada em flaconetes do tipo

vial de 2,0 ml, e mantida sob refrigeração até o momento da quantificação do herbicida por cromatografia.

Compuseram os tratamentos do Experimento 1: solo com textura arenosa, solo com textura média (SM), solo com textura argilosa (todos os solos estão descritos no Apêndice C), húmus de minhoca, lodo de esgoto seco, substrato orgânico para viveiro, mistura de SM com vermiculita, SM e maravalha moída, SM e chips de coco, SM e casca de pinus moída, para cada um destes materiais adicionados ao SM a proporção foi de 5% da massa do material em relação à massa do solo. Realizou-se também a combinação de solo de textura média com 5% e 10% de carvão vegetal, assim como 5% e 10% de carvão vegetal ativado, conforme a Tabela 1. O carvão vegetal ativado utilizado é da marca Sigma, com granulometria de 100 mesh. Para os demais tratamentos, as marcas comerciais. Trituraram-se a maravalha, os chips de coco e a casca de pinus individualmente em um liquidificador convencional até se tornarem pó.

Tabela 1 – Identificação dos tratamentos, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam e volume da solução

Substrato	Massa seca do substrato (g)	Massa saturada do substrato + solução (g)	Volume da solução (ml)
Solo arenoso	82,70	100,90	18,20
Solo médio	72,39	96,55	24,16
Solo argiloso	77,92	100,55	22,62
Húmus de minhoca	47,34	68,03	20,69
Lodo de esgoto seco	62,65	85,05	22,41
Substrato orgânico	32,92	61,97	29,05
SM + Vermiculita 5%	65,28	87,56	22,28
SM + Maravalha 5%	65,22	85,90	20,67
SM + Chips de coco 5%	64,76	97,44	32,68
SM + Casca de pinus 5%	65,13	83,76	18,64
SM + CV 5%	75,87	97,20	21,33
SM + CV 10%	78,75	100,86	22,11
SM + CA 5%	75,57	99,23	23,66
SM + CA 10%	78,98	101,66	22,68

SM: solo médio; CV: carvão vegetal; CA: carvão ativado. 5 e 10% representam a proporção da massa seca do material em relação à massa seca do SM.

No Experimento 2, formaram-se os tratamentos por diferentes doses de carvão ativado, misturadas ao solo de textura média, estabelecendo, assim, uma curva dose-resposta. As doses variaram entre 0; 0,15625; 0,3125; 0,625; 1,25; 2,5; 5 e 10% de carvão em relação à quantidade de solo seco utilizada para o preenchimento de cada

seringa. Padronizou-se a granulometria dos tratamentos utilizando a marca Sigma 100 mesh, e detalham-se as características específicas de cada tratamento na Tabela 2.

Tabela 2 – Identificação dos tratamentos, quantidade de carvão ativado, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam e volume da solução

Substrato	Quantidade do CA (% m/m)	Massa seca do substrato (g)	Massa saturada do substrato + solução (g)	Volume da solução (ml)
SM + CA	0	72,59	96,94	24,35
SM + CA	0,15625	72,51	97,13	24,62
SM + CA	0,3125	72,47	96,65	24,18
SM + CA	0,625	72,46	96,27	23,81
SM + CA	1,25	72,51	96,56	24,05
SM + CA	2,5	72,13	95,11	22,98
SM + CA	5	72,41	95,16	22,75
SM + CA	10	72,23	97,27	25,04

SM: solo médio; CA: carvão ativado.

No Experimento 3, analisou-se a capacidade de sorção de indaziflam em nove diferentes marcas comerciais de carvão ativado e sua capacidade sortiva. Selecionaram-se diversas marcas, nas doses de 0,15 e 5% da relação massa de carvão pela massa de solo, preenchendo cada seringa com uma mistura. Definiram-se as marcas comerciais conforme a disponibilidade no mercado e apresentaram-se diferentes faixas de preços: Sigma 8-20 mesh, Sigma 8-20 mesh (triturado), Sigma 100 mesh, Auros, JCR Pelegrini, Quimidrol, Zona Cerealista, Elegância Orgânica e Synth.

De forma geral, não havia especificações claras sobre suas características, como processo de produção, lote, granulometria, apesar de estarem apresentados como pó e de origem oriunda da madeira; portanto, carvão vegetal ativado. Especificam-se, na Tabela 3, os tratamentos e suas características.

Tabela 3 – Identificação dos tratamentos, marca comercial, quantidade do carvão ativado pela massa de solo, massa seca dos substratos, massa saturada com solução contendo indaziflam a 200 ppb e volume da solução

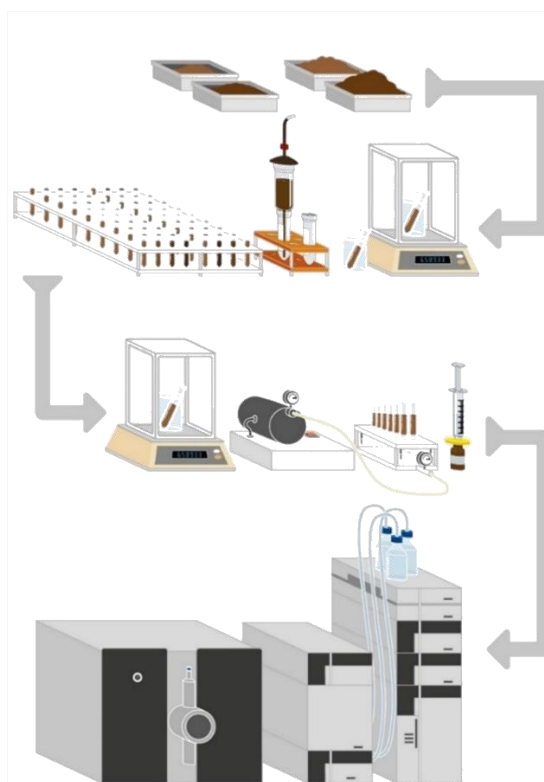
Substrato	Marca comercial do CA	Quantidade do CA (% m/m)	Massa seca do substrato (g)	Massa saturada do substrato + solução (g)	Volume da solução (ml)
SM	–	–	72,36	92,01	19,65
SM + CA	Sigma 8-20 mesh	0,15%	72,46	92,79	20,33
		0,50%	72,51	93,12	20,61
SM + CA		0,15%	72,53	89,78	17,25

	Sigma 8-20 mesh (triturado)	0,50%	72,45	90,74	18,28
SM + CA	Sigma 100 mesh	0,15%	72,54	91,85	19,32
		0,50%	72,52	92,39	19,87
SM + CA	Auros	0,15%	72,56	98,11	25,55
		0,50%	72,53	97,67	25,14
SM + CA	JCR Pelegrini	0,15%	72,42	98,51	26,09
		0,50%	72,40	97,67	25,27
SM + CA	Quimidrol	0,15%	72,46	98,42	25,95
		0,50%	72,45	98,50	26,05
SM + CA	Zona Cerealista	0,15%	72,54	97,85	25,31
		0,50%	72,53	93,65	21,12
SM + CA	Elegância Orgânica	0,15%	72,39	94,56	22,16
		0,50%	72,36	93,73	21,37
SM + CA	Synth	0,15%	72,44	94,22	21,77
		0,50%	72,41	93,56	21,15

SM: Solo Médio; CA: Carvão Ativado.

De forma a facilitar o entendimento do processo para implementar os experimentos, elaborou-se um esquema com um passo-a-passo conforme a Figura 1.

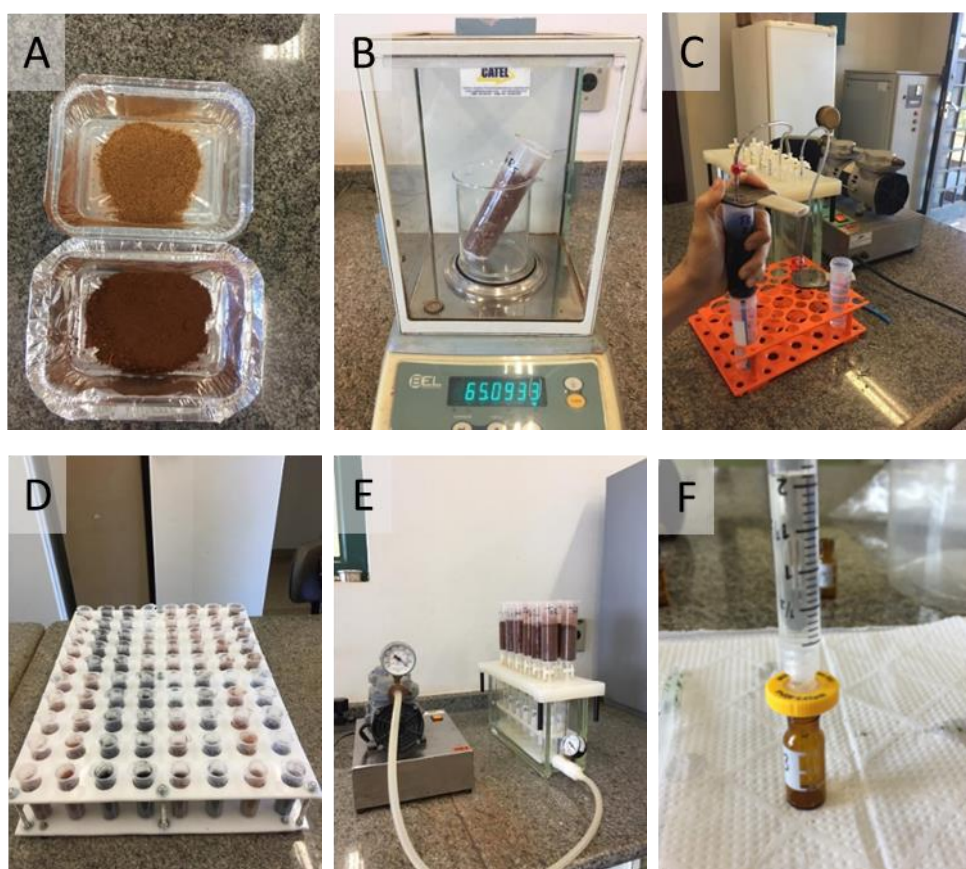
Figura 1 – Esquema ilustrativo do processo utilizado para a implementação dos experimentos, iniciando-se com o preparo dos materiais e solo, pesagem, saturação, descanso, pesagem novamente, extração da solução, filtragem e análise cromatográfica



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

Na Figura 2, identificam-se os materiais e equipamentos utilizados ao longo da implementação dos experimentos. Estes iniciaram pela separação do solo e materiais utilizados como substrato ou parte dele, finalizando com o processo da secagem. Houve ainda a acomodação em seringas e pesagem, seguida da adição da solução contendo indaziflam. Por fim, o período de descanso de 24 h, extração da solução e filtragem.

Figura 2 – Procedimento para saturação dos substratos e extração da solução de indaziflam (separação (A), pesagem (B), saturação (C e D), extração (E) e filtragem (F) das amostras)



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Para a realização das análises, utilizou-se um sistema LC-MS/MS, composto por um Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (HPLC), Shimadzu, modelo Proeminence UFLC, que combina análise ultrarrápida e excelente desempenho na separação, com alta confiabilidade de resultados; equipado com duas bombas LC-20AD, autoinjeter SIL-20AC, degaseificador DGU-20A5, sistema controlador CBM-20A (permite a operação totalmente automatizada) e forno CTO-20AC (para controle

da temperatura da coluna. Acoplado ao HPLC está o espectrômetro de massas 4500, Triple Quad, AB Sciex (Figura 3).

Figura 3 – Cromatógrafo líquido (Proeminence UFLC) acoplado ao espectrômetro de massas (Triple Quad 4500, AB Sciex)



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Este é o modo quantitativo padrão, utilizado para o metabólito alvo, tendo como principais vantagens elevada sensibilidade e reprodutibilidade, baixo ruído e medição simultânea de até 100 compostos (QUEIROGA, 2009). Na análise dos resultados, realizou-se a comparação de médias teste T (LSD) ($p \leq 0,05$) com auxílio do programa estatístico Sisvar.

Para o experimento de curva dose-resposta, submeteram-se, inicialmente, os resultados da avaliação de fitointoxicação, altura e massa seca à análise de variação ($p \leq 0,05$). Quando significativas pelo teste F, ajustaram-se os dados no modelo de regressão não linear, proposto por Streibig (1988). Quando não significativo, aplicou-se o teste T para comparação das médias com o modelo de 3 parâmetros:

$$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{b}\right)^c\right]}$$

Em que:

y = controle percentual;

x = dose do herbicida (kg ha^{-1}) e;

a , b e c = parâmetros estimados da equação, de tal forma que:

a = amplitude existente entre o ponto máximo e o ponto mínimo da variável;

b = dose que proporciona 50% de resposta da variável;

c = declividade da curva ao redor de b .

Calcularam-se os intervalos de confiança (média $\pm$ intervalo de confiança) pelo teste T por meio da equação:

$$IC = \frac{t^*DP}{\sqrt{n}}$$

Em que t se refere ao valor de t tabelado ($p \leq 0,05$), DP ao desvio padrão dos dados e n ao número de amostragens.

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.4.1 Experimento 1 – Seleção de materiais sorventes do indaziflam

Ao analisar a quantidade de indaziflam disponível nas soluções extraídas de cada tratamento com substrato saturado em solução contendo 200 ppb do herbicida indaziflam por 24 horas, observaram-se diferenças significativas entre os tratamentos, conforme a Tabela 4.

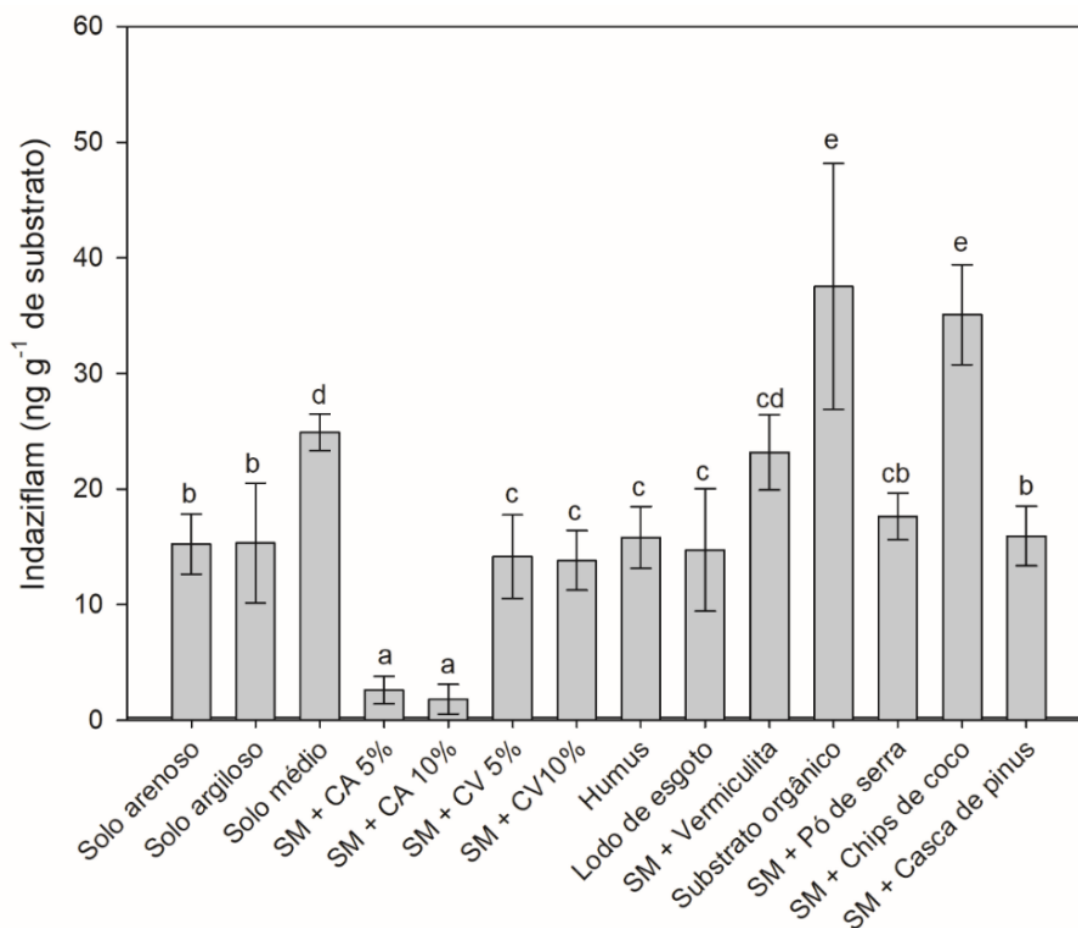
Tabela 4 – Análise de variância das concentrações de indaziflam (ng g⁻¹ de substrato) extraído de diferentes tipos de solo e substratos

Fontes de variação	GL	SQ	QM	F	P
Substrato	13	6564,099	504,931	21,945	0,000
Erro	56	1288,512	23,009		
Total	69	78526227			
CV	27,12				

As colunas indicadas na Figura 4 representam a quantidade de indaziflam encontrada na solução extraída. Sendo assim, quanto maior a quantidade, menor a capacidade de retenção dos substratos testados. Essa condição está diretamente relacionada à retenção desses materiais ao herbicida. Portanto, quanto menor a

concentração de indaziflam extraída, maior foi a quantidade retida, e assim maior o potencial do material nesse processo.

Figura 4 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de diferentes tipos de solo e substratos



Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$). SM: solo médio; CA 5%: carvão ativado com 5% m/m de solo; CA 10%: carvão ativado com 10% m/m de solo.

O estudo de Barcellos Júnior *et al.* (2021) destaca importantes informações sobre a adsorção do herbicida indaziflam em diferentes tipos de solo. Ele indica que o indaziflam possui uma afinidade moderada ao carbono orgânico e sugere que a presença de matéria orgânica no solo pode influenciar a sorção do herbicida.

Os resultados desse experimento revelaram que não houve diferença estatisticamente significativa em relação à retenção do indaziflam entre os solos arenoso e argiloso. No entanto, observou-se uma diferença significativa em relação ao solo médio, indicando a influência das características específicas do solo na sorção do herbicida.

Entretanto, no tratamento constituído de substrato orgânico para viveiros e na mistura de solo médio (SM) com casca de coco seca (chips de coco) e moída na proporção de 5%, o indaziflam esteve presente na solução extraída do substrato orgânico. Nesses dois tratamentos, a quantidade média de indaziflam foi superior ao próprio solo padrão na ordem de 40 e 38%, respectivamente.

O substrato orgânico, mesmo tendo em sua composição diversos materiais orgânicos como turfa, pó e fibra de coco, casca de pinus moída e compostada, além de fertilizantes, não teve boa retenção do herbicida. Possivelmente, a preparação dos materiais não foi adequada o suficiente para reduzir a quantidade de espaços livres, fazendo com que as moléculas não tivessem contato e tempo suficiente com potenciais superfícies de adsorção desses compostos. Sendo assim, grande quantidade do herbicida, ainda, estava disponível na solução final extraída.

Considerou-se, nesse experimento, a vermiculita expandida, apesar de não ser um material orgânico, pois possui elevada capacidade sortiva devido a sua forma em lâminas e espaços ativos e por apresentar diversos usos importante, como para a descontaminação de áreas e contenção de vazamentos químicos. Contudo, os resultados obtidos indicaram que o solo misturado com vermiculita não apresentou diferença significativa em relação ao solo padrão, além da elevada variação obtida. Teodoro *et al.* (2020) concluíram que a vermiculita expandida, apesar de apresentar potencial capacidade adsorvente, possui maior afinidade com cátions e moléculas catiônicas. Como o indaziflam comporta-se como um ácido fraco (ALONSO *et al.*, 2011) e, portanto, é um doador de prótons, pode não ter ocorrido afinidade suficiente para haver retenção em sua superfície, assim como a preparação dos materiais pode ter permitido a presença de grande quantidade de macroporos, evitando o contato necessário para o maior nível de adsorção.

Para os tratamentos com substratos que continham solo e 5 e 10% de carvão vegetal em pó, maravalha e casca de pinus em pó, além do lodo de esgoto e húmus, não houve diferenças estatísticas entre si. Contudo, a quantidade de indaziflam encontrada nessas soluções representou desde 55 a 71% do total encontrado na solução extraída do substrato que possuía somente o solo padrão utilizado. Portanto, a capacidade de retenção do indaziflam para esses compostos, em relação à forma que foram testados, indica que podem ser capazes e indicados para uso na diminuição da disponibilidade do ingrediente ativo nesses níveis encontrados.

Para os tratamentos compostos por solo e carvão ativado, nas duas proporções de 5 e 10% m/m, observou-se a menor sorção de indaziflam com diferença significativa em relação a todos os outros tratamentos. A quantidade de indaziflam encontrada nessas soluções representa cerca de 7 a 10% do total encontrado na solução extraída do tratamento que possuía somente o solo padrão utilizado. Portanto, demonstrou-se que o carvão ativado possui alta capacidade nessas concentrações de sorver o indaziflam. Apesar dos resultados, sugerem-se mais estudos para a compreensão das capacidades sortivas do carvão ativado para o indaziflam em solução e sua aplicabilidade.

1.4.2 Experimento 2 – Curva dose-resposta de retenção do indaziflam em diferentes quantidades de carvão ativado em mistura com solo

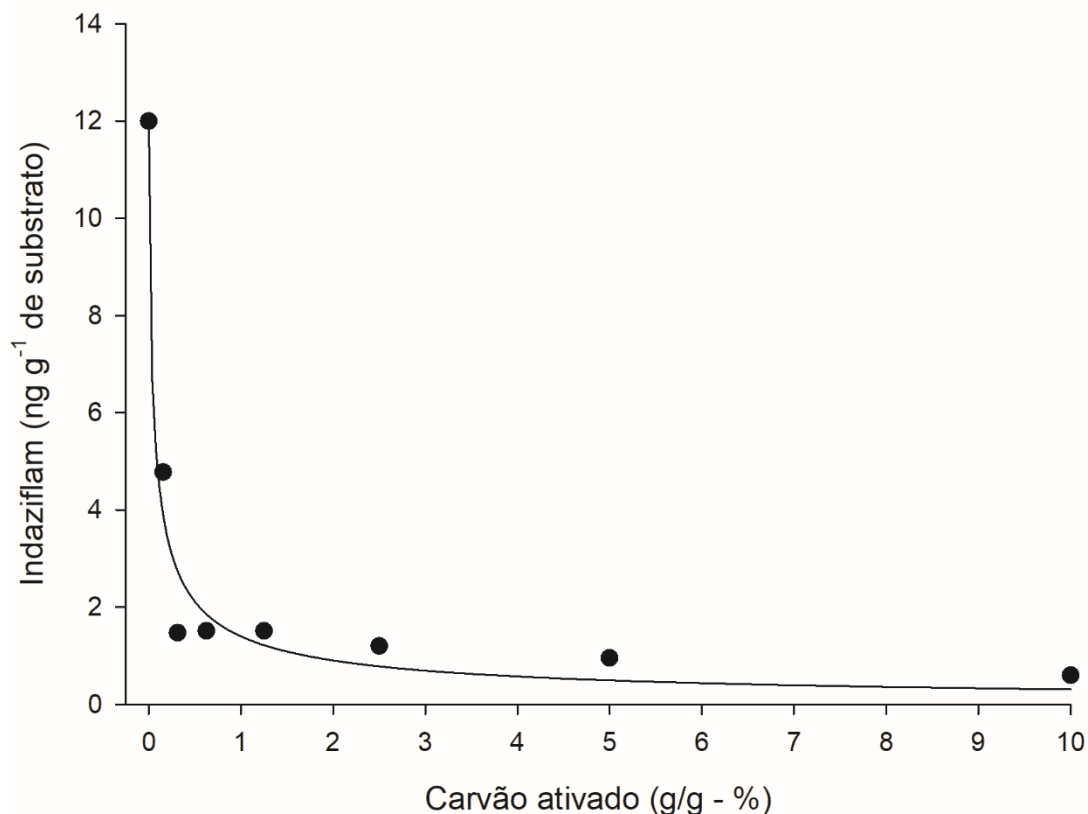
Durante a análise da quantidade de indaziflam presente em soluções extraídas de cada tratamento, os quais envolveram diferentes quantidades de carvão ativado misturado com solo médio, saturou-se o substrato com uma solução contendo 200 ppb do herbicida e deixado em repouso por 24 horas. Os resultados revelaram diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de quadrado médio (QMe), coeficiente de variação (CV), coeficiente de determinação (R^2) e constantes da equação de regressão para concentrações de indaziflam extraído de diferentes quantidades de carvão ativado em mistura com solo

FV	GL	SQ	QM	F	P
Carvão ativado	7	250,191	74,313	27,038	0,000
Erro	32	87,95	2,748		
Total	39	608,141			
CV (%)	55,22				
Parâmetros					
A	12,0194				
B	0,6951				
x0	0,0543				
R^2	0,9705				

Na Figura 5, apresentam-se os resultados encontrados das diferentes concentrações de indaziflam extraídas de solo médio em mistura com diferentes quantidades de carvão ativado.

Figura 5 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de solo com diferentes quantidades de carvão ativado



A análise da curva dose-resposta revelou que as quantidades de 5% e 10% em massa (m/m) de carvão ativado, adicionadas ao solo médio, têm a capacidade de reduzir, significativamente, a disponibilidade do indaziflam em solução nas condições do estudo. Além disso, conforme indicado pelo modelo estabelecido, quantidades inferiores a 1,0% (0,3125% m/m) de carvão ativado por solo médio foram suficientes para alcançar níveis de redução semelhantes aos obtidos com as maiores quantidades testadas.

Isso sugere que proporções relativamente baixas de carvão ativado têm um impacto significativo para a retenção do indaziflam no solo médio, indicando a eficácia desse material como sorvente.

A quantidade de 0,15625% m/m de carvão ativado apresentou uma média de $4,8 \text{ ng g}^{-1}$ do substrato, e uma retenção de 60% em relação ao solo sem adição de carvão. Já as quantidades de 0,3125%, 0,625% e 1,25% m/m resultaram em, apenas, 1,5 ng de indaziflam por grama do substrato na extração, o que representa, apenas, 13% da quantidade encontrada sem a adição de carvão. Esses resultados revelam a

eficácia do carvão ativado mesmo em doses relativamente baixas em reduzir, significativamente, a disponibilidade do herbicida no solo.

Para as quantidades de 2,5%, 5% e 10% da relação da massa do carvão ativado com a massa de solo, as quantidades do ingrediente ativo disponível foram de 1,2; 1,0 e 0,6 ng g⁻¹ substrato, respectivamente. Esses valores representam reduções de 10%, 8% e 5%, respectivamente, em relação à quantidade encontrada no solo sem a adição de carvão.

A redução da disponibilidade do indaziflam, após o uso do carvão ativado em diferentes doses na mistura com solo, é evidente. No entanto, para uma implementação prática dessa estratégia, é necessário compreender as outras marcas de carvão desempenhariam função semelhante. Além disso, testes biológicos adicionais são necessários para validar se, em relação às faixas de retenção, haveria ganhos em seletividade em sementes de espécies bioindicadoras, proporcionando uma abordagem mais abrangente na avaliação do potencial impacto ambiental.

1.4.3 Experimento 3 – Diferentes marcas comerciais de carvão ativado e suas capacidades de retenção ao indaziflam quando em mistura com solo

Ao analisar a concentração de indaziflam disponível nas soluções extraídas de solo médio com diferentes quantidades de carvão ativado, é possível notar diferenças significativas entre os tratamentos, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de variância das concentrações de indaziflam (ng g⁻¹ de substrato) extraído de solo em mistura com diferentes fontes de carvão ativado

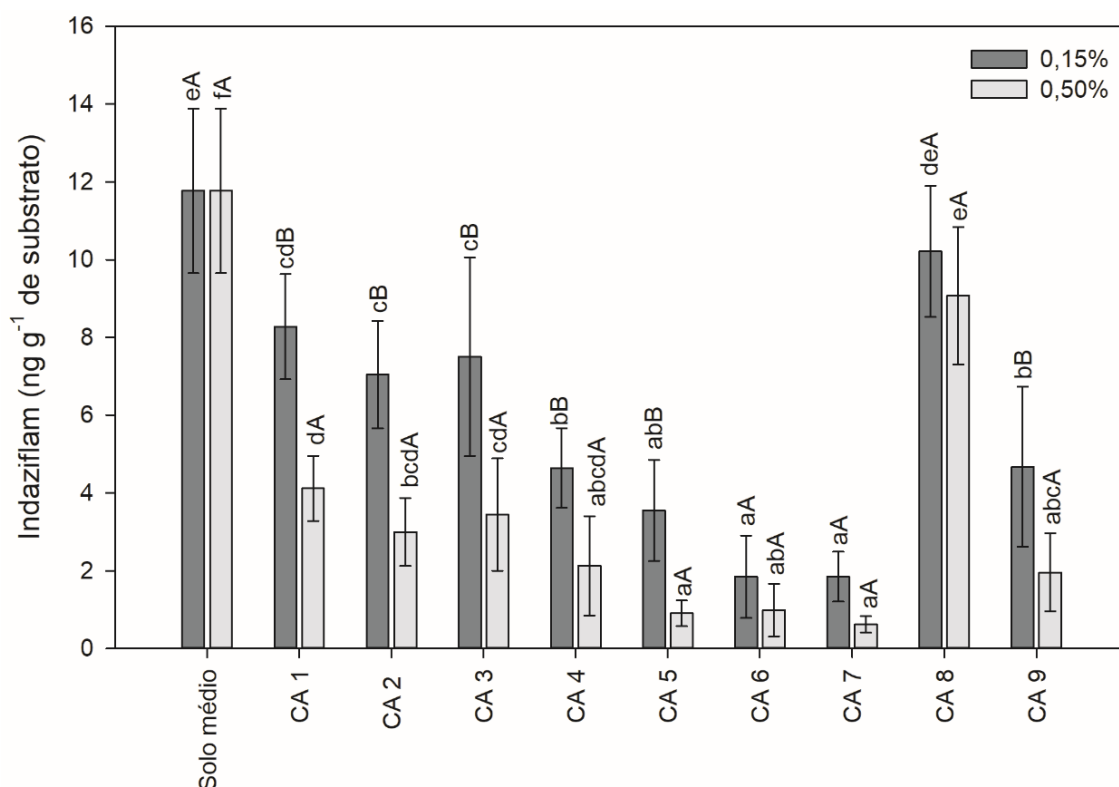
Fontes de variação	GL	SQ	QM	F	P
Fontes	9	1092,557	121,3952	46,042	0,000
Carvão ativado	1	136,456	135,456	51,754	0,000
Fontes versus CA	9	49,487	5,499	2,085	0,040
Erro	80	210,931	2,6366		
Total	99	1489,43			
CV (%)	32,68				

Para o entendimento entre quais os efeitos causados na sorção do indaziflam por diversas marcas de carvão, realizaram-se duas análises, nas mesmas metodologias utilizadas anteriormente. Dessa forma, testaram-se diferentes

forneecedores e quantidades de carvão, de 0,15 e 0,5% da massa na relação com a massa do solo médio. Definiram-se essas duas quantidades com base no estudo anterior, o qual apontou 0,3% m/m como a quantidade limite. Não se observou nenhuma diferença estatística adicional em relação ao aumento da quantidade de carvão ativado na mistura com o solo para as condições do estudo. Nesse sentido, a fim de encontrar diferenças significativas, elencaram-se as doses acima e abaixo desse valor.

Na Figura 6, apresenta-se a diferença entre as diversas marcas e quantidades de carvão ativado na mistura com o solo médio, além da diferença na retenção devido à granulometria no carvão ativado da marca Sigma.

Figura 6 – Concentrações de indaziflam (ng g^{-1} de substrato) extraído de solo em mistura com diferentes fontes de carvão ativado



Médias seguidas da mesma letra (maiúscula entre as quantidades de carvão em cada substrato e minúscula entre os substratos nas diferentes doses de carvão ativado) não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$). CA 1: Auros; CA 2: JCR Pelegrini; CA 3: Quimidrol; CA 4: Zona Cerealista; CA 5: Elegância Orgânica; CA 6: Synth; CA 7: Sigma 100 mesh; CA 8: Sigma 8-20 mesh; CA 9: Sigma 8-20 mesh (triturado).

Estabeleceu-se, com base no solo médio utilizado no estudo, a menor retenção de indaziflam, e esta serviu como controle para as duas quantidades de carvão testadas na mistura. Contudo, a adição do carvão ativado Sigma na granulometria de

8-20 mesh (CA 8) não apresentou diferenças estatísticas nas duas quantidades em relação ao solo puro. Com isso posto, a granulometria desse produto foi um fator relevante. Diante dos resultados obtidos, não seria recomendável utilizar essas quantidades de carvão como retentor do indaziflam, conforme os objetivos propostos.

Quando se triturou a mesma fonte de carvão anterior em liquidificador convencional (CA 9), houve redução de sua granulometria, bem como diferenças significativas em relação a outras granulometrias e marcas após o produto ser triturado em liquidificador convencional. As quantidades de indaziflam encontradas na granulometria de mesh 8-20 e a quantidade de 0,15% de carvão na relação de massa do carvão ativado testado com a massa de solo seco (CA 8) foram próximas às de controle, representando 87% do valor encontrado no solo puro. Para as condições estudadas, isso demonstra que essa granulometria não proporcionou retenção em níveis significativos de indaziflam. Entretanto, ao submeter esse mesmo carvão à trituração, observou-se 60% menos indaziflam na solução extraída em relação ao carvão não triturado.

Utilizada a granulometria de 100 mesh (CA 7), a capacidade de retenção foi ainda superior, 16 e 5% nas quantidades de 0,15 e 0,5% m/m da quantidade total do herbicida encontrada com solo puro, respectivamente. Para esse tratamento (CA 7), não houve diferença significativa em relação às duas quantidades de carvão utilizadas. Assim, observaram-se ganhos em sorção conforme redução do tamanho das partículas e consequentemente aumento da área superficial. Além disso, na especificação de 100 mesh de suas partículas, houve grande capacidade sortiva nas duas quantidades de carvão estudadas.

É possível observar diferenças em uma mesma marca, quando utilizadas granulometrias diferentes. Quanto maior a granulometria, menor a superfície de contato. Com isso, a granulometria é inversamente proporcional à capacidade sortiva conforme descrito por (BANSAL; GOYAL, 2005). Entretanto, segundo os autores, as diferentes características podem estar também associadas à temperatura, pressão e tempo de exposição do adsorbato com o adsorvente, além da distribuição de suas cargas.

Os carvões ativados das marcas Zona Cerealista (CA 4), Elegância Orgânica (CA 5), Synth (CA 6), Sigma (100 mesh) (CA 7), Sigma (8-20 mesh – triturado) (CA 9) apresentaram semelhança na análise estatística realizada para as quantidades de 0,5% m/m de carvão pelo solo médio. Por outro lado, a marca Elegância Orgânica

apresentou uma tendência a se diferenciar na quantidade de 0,15% m/m; enquanto a Zona Cerealista (CA 4) se diferenciou, tendo, assim, menor capacidade sortiva que os outros tratamentos citados.

A respeito das mesmas marcas Synth e Sigma (100 mesh), porém em diferentes quantidades de carvão ativado, não houve diferença, e estas tiveram as menores quantidades de indaziflam disponíveis na solução. Enquanto os tratamentos com as marcas Auros (CA 1), JCR Pelegrini (CA 2), Quimidrol (CA 3), Zona Cerealista (CA 4) e Elegância Orgânica (CA 5) apresentaram diferença. E, caso o interesse seja nas condições com menor quantidade de indaziflam disponível na solução, a recomendação deveria ser direcionada para as quantidades maiores de carvões ativados, estudadas para essas marcas.

De forma geral, evidenciou-se que a marca e a granulometria do carvão ativado podem influenciar a retenção do indaziflam disponível na solução. Sendo assim, a escolha da fonte e quantidade de carvão ativado a ser utilizado dependerá da disponibilidade do material e necessidades à que seriam buscados.

Os resultados dos estudos em laboratório são consistentes ao indicar que, entre os materiais analisados, o carvão ativado se destaca pela sua significativa capacidade de retenção do herbicida indaziflam em comparação com o solo de textura média estudado. Esse destaque ressalta a viabilidade do uso do carvão ativado como agente de redução da quantidade disponível de indaziflam em solução.

É importante ressaltar que as diferenças observadas na capacidade de retenção entre os materiais reforçam a necessidade de compreender, mais profundamente, as características e o preparo de cada material. Além disso, a influência do tamanho das partículas desses materiais nos resultados sugere a importância de considerar esse fator em estudos futuros para uma compreensão mais abrangente. A constatação de que o carvão ativado mantém sua eficácia, mesmo em baixas quantidades, é relevante, sugerindo que pode ser um método eficiente mesmo em condições em que a presença desse herbicida é reduzida.

No entanto, a ressalva sobre as diferenças significativas na capacidade sorvente entre diferentes marcas de carvão destaca a importância de escolher, cuidadosamente, a marca comercial, considerando sua procedência e potencial de sorção, em relação custo-benefício com os outros materiais.

Em resumo, os estudos evidenciam o potencial do carvão ativado para a redução do indaziflam em solução, mas alertam para a necessidade de se considerar

diferentes variáveis, como características dos materiais e diferenças entre marcas comerciais, a fim de otimizar a eficácia desse método em aplicações práticas. Variações na capacidade de adsorção entre os materiais enfatizam a importância de compreender suas características e preparação, incluindo o tamanho das partículas, para estudos futuros. Estudos adicionais podem aprofundar o entendimento desses fatores e contribuir para o desenvolvimento de abordagens mais precisas e eficientes no uso de carvão ativado para a remoção de indaziflam. Apesar da eficácia do carvão ativado mesmo em quantidades reduzidas, é crucial escolher, cuidadosamente, entre diferentes marcas comerciais, considerando sua origem e potencial de adsorção.

1.5 CONCLUSÕES

Estudos em laboratório destacaram o carvão ativado por sua alta capacidade de retenção do herbicida indaziflam, sendo superior quando comparado com os outros materiais estudados, sugerindo que a capacidade de adsorção do carvão ativado tenha propiciado esse efeito. O carvão ativado mostrou-se viável para reduzir a quantidade de indaziflam em solução, ressaltando seu potencial como agente de mitigação de seus efeitos herbicidas quando indesejados.

REFERÊNCIAS

- AHMED, M. B.; JOHIR, M. A.; ZHOU, J. L.; NGO, H. H.; NGHIEM, L. D.; RICHARDSON, C.; BRYANT, M. R. Activated carbon preparation from biomass feedstock: clean production and carbon dioxide adsorption. **Journal of Cleaner Production**, v. 225, p. 405-413, 2019.
- ALONSO, D.G.; KOSKINEN, W.C.; OLIVEIRA JR., R.S.; CONSTANTIN, J.; MISLANKAR, S. 2011. Sorption-desorption of indaziflam in selected agricultural soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. 59(24):13096-13101.
- ANDIA, J. P. M. **Remoção de Boro de Águas e Efluentes de Petróleo por Adsorção**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- BANSAL, R. C.; GOYAL, M. Activated carbon adsorption. U.S., Taylor & Francis Group LLC. **CRC press**, 2005.
- BARCELLOS JÚNIOR, L. H.; PEREIRA, G. A. M.; DA CONCEIÇÃO DE MATOS, C.; SOUZA, P. S. R.; AGAZZI, L. R.; DA SILVA, E. M. G.; DA SILVA, A. A. Influence of Organic Matter in Sorption of the Saflufenacil in Ferralsols. **Bulletin Environmental Contamination and Toxicology**, v. 107, n. 2, p. 263-268, 2021.
- CÂNDIDO, N. R. **Produção e Caracterização de Carvões de Eucaliptos Ativados Fisicamente com CO₂ ou Gás da Carbonização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- DANISH, M.; AHMAD, T. A review on utilization of wood biomass as a sustainable precursor for activated carbon production and application. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 87, p. 1-21, 2018.
- GBLER, L.; SPADOTTO, C. A. Comportamento ambiental dos herbicidas, *In*: VARGAS, L.; ROMAN, E. S. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2004, 59 p.
- NUNES, A. L.; VIDAL, R. A. Seleção de plantas quantificadoras de herbicidas residuais. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 19-28, 2009.
- MOUSSOUT, H.; AHLAFI, H.; AAZZA, M.; MAGHAT, H. Critical of linear and nonlinear equations of pseudo-first order and pseudo-second order kinetic models. **Karbala International Journal of Modern Science**, v. 4, p. 244-254, 2018.
- PITELLI, R. A. Competição entre plantas daninhas e plantas cultivadas, *In*: MONQUIERO, P. A. (Org.). **Aspectos da biologia e manejo das plantas daninhas**, São Carlos: ed. RIMA. p. 61-71, 2014.
- QUEIROGA, C. L. Analisadores de massa: QTRAP. *In*: **Espectrometria de massas: princípios e aplicações**. 2009. Disponível em: Acesso em: 23 jan. 2023.

ROMERO RAMÍREZ, A. C. **Dinâmica do indaziflam em solos condicionados com biocarvão**. 2018. Tese (Doutorado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SENA, M. M. **Adsorção individual, competitiva e estudos cinéticos e termodinâmicos de cobre, chumbo e níquel em solos de uma topossequência do Cerrado**. 2018. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SILVA, J. S.; BARROS, R. S.; CRUZ, L. O.; CRUZ, L. O.; ANI, F. N.; SALGADO, M. F. Produção de carvão ativado da casca do babaçu e sua eficiência no tratamento de água para o consumo humano. *In*: R. J. Olivera. **Engenharia florestal: desafios, limites e potencialidade**, Editora Científica Digital, p. 654-685, 2020.

SOUZA, W. M. **Influência dos atributos do solo na sorção e lixiviação do indaziflam em solos tropicais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

SPADOTTO, C. A. **Comportamento e Destino Ambiental de Herbicidas**. Comitê de Meio Ambiente, Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Research**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

TEIXEIRA, M. F. F. **Sorção, dessorção e lixiviação do indaziflam em solos com atributos distintos e adição de esterco bovino**. 2019. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

TEODORO, L.; PARABOCZ, C. R. B.; ROCHA, R. D. C. Caracterização da argila vermiculita expandida: avaliação dos padrões físico-químicos e mineralógicos para aplicação como adsorvente. **Revista Matéria**, v. 25, n. 4, 2020.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A.; OLIVIER, J.; RODRIGUEZ-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

TOMPKINS, J. **Pesticide Fact Sheet: Indaziflam**, Environmental Protection Agency, United States, 2010. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1015IER.txt>. Acesso em: 5 ago. 2023.

VIANA, M. M. **Obtenção e utilização de produtos de pirólise do lodo de esgoto para adsorção de poluentes em meio aquoso**, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO CARVÃO ATIVADO PARA SORÇÃO DO INDAZIFLAM COM BIOINDICADORES VEGETAIS

2.1 INTRODUÇÃO

Os vastos biomas brasileiros como a Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado, abrangem mais de 4,5 milhões de km² de território, desempenhando funções ecológicas cruciais, como conservação da biodiversidade e regulação climática. No entanto, essas áreas enfrentam constantes desafios devido à antropização, incluindo a invasão de espécies exóticas, que prejudicam o desenvolvimento florestal. A restauração florestal ativa, muitas vezes, é essencial envolvendo intervenções desde o plantio até o fechamento da copa, com foco no controle de espécies invasoras que competem pelos mesmos recursos do meio. O controle de plantas daninhas na restauração florestal é crucial, mas pode representar até 60% dos custos com métodos que abrangem desde capinas ao uso de herbicidas. O capim-braquiária, uma gramínea exótica, desafia a restauração da Mata Atlântica, destacando a necessidade de estratégias eficazes para seu controle com uso de herbicidas pós e pré-emergentes, como o indaziflam, que pode reduzir custos e a frequência de intervenções. Contudo, tendo a seletividade como um desafio para seu emprego frequente. A Década da ONU para a restauração de ecossistemas destaca a importância de aprimorar métodos de controle de plantas competidoras. Custos operacionais e parcerias são cruciais para a viabilidade de projetos nesse âmbito. Espécies como *Canavalia ensiformis* e *Cajanus cajan* podem ser incorporadas para reduzir a incidência dessas plantas, além de promover a fertilidade do solo. Na restauração florestal, as espécies florestais utilizadas podem ser classificadas como de recobrimento, as quais possuem características que podem acelerar o processo de sombreamento, enquanto espécies de diversidade garantem a recomposição gradual trazendo maior diversificação das espécies. Esses experimentos com carvão ativado visam compreender seu poder de mitigar de potenciais efeitos indesejados do indaziflam em bioindicadores, tendo como hipótese que o carvão ativado pode proteger a germinação e o estabelecimento inicial da gramínea *Urochloa decumbens* dos efeitos herbicidas do indaziflam e de espécies utilizadas na restauração florestal

dos efeitos herbicidas do indaziflam. A validação dessas hipóteses fortaleceria a base científica para a utilização dessa abordagem na restauração florestal.

2.2 REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil possui ampla aptidão florestal com diversos biomas representativos, como a Floresta Amazônica e Mata Atlântica, além de suas transições com o Cerrado, que ocupam mais de 4,5 milhões de km² de todo o território nacional quando somadas as áreas naturais desses três biomas (PIMENTA *et al.*, 2020). Suas funções ecológicas são diversas, como a conservação da biodiversidade, regulação climática, proteção dos recursos hídricos, combate à desertificação, além dos inúmeros benefícios à sociedade, em que se destacam o fomento econômico e geração de empregos, resiliência a desastres naturais, manutenção da cultura e conhecimento tradicional. Pode ser também uma oportunidade para a geração de créditos de carbono (ISERNHAGEN *et al.*, 2009).

Contudo, os remanescentes florestais são desafiados continuamente por distúrbios causados pela antropização, como a invasão de espécies vegetais exóticas, que causam desbalanço e fragilidade ao desenvolvimento e continuidade destas florestas (FLORIDO, 2015) e do Cerrado (PIVELLO, 2011). Tais espécies podem competir com as nativas pelos recursos essenciais e limitados, sejam eles naturais ou não. Os projetos de restauração florestal dessas regiões também correm riscos de nunca alcançar os objetivos inicialmente desejados, como a geração de créditos de carbono, proteção do solo, água e conservação da biodiversidade, devido a esses fatores externos (CHAZDON; BRANCALION, 2019).

Considerando esses aspectos e pensando sob a ótica da restauração florestal, intervenções são necessárias durante todo o período inicial até o fechamento da copa de plantio, quando o sombreamento causado pelas espécies de interesse desfavorece o crescimento das espécies invasoras (BRANCALION *et al.*, 2019), de forma bastante semelhante ao controle cultural como acontece na agricultura e silvicultura (SILVA *et al.*, 2009; BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011). No planejamento e execução desses projetos, o controle de espécies exóticas, especialmente de espécies invasoras, é uma etapa operacional de grande importância (D'ANTONIO *et al.*, 2016).

Há diversas formas para o controle das plantas daninhas, desde métodos de menor eficiência operacional como capina e roçada, até o uso de herbicidas, que

garantem maior eficiência em suas operações. A abordagem para lidar com a matocompetição na restauração florestal pode variar de acordo com o contexto específico do projeto, o local e as espécies envolvidas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2018). Portanto, é importante considerar as características do ecossistema, as interações entre as plantas e as práticas de manejo sustentáveis para alcançar os melhores resultados em relação à redução da matocompetição e ao estabelecimento das espécies desejadas.

Os custos no controle de plantas daninhas variarão conforme os métodos e quantidade das intervenções, mas podem representar até 60% dos gastos com a restauração florestal, quando tiverem roçadas e coroamentos como atividades (LELES *et al.*, 2015). Considerando-se, também, o fato de que muitos projetos consistem em vários pequenos polígonos distribuídos em locais de difícil acesso, os custos logísticos constituem outro fator para a dificuldade da manutenção. O método químico, por meio do uso de herbicidas, tem crescido em áreas florestais (PEREIRA *et al.*, 2015), por apresentar as vantagens de redução das populações das espécies infestantes, o que propicia menor período de convivência e maior oferta de recursos para as espécies florestais (MACHADO *et al.*, 2012).

Há diversos métodos para a restauração florestal, que variam de acordo com as condições locais e os objetivos específicos de restauração. São exemplos de restauração ativa: o plantio de mudas ou sementes, a semeadura direta ou muvuca de espécies florestais, sendo uma opção mais econômica e potencial (RESENDE; LELES, 2017). Há outras formas, como a regeneração natural assistida, que consiste em auxiliar o processo de regeneração natural, removendo espécies invasoras, protegendo as mudas naturais e promovendo o crescimento das espécies desejadas. Cercamento e proteção de áreas também podem ser empregados para proteger áreas de floresta existente contra atividades degradantes, como pastoreio excessivo ou exploração madeireira não sustentável. Em alguns desses casos, a reintrodução de espécies ameaçadas ou extintas localmente pode ser parte do processo de restauração (BRANCALION *et al.*, 2015).

Geralmente, utiliza-se a combinação de abordagens para alcançar os melhores resultados. Além disso, a restauração florestal muitas vezes requer planejamento em longo prazo e monitoramento contínuo para a garantia de sua eficácia. Um dos fatores mais desafiadores é a matocompetição e seu manejo, que afetam diretamente o

sucesso da restauração, principalmente pelas espécies gramíneas exóticas como as braquiárias.

O capim-braquiária (*Urochloa decumbens*) é originário da África e foi amplamente disseminado no Brasil como planta forrageira de pastagens. De acordo com Santos *et al.* (2018), é uma das gramíneas que mais desafiam a formação dos povoamentos florestais de reflorestamento, pois costumam ser inseridas em pastagens abandonadas (RESENDE; LELES, 2017). Possui alta capacidade de se disseminar e se desenvolver em condições adversas, tendo raízes profundas, que garantem maior resiliência, além de produzirem compostos alelopáticos. Consequentemente, o ganho de escala na restauração da Mata Atlântica depende da capacidade de controlar essas espécies gramíneas e favorecer a regeneração natural, o plantio de mudas ou a semeadura de espécies florestais (BRANCALION *et al.*, 2015).

Os herbicidas possuem potencial de serem utilizados na restauração florestal desde que se adequem para cada projeto. Contudo, apesar de seus efeitos fitotóxicos serem fundamentais ao controle das plantas daninhas, são arriscados para as plantas de interesse. O glifosato tem sido utilizado com frequência nesse contexto, segundo Florido *et al.* (2021), mas, por ser um herbicida pós-emergente e sem efeito residual, ocorre rápida recolonização da braquiária a partir do banco de sementes. Portanto, é necessário desenvolver metodologias que aumentem a eficiência e diminuam a frequência de intervenções para o controle das plantas daninhas (RESENDE; LELES, 2017).

O uso de herbicidas pré-emergentes, como o indaziflam, é uma alternativa para o controle de gramíneas, pois, além do potencial de controle, apresenta persistência para reduzir a necessidade contínua de intervenções. Assim, poderá reduzir custos operacionais e logísticos da restauração florestal. O amplo espectro de ação e persistência, além de baixa a moderada capacidade de lixiviação, são características desse ingrediente ativo, que tem como mecanismo de ação a inibição da biossíntese de celulose, que desencadeia a incapacidade na formação da parede celular e, consequentemente, o desenvolvimento de tecidos (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018).

Apesar de suas vantagens como herbicida, seu uso é limitado, pois é seletivo somente para algumas espécies florestais. Tecnologias de proteção das plantas aos herbicidas representam uma solução potencial por meio de uso de tratamentos de sementes ou dos locais de semeadura, entre as quais merece destaque o uso do

carvão ativado para a proteção da germinação das espécies desejáveis e o controle das plantas daninhas simultaneamente. Dessa forma, o herbicida seria retido e não estaria disponível para absorção pelas raízes das plantas desejáveis. Realizaram-se estudos avaliando a efetividade da proteção contra os efeitos de herbicidas com carvão ativado, em bandas de aplicação ou tratamento de sementes, ao longo das últimas décadas (CLENET *et al.*, 2019; TERRY *et al.*, 2021b; DAVIES *et al.*, 2023). Entretanto, os resultados têm sido variáveis devido às diferentes formas de utilização, disponibilidade hídrica e espécies vegetais.

A Assembleia Geral das Nações Unidas proclamou, em 2019, a dita Década da ONU para a restauração de ecossistemas, seguindo uma proposta de ação de mais de 70 países de todas as latitudes, com o objetivo de deter a degradação dos ecossistemas e restaurá-los. O período designado pela ONU iniciou em 2021, baseado na identificação de cientistas como um período crítico e decisivo para evitar alterações climáticas devastadoras (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2019). Portanto, é necessário aprimorar as metodologias atuais de controle de plantas competitivas, além de propor estratégias com baixo impacto ambiental, redução dos custos operacionais e ganhos na escalabilidade.

Além disso, a consideração dos custos operacionais e a busca por ganhos na escalabilidade constituem aspectos práticos e realistas para a implementação de estratégias de controle. A eficácia dessas estratégias também pode ser potencializada por meio de parcerias internacionais, troca de conhecimento e adoção de melhores práticas globalmente. A abordagem integrada para combater a degradação dos ecossistemas, cumprir os com os acordos e lidar com as mudanças climáticas exige uma combinação de esforços em várias frentes. A incorporação de técnicas e produtos da agricultura e silvicultura em estratégias de controle de plantas competitivas pode desempenhar um papel significativo para a consecução desses objetivos, proporcionando benefícios ambientais, econômicos e sociais.

Métodos de restauração que envolvem a semeadura direta são mais desafiados pelas plantas invasoras, já que necessitam de condições microambientais favoráveis às fases da germinação das sementes em campo, e posterior desenvolvimento saudável das plântulas. Souza (2023) relata a necessidade de compreensão de quais espécies florestais são adaptadas ao uso dos sistemas de semeadura direta, além de identificar os principais fatores que afetam a germinação, estabelecimento e crescimento.

Canavalia ensiformis e *Cajanus cajan* são espécies comumente utilizadas como adubo verde ou cobertura vegetal (MARA LEÃO *et al.*, 2022). Em outros termos, são plantas cultivadas para a criação de um microclima favorável para outras espécies agrícolas ou florestais. Com isso, reduzem a incidência de luz solar, que seria mais favorável para as plantas daninhas (CORREA *et al.*, 2014), além de propiciarem maior fertilidade ao solo, como no aporte de nitrogênio proveniente da relação das plantas leguminosas com rizobactérias (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Assim, incorporaram-se essas espécies ao manejo da restauração florestal para agregar e favorecer o processo de sucessão ecológica (BELTRAME; RODRIGUES, 2008; MAIA *et al.*, 2013), já que cumprem esse objetivo inicial e depois deixam o sistema.

Entre as espécies florestais utilizadas para a restauração florestal ativa, também há classificações fundamentais para a definição e escolha das espécies conforme seu hábito e velocidade de crescimento. Podem ser classificadas como pioneiras, secundárias (iniciais e tardias) e climácicas (ISERNHAGEN *et al.*, 2009). Contudo, podem ser combinadas com formas mais simplificadas, definidas como espécies de recobrimento e diversidade (DAVIS *et al.*, 2012). Ambas possuem amplo interesse nas definições de escolha para a semeadura ou transplântio de mudas.

As espécies florestais de recobrimento, como o próprio nome sugere, têm como objetivo recobrir a área de forma rápida, devido à sua taxa de crescimento acelerada e à extensa cobertura de copa. Assim, devem acelerar o processo de sombreamento, evitando as plantas daninhas e favorecendo as arbóreas que possuem crescimento mais lento e não possuem tanta afinidade com a luz solar direta (DA SILVA *et al.*, 2022). O recobrimento do solo, de forma antecipada, faz-se também interessante para reduzir riscos da criação de processos erosivos, principalmente em áreas já degradadas e com baixa resiliência. Podem ser representadas por espécies pioneiras ou secundárias, principalmente as secundárias iniciais. As espécies *Croton floribundus* (capixingui), *Guazuma ulmifolia* (mutamba) e *Senna multijuga* (pau-cigarra) se enquadram nessas classificações (LORENZI, 2016).

Na restauração florestal selecionaram-se espécies específicas para aumentar a diversidade, e estas normalmente possuem crescimento mais lento e menor cobertura de copa em comparação às espécies de recobrimento (BRANCALION *et al.*, 2015). Na sucessão ecológica, elas são fundamentais para garantir a recomposição da área, uma vez que, gradualmente, substituem as espécies de preenchimento definitivamente. Esse grupo inclui, principalmente, as espécies

secundárias tardias e as climáticas, *Handroanthus impetiginosus* (ipê-roxo), *Peltophorum dubium* (canafístula), *Platypodium elegans* (jacarandá-do-campo) e *Handroanthus vellosi* (ipê-amarelo) (LORENZI, 2016).

Com base nessas informações, desenvolveram-se experimentos em casa-de-vegetação, sob condições controladas, com o objetivo de avaliar os efeitos do carvão ativado e potenciais efeitos para a redução da fitotoxicidade do indaziflam, em bioindicadores. Em um primeiro momento, conduziu-se o estudo com dois ensaios com a gramínea *U. decumbens* (capim-braquiária) devido à sua alta sensibilidade ao ingrediente ativo, e, posteriormente, outros dois ensaios com espécies representativas da restauração florestal da Mata Atlântica, como *C. ensiformis* (feijão-de-porco), *C. cajan* (feijão guandu), *C. floribundus* (capixingui), *G. ulmifolia* (mutamba), *S. multijuga* (pau-cigarra), *H. impetiginosus* (ipê-roxo), *P. dubium* (canafístula), *P. elegans* (jacarandá-do-campo) e *H. vellosi* (ipê-amarelo-liso).

Algumas hipóteses sugerem que o carvão ativado pode proteger a germinação e o desenvolvimento inicial do capim-braquiária, podendo desempenhar papel crucial para a mitigação do efeito herbicida do indaziflam. Além disso, a extensão da hipótese para espécies de adubação verde e arbóreas, utilizadas na restauração florestal, é relevante, pois amplia o escopo de aplicação do indaziflam. Isso teria implicações significativas para projetos de restauração florestal. A confirmação dessa hipótese em experimentos adicionais fortaleceria a base científica para a utilização do carvão ativado como uma ferramenta eficaz para a redução dos efeitos negativos de herbicidas em diferentes tipos de plantas de interesse, contribuindo para estratégias mais sustentáveis de manejo de ecossistemas.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

Realizaram-se dois experimentos distintos em casa-de-vegetação, na Estação Experimental da Bayer, em Paulínia-SP (22° 45' 2,247" S e 47° 7' 9,589" W), em duplicata, em diferentes épocas do ano. Realizou-se o primeiro utilizando a gramínea *Urochloa decumbens* como a espécie bioindicadora sugerida por Dias *et al.* (2019). A primeira repetição se iniciou em 15 de maio de 2022, e a segunda em 18 de novembro de 2022, com duração de 60 dias. O segundo experimento em duplicata, realizado com 9 diferentes espécies, sendo duas utilizadas como adubos verdes e outras sete florestais. Utilizam-se todas as espécies testadas para restauração florestal da Mata

Atlântica. Iniciou-se um estudo em 18 de novembro de 2022 e outro em 12 de abril de 2023, ambos com duração de 47 dias.

Conduziu-se o primeiro experimento em delineamento inteiramente casualizado com 5 repetições em esquema fatorial 4 x 2, sendo o primeiro fator as doses de indaziflam (0; 37,5; 75 e 150 g i.a. ha⁻¹) e o segundo fator as diferentes concentrações de carvão ativado (0 e 0,6% m/m). Realizou-se o experimento utilizando-se 3 diferentes substratos: areia pura peneirada (50% areia fina e 50% areia grossa), solo arenoso e solo argiloso (Apêndice C). Nesse caso, estabeleceram-se 8 tratamentos, cada um com 5 repetições, totalizando 40 unidades experimentais por tipo de substrato. Com 3 tipos de substrato, isso resultou em um total de 120 copos (unidades experimentais) por ensaio. Considerando a realização de dois ensaios em duplicata, totalizaram-se 240 copos.

Os tratamentos consistiram na combinação de solo misturado com sementes, variando entre a presença ou ausência de carvão ativado, juntamente à aplicação ou não de indaziflam em diferentes doses. Esses tratamentos são idênticos para os três diferentes tipos de solo.

Tabela 1 – Tratamentos testados com a adição ou não do carvão ativado, e curva dose-resposta do herbicida pré-emergente indaziflam

Tratamento	Descrição	Carvão ativado ¹	Indaziflam ^{2, 3}
1	- carvão ativado - herbicida	0% m/m	0 g i.a. ha ⁻¹
2	+ carvão ativado - herbicida	0,6% m/m	0 g i.a. ha ⁻¹
3	- carvão ativado + herbicida	0% m/m	37,5 g i.a. ha ⁻¹
4	+ carvão ativado + herbicida	0,6% m/m	37,5 g i.a. ha ⁻¹
5	- carvão ativado + herbicida	0% m/m	75 g i.a. ha ⁻¹
6	+ carvão ativado + herbicida	0,6% m/m	75 g i.a. ha ⁻¹
7	- carvão ativado + herbicida	0% m/m	150 g i.a. ha ⁻¹
8	+ carvão ativado + herbicida	0,6% m/m	150 g i.a. ha ⁻¹

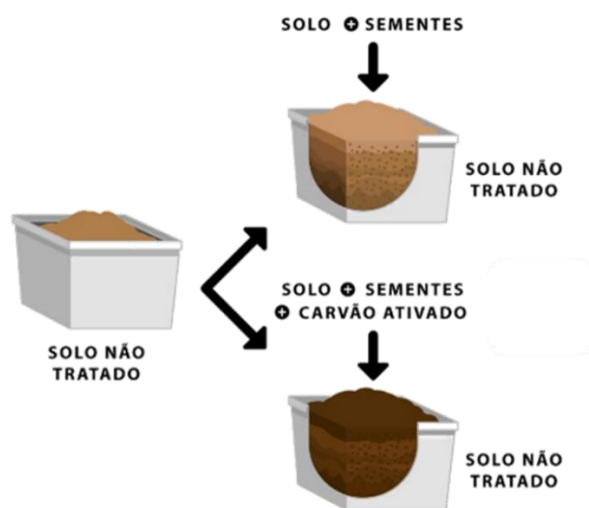
¹carvão ativado da marca comercial Synth; ²Esplanade 500 SC; ³volume de calda correspondente a 200 litros por hectare, (+) presença e (-) ausência.

Acomodaram-se os substratos em copos plásticos transparentes de 700 ml com furos na base para permitir o escoamento da água irrigação, caso excedesse a capacidade de campo do solo. Inicialmente, preencheram-se os copos com cada

substrato seco, totalizando 95% do volume do recipiente. No dia seguinte, misturaram-se 25 sementes de *Urochloa decumbens* com o restante do solo e com carvão ativado, marca Synth, em quantidade suficiente para o preenchimento do volume restante. A quantidade de carvão misturada correspondeu a 0,6% da massa de solo seca referente ao 5% da massa total de solo.

Na Figura 1, representa-se o esquema da instalação do ensaio, o qual provê uma representação visual dos blocos, tratamentos e repetições. Essa visualização detalhada pode abranger a distribuição e organização dos diferentes substratos nos blocos, oferecendo uma representação gráfica nítida da disposição experimental.

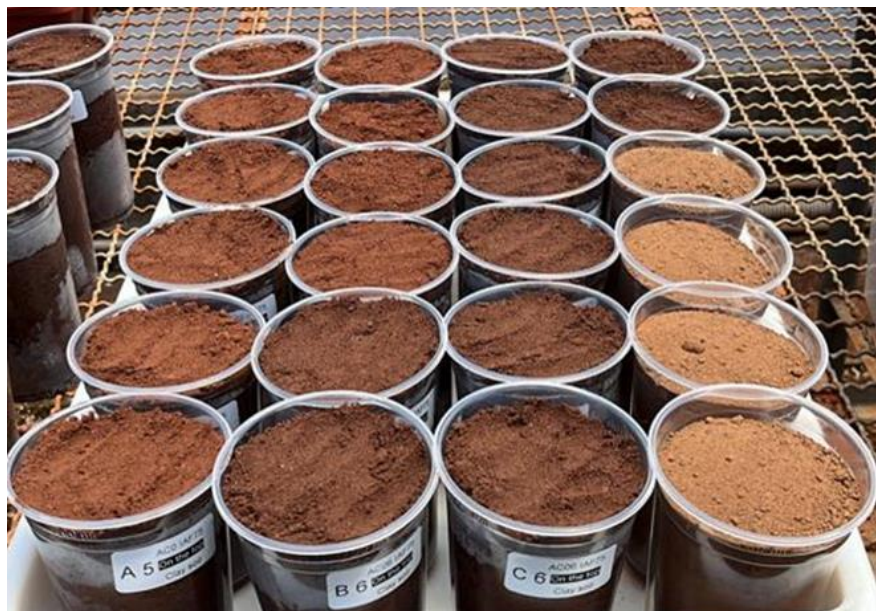
Figura 1 – Esquema representativo do processo de preenchimento dos copos com os substratos e sementes da gramínea *Urochloa decumbens* antes da aplicação do herbicida indaziflam



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

A organização de todos os tratamentos no mesmo dia, com a realização da preparação dos substratos superficiais, semeadura e aplicação do herbicida, foi uma prática fundamental para garantir a consistência das condições experimentais, minimizando variações externas que poderiam afetar os resultados e proporcionando maior solidez na interpretação dos dados. Na Figura 2, mostram-se os copos preenchidos com os substratos e sementes da gramínea *Urochloa decumbens* antes da aplicação do herbicida indaziflam. Certificar-se de que as condições iniciais são semelhantes entre os tratamentos é crucial para a validade e interpretação correta dos resultados, garantindo que as diferenças observadas aos tratamentos aplicados e não a variações nas condições experimentais.

Figura 2 – Copos preenchidos com os substratos e sementes da gramínea *Urochloa decumbens* antes da aplicação do herbicida indaziflam

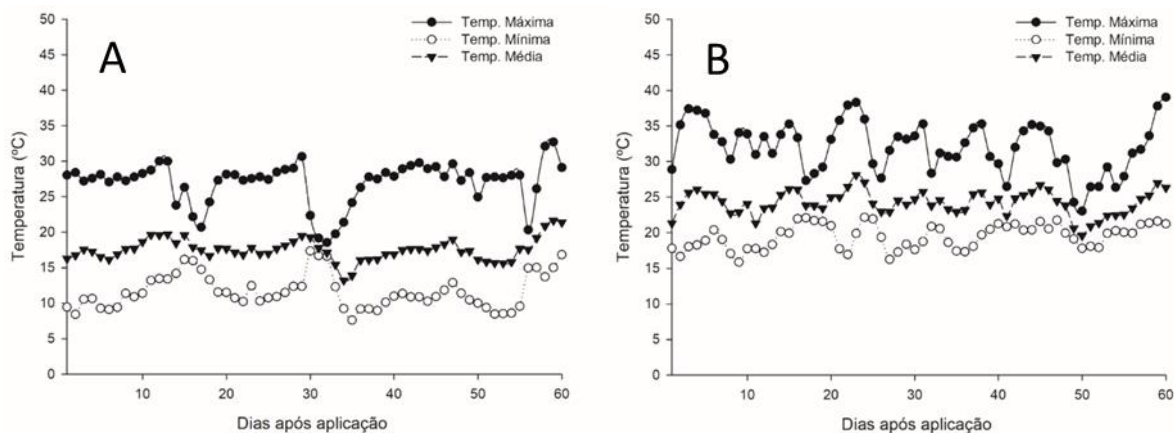


Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Logo após a acomodação dos substratos, simulou-se uma precipitação de 5 mm sobre todos os vasos, seguida da aplicação do indaziflam após 30 minutos. Realizou-se a aplicação em câmara de aplicação controlada e pressurizada com ar comprimido, equipada com uma única ponta do tipo jato plano TP8002EVS, em aço inox, calibrada para volume de água de 200 litros ha⁻¹.

Em cada um dos ensaios, mediu-se a temperatura máxima, média e mínima diária bem como a umidade relativa média diária no interior da casa-de-vegetação, conforme Figura 3. Diariamente, ocorreram 3 irrigações que simulavam por volta de 11 mm de chuva.

Figura 3 – Temperatura máxima, mínima e média, em graus Celsius, no interior da casa-de-vegetação ao longo das repetições 1 (A) e 2 (B)



Aos 60 dias após a aplicação (DAA), as separaram-se as plantas do substrato, lavadas com água e secas manualmente (Figura 4). Logo após, separaram-se as partes aérea e radicular, acondicionando-as, posteriormente, em sacos de papel e levando à estufa com circulação forçada de ar e temperatura média de 40°C. Esses procedimentos foram essenciais para a preservação e o preparo das amostras para análises posteriores. Comumente, utiliza-se a estufa com circulação forçada de ar e temperatura controlada para a secagem rápida e eficiente, mantendo a integridade das amostras.

Figura 4 – Coleta (A) e lavagem (B e C) do material vegetal, separação da parte aérea e radicular para posterior secagem e pesagem da massa seca



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Após atingir massa constante, pesou-se cada amostra em balança analítica. Para as avaliações dos resultados de massa seca, submeteram-se os dados à Análise de Variância (ANOVA) e, quando o efeito foi significativo, compararam-se as médias pelo teste T de Student ($p \leq 0,05$). Elaboraram-se os gráficos, por sua vez, com o auxílio do programa Sigmaplot 12,5 (Systat Software Inc., San Jose, Califórnia, USA).

Conduziu-se o segundo experimento, considerando os ensaios com as nove diferentes espécies de adubação verde e florestais utilizadas para restauração florestal da Mata Atlântica, em delineamento experimental inteiramente casualizado com 5 repetições para cada espécie em esquema fatorial 2 x 2 (doses do indaziflam x concentrações de carvão ativado). Aplicou-se o herbicida indaziflam nas doses de 75 g i.a. ha⁻¹ e utilizaram-se as concentrações de carvão de 0 e 0,6% m/m.

Os tratamentos consistiram em combinações de solo misturado com sementes, incluindo variações com a presença ou ausência de carvão ativado e a aplicação ou não de indaziflam em dose única, correspondendo a 75 gramas do ingrediente ativo por hectare (Tabela 2).

Tabela 2 – Tratamentos com carvão ativado e o herbicida pré-emergente indaziflam em diferentes doses

Tratamento	Descrição	Quantidade de carvão ativado ¹	Dose do Indaziflam ^{2, 3}
1	- carvão ativado-herbicida	0% m/m	0 g i.a. ha ⁻¹
2	+ carvão ativado-herbicida	0,6% m/m	0 g i.a. ha ⁻¹
3	- carvão ativado + herbicida	0% m/m	75 g i.a. ha ⁻¹
4	+ carvão ativado + herbicida	0,6% m/m	75 g i.a. ha ⁻¹

¹carvão ativado da marca comercial Synth; ²produto comercial utilizado Esplanade NA, com concentração 500 g L⁻¹, na formulação SC; ³volume de calda correspondente a 200 litros por hectare, (+) presença e (-) ausência

Nesses experimentos utilizou-se apenas um substrato, correspondente ao solo médio, acondicionado em vasos no estilo jardineira, com capacidade para 3 litros, visando à melhor acomodação das sementes, visto seus tamanhos variados por conta das diferentes espécies. Todos os recipientes possuíam furos na base para permitir o escoamento da água de irrigação caso houvesse excedente.

Encheram-se os vasos com solo seco, totalizando 95% do volume total de cada recipiente. No dia seguinte, contaram-se as sementes e misturadas ao restante do solo e do carvão ativado, novamente sendo utilizada a marca Synth. A quantidade de carvão misturada correspondeu a 0,6% da massa de solo seca, referente aos 5% da

massa total de solo. Dividiu-se cada jardineira entre algumas espécies que apresentavam sementes menores, possibilitando maior eficiência na organização dos tratamentos.

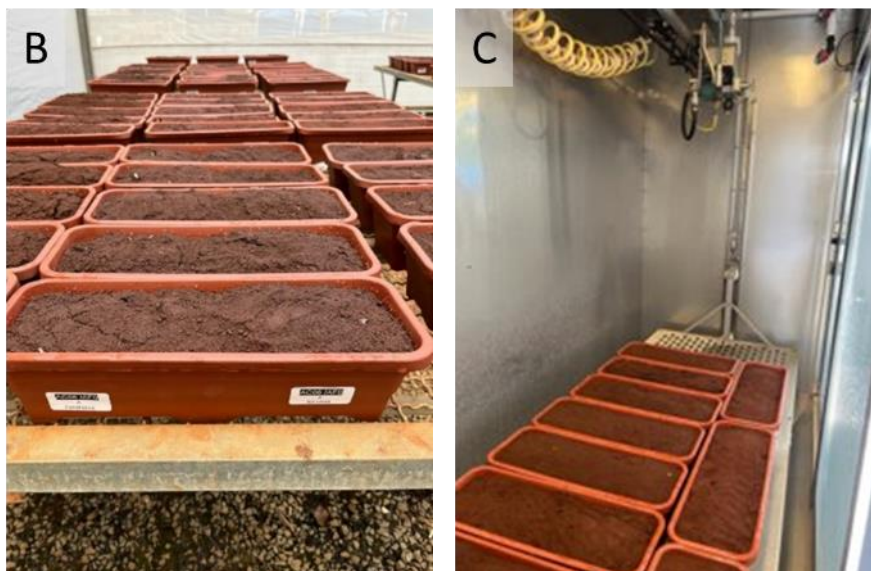
Dividiu-se cada jardineira entre algumas espécies que apresentavam sementes menores, possibilitando maior eficiência na organização dos tratamentos. Cada vaso recebeu uma ou duas espécies, dependendo do tamanho das sementes e plântulas, garantindo que não houvesse sobreposição de indivíduos e evitando prejuízos no desenvolvimento vegetativo.

Logo após a acomodação dos substratos, simulou-se uma precipitação de 5 mm de chuva sobre todos os vasos, e, após 30 minutos, ocorreu a aplicação do herbicida, realizada em câmara de aplicação controlada e pressurizada com ar comprimido, equipada com uma única ponta do tipo jato plano TP8002EVS, em aço inox, calibrada para volume de água de 200 L ha⁻¹ (Figura 5).

Essas etapas demonstram uma abordagem rigorosa para o preparo, garantindo homogeneidade no material e consistência na aplicação dos tratamentos em cada vaso, possibilitando melhor controle das condições experimentais. A aplicação do herbicida na fase pré-emergente sugere um foco específico na influência do indaziflam nas fases iniciais do ciclo de vida das plantas, fornecendo informações valiosas sobre seu efeito para a germinação e o desenvolvimento inicial.

Figura 5 – Vasos estilo jardineira sendo preenchidos (A), acomodados para irrigação prévia à aplicação (B) e dentro da câmara para aplicação (C)





Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

Para a escolha das espécies utilizadas, buscou-se abranger vários atributos, como espécies de adubação verde e florestais representantes de diversos estágios da sucessão ecológica. Dessa forma, optou-se pelas espécies *Canavalia ensiformis* (feijão-de-porco), *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Handroanthus impetiginosus* (ipê-roxo), *Peltophorum dubium* (canafístula), *Platypodium elegans* (jacarandá-do-campo), *Handroanthus vellosi* (ipê-amarelo-liso), *Croton floribundus* (capixingui), *Guazuma ulmifolia* (mutamba) e *Senna multijuga* (pau-cigarra), conforme Tabela 3, em que se apresentam suas características e famílias.

Tabela 3 – Seleção de espécies para restauração florestal na Mata Atlântica: nomes comuns e científicos, famílias e características ecológicas sucessionais

Nome comum	Nome científico	Família	Estágio sucessional	Característica reflorestamento
Feijão-de-porco	<i>Canavalia ensiformis</i>	Fabaceae	Pioneira	Adubação verde
Feijão-guandu	<i>Cajanus cajan</i>	Fabaceae	Pioneira	Adubação verde
Ipê-roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Bignoniaceae	Secundária	Diversidade
Canafístula	<i>Peltophorum dubium</i>	Fabaceae	Secundária	Diversidade
Jacarandá-do-campo	<i>Platypodium elegans</i>	Fabaceae	Secundária	Diversidade
Ipê-amarelo	<i>Handroanthus vellosi</i>	Bignoniaceae	Secundária	Diversidade
Capixingui	<i>Croton floribundus</i>	Euphorbiaceae	Pioneira	Recobrimento
Mutamba	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Malvaceae	Pioneira	Recobrimento
Pau-cigarra	<i>Senna multijuga</i>	Fabaceae	Pioneira	Recobrimento

Fonte: Lorenzi, 2016; Isernhagen et al., 2019.

Houve necessidade de procedimentos de quebra de dormência para sementes de algumas espécies que possuem esse mecanismo como estratégia evolutiva. Na Tabela 4, apresentam-se as espécies e os métodos utilizados para cada uma delas.

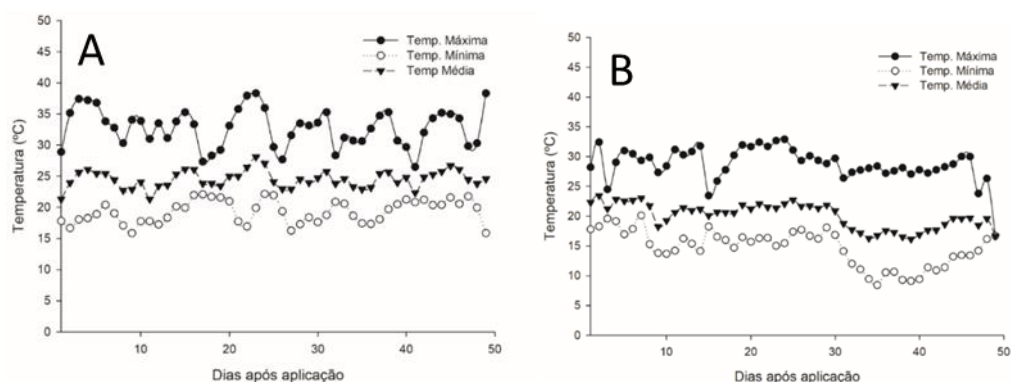
Tabela 4 – Espécies para restauração florestal na Mata Atlântica e procedimentos utilizados para quebra de dormência específica de cada espécie

Nome comum	Nome científico	Procedimento para quebra de dormência
Feijão-de-porco	<i>Canavalia ensiformis</i>	Não se aplica
Feijão-guandu	<i>Cajanus cajan</i>	Não se aplica
Ipê-roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Não se aplica
Canafístula	<i>Peltophorum dubium</i>	Choque térmico
Jacarandá-do-campo	<i>Platypodium elegans</i>	Não se aplica
Ipê-amarelo	<i>Handroanthus vellosi</i>	Não se aplica
Capixingui	<i>Croton floribundus</i>	Embebição em água
Mutamba	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Choque térmico
Pau-cigarra	<i>Senna multijuga</i>	Choque térmico

Fonte: Lorenzi, 2016.

Para cada uma das repetições dos ensaios, mensuraram-se as temperaturas máxima, mínima e média diárias dentro da casa-de-vegetação, conforme Figura 6. Além disso, diariamente, ocorreram 3 irrigações que simulavam por volta de 11 mm de chuva diárias.

Figura 6 – Temperatura máxima, mínima e média, em graus Celsius, no interior da casa de vegetação ao longo das repetições 1 (A) e 2 (B)



Aos 47 dias após a aplicação, contaram-se todas as plântulas germinadas e saudáveis (Figura 7) para a avaliação da porcentagem de germinação. Consideraram-se, apenas, as plantas semelhantes aos indivíduos da testemunha e que não apresentassem tombamento e nenhuma deformação ou coloração atípica.

Figura 7 – Plântulas estabelecidas das espécies canafístula (*Peltophorum dubium*) e ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) e contabilizadas em censo



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023.

Para as avaliações, submeteram-se os dados à Análise de Variância (ANOVA) e, quando o efeito foi significativo, compararam-se as médias pelo teste T de Student ($p \leq 0,05$). Por fim, elaboraram-se os gráficos com o auxílio do programa Sigmaplot 12,5 (Systat Software Inc, San Jose, Califórnia, EUA).

Considerando a realização dos experimentos em duplicata, submeteram-se os dados de biomassa da braquiária e contagem das espécies da restauração florestal à análise de variância de forma independente. Em seguida, aplicou-se o teste de homogeneidade das variâncias residuais ($F_{\text{máximo}}$) (HARTLEY, 1950). Comprovada a homogeneidade entre os experimentos, prosseguiu-se com a análise conjunta, e realizou-se uma nova análise de variância, dessa vez agrupando-se os dados e considerando um experimento com dez repetições para cada parâmetro analisado.

Essa abordagem é relevante, pois avalia a variabilidade em cada experimento, garantindo uma compreensão das diferenças específicas em cada duplicata. Em seguida, a análise conjunta permite avaliar o conjunto de dados completo, proporcionando uma visão mais abrangente do efeito dos tratamentos e reduzindo a variabilidade experimental. O uso do teste de homogeneidade das variâncias

residuais, antes da análise conjunta, é uma prática importante para garantir que a combinação dos dados seja estatisticamente justificada. Essa estratégia aprimora a confiabilidade e a interpretação dos resultados.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Proteção do carvão ativado aos efeitos de diferentes doses do indaziflam em três tipos de solo

Analisou-se a variação, bem como a quantidade de biomassa da gramínea *Urochloa decumbens* (capim-braquiária), gerada após a aplicação do indaziflam sobre copos preenchidos com três solos de diferentes texturas (Tabela 5), com a semeadura de 25 sementes do capim-braquiária diretamente no solo ou em mistura com carvão ativado. Permitindo avaliar a quantidade de biomassa da gramínea em resposta à aplicação do indaziflam em diferentes solos e condições experimentais.

Tabela 5 – Valores de F e coeficiente de variação para acúmulo de massa seca na parte aérea, raiz e total de braquiária em função da aplicação de indaziflam na presença e ausência de carvão ativado em areia, solo arenoso e solo argiloso

Fontes de variação	Areia		
	Parte aérea	Raiz	Total
Carvão ativado (CA)	75,856*	70,448*	84,094*
Indaziflam (I)	9,415*	6,965*	8,889*
CA x I	5,991*	7,960*	8,577*
CV (%)	64,53	67,19	61,44
	Solo arenoso		
	Parte aérea	Raiz	Total
Carvão ativado (CA)	170,101*	110,234*	155,705*
Indaziflam (I)	16,881*	7,229*	12,334*
CA x I	19,708*	7,343*	13,520*
CV (%)	34,46	51,17	40,69
	Solo argiloso		
	Parte aérea	Raiz	Total
Carvão ativado (CA)	118,706*	38,983*	64,363*
Indaziflam (I)	6,762*	1,448 ^{ns}	2,642 ^{ns}
CA x I	4,189*	3,426**	4,090*
CV (%)	52,86	93,84	72,53

^{ns}não significativo; *, **significativo a 1 e 5%, respectivamente, de probabilidade pelo teste F

Os resultados revelam que a adição de carvão ativado teve um impacto positivo na produção de biomassa do capim-braquiária, o indicador biológico estudado.

Mesmo que as diferenças não tenham sido estatisticamente significativas em relação à testemunha, os resultados foram semelhantes ou superiores, sugerindo um efeito benéfico consistente.

Além disso, a combinação da adição de carvão ativado com o uso do herbicida indaziflam, em diferentes doses, também mostrou efeitos positivos na geração de biomassa para todos os solos. Mesmo nessas condições, os resultados não diferiram, estatisticamente, da testemunha, indicando que a presença do carvão ativado pode atenuar os potenciais efeitos negativos do herbicida.

No entanto, quando se aplicou o herbicida sem a adição de carvão ativado, observaram-se diferenças estatísticas para todos os solos. Isso sugere que a ausência do carvão ativado resultou em uma redução significativa na germinação e desenvolvimento das plântulas quando comparado à testemunha, com casos em que a germinação não ocorreu.

Em contraste, nos tratamentos com carvão ativado, quer seja sem a aplicação de indaziflam ou com a adição de carvão ativado e aplicação do herbicida em diferentes doses, os resultados foram semelhantes e, de forma geral, não apresentaram diferenças estatísticas em comparação com a testemunha pura. As diferenças em relação às testemunhas referiram-se ao fato de haver maiores ganhos em biomassa, e não a redução. Isso sugere que a presença do carvão ativado foi capaz de atenuar os efeitos negativos do indaziflam, permitindo a germinação, emergência e estabelecimento da gramínea estudada, que é sensível ao herbicida.

Portanto, os resultados apontam não apenas para a capacidade do carvão ativado de proteger as plântulas contra os efeitos fitotóxicos do indaziflam, mas também para a importância desse material em relação à promoção do desenvolvimento saudável das plantas, mesmo em condições adversas. Esses achados têm implicações significativas para estratégias de manejo ambiental, fornecendo subsídios sobre como mitigar os impactos negativos de herbicidas no estabelecimento de plantas sensíveis.

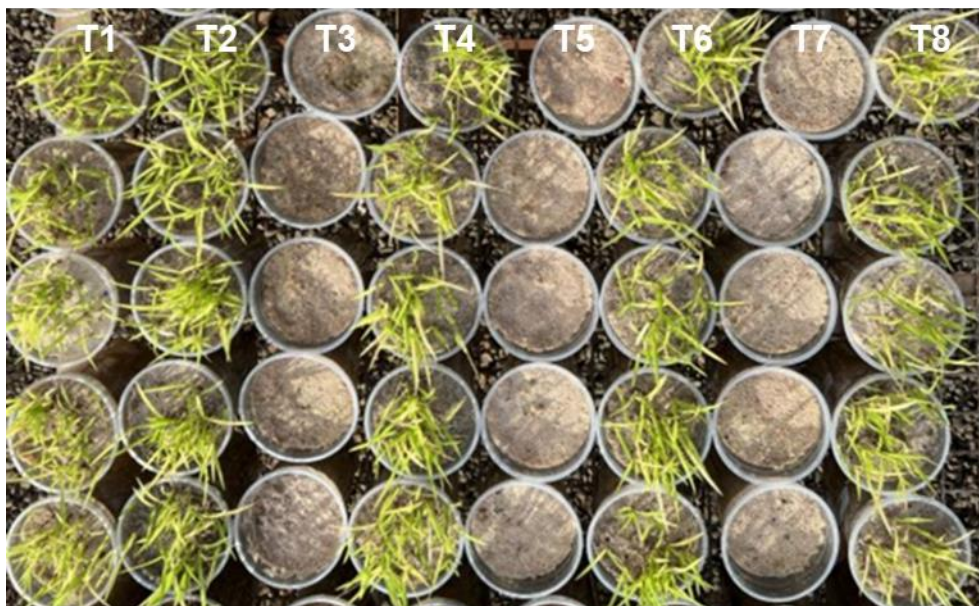
Conforme a revisão de Novotny *et al.* (2015), a adição de diferentes fontes de carbono orgânico, em vários tipos de solo, especialmente aqueles de textura arenosa, pode ter um impacto positivo na retenção de água. De acordo com uma extensa literatura, essa prática tem sido associada a uma maior capacidade de retenção de água, melhoria na estabilidade dos agregados, aumento da porosidade e taxa de infiltração de água (GLASER; LEHMANN; ZECH, 2002; VERHEIJEN *et al.*, 2010; LIU

et al., 2016). Além disso, estudos indicam que a adição de carbono orgânico ao solo pode resultar no aumento do pH e da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (LEHMANN *et al.*, 2003), fornecer nutrientes diretamente e indiretamente para as plantas (CHAN *et al.*, 2008), melhorar a saturação por bases (SCHULZ; GLASER, 2012), aumentar a disponibilidade de fósforo (YAMATO *et al.*, 2006) e favorecer as interações do solo com a microfauna (RUIVO *et al.*, 2009).

Estudos enfatizam os benefícios do carvão ativado e biocarvão no crescimento de diversas culturas. Pesquisas como as de Karhu *et al.* (2011) destacam que o carvão ativado promove o crescimento de gramíneas, atribuído à sua capacidade de aumentar a porosidade do solo, melhorando a retenção de água. Silva (2016) ressalta que biocarvão proveniente de resíduos de café pode equiparar a produção de biomassa seca de parte aérea à obtida com fertilizante químico em plantas de milho, assim como na combinação de auxina e carvão ativado mostrou resultados positivos no porte e biomassa de *Coffea arabica* (SANTANA *et al.*, 2011). Em outra frente, Omil *et al.* (2013) obtiveram ganhos em altura, diâmetro e volume em *Pinus radiata*, e que, principalmente, os efeitos foram mais notórios em solos mais pobres, resultados encontrados também por Santalla *et al.* (2011) para a mesma espécie.

Conforme a Figura 8, considerando as colunas de copos alinhados da esquerda para a direita, há os tratamentos: testemunha; presença de carvão ativado; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 37,5 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 37,5 g ha⁻¹; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 150 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 150 g ha⁻¹.

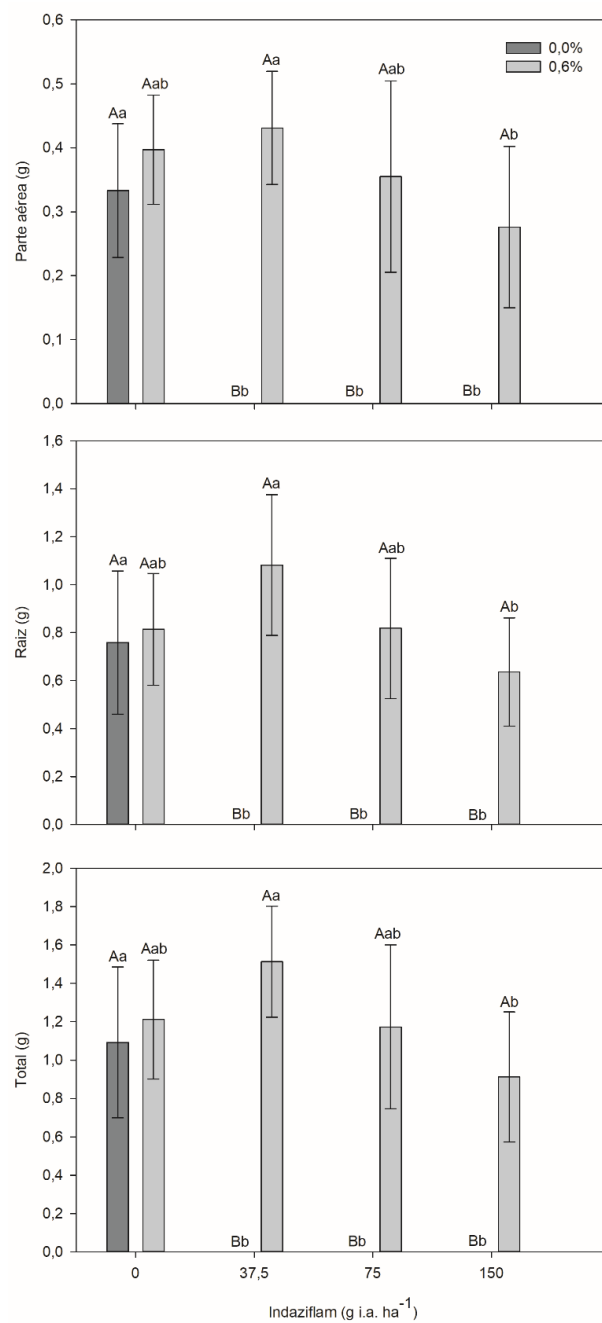
Figura 8 – Plântulas estabelecidas do bioindicador *Urochloa decumbens*, em areia pura sob os diferentes tratamentos



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Considerando que o substrato areia naturalmente possui baixa capacidade de reter moléculas devido à baixa ou nenhuma quantidade de cargas livres (RONQUIM, 2010), a adição do carvão pode ter influenciado, diretamente, esses efeitos, adsorvendo o ingrediente ativo a ponto de torná-lo indisponível na solução do solo ao longo do ensaio. A análise descrita na Figura 9 oferece informações importantes sobre os efeitos da adição de carvão ativado e a aplicação do herbicida indaziflam na biomassa total seca das plantas em areia.

Figura 9 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em areia com e sem carvão ativado (0 e 0,6%)



Médias seguidas da mesma letra (maiúscula entre as concentrações de carvão em cada dose de indaziflam e minúscula entre as doses do herbicida nas diferentes concentrações de carvão ativado) não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$)

A adição de carvão ativado não resultou em diferenças estatísticas em relação à testemunha, que não teve carvão misturado no solo superficial dos vasos e não recebeu a aplicação do indaziflam. Além de observar semelhança biomassa de parte aérea e de raízes, foi possível perceber essa semelhança também em relação à média

da biomassa total seca das plantas. A dose de 37,5 g/ha do herbicida indaziflam não diferiu, estatisticamente, do tratamento com a presença de carvão ativado (T2) e do tratamento com a adição de carvão ativado e aplicação do indaziflam na mesma dose (T6). Em caso de aumento da dose para 150 g/ha, houve diferença estatística apenas com a menor dose (37,5 g/ha), que não diferiu do tratamento com presença de carvão ativado (T2).

Contudo, os tratamentos que não tiveram carvão adicionado e receberam a aplicação do indaziflam apresentaram diferença estatística em relação ao não tratado e aos outros tratamentos, visto que não geraram biomassa ao longo do experimento. Esses resultados sugerem que a adição de carvão ativado pode mitigar os efeitos negativos do indaziflam na biomassa total seca das plantas, especialmente em doses mais elevadas do herbicida. Além disso, a presença do carvão ativado parece ser crucial para permitir o desenvolvimento das plantas, em contraste com os tratamentos sem carvão ativado e com a aplicação do indaziflam, que não produziram biomassa.

Os resultados, portanto, indicam que a adição do carvão ativado teve um impacto positivo significativo no crescimento das plantas, resultando em incrementos de biomassa. A adição do carvão ativado proporcionou, em média, um incremento de 19% na biomassa seca da parte aérea e 7% na biomassa seca da raiz, em comparação com as testemunhas. O incremento médio na biomassa seca total foi de 11%. O tratamento com a dose de 37,5 g de indaziflam por hectare (metade da dose recomendada para florestas) obteve um incremento de 39% em massa seca em relação à testemunha, ao final do experimento. A dose de 75 g de indaziflam por hectare resultou em um incremento de 7% na biomassa seca em comparação com a testemunha. No entanto, para a dose de 150 g/ha, houve uma redução de 16% na biomassa seca em relação ao padrão.

Esses resultados sugerem que o carvão ativado não apenas neutralizou os potenciais efeitos adversos do indaziflam, mas também contribuiu para um aumento da biomassa das plantas. A curva dose-resposta destaca que, mesmo em doses menores do herbicida, a presença de carvão ativado impulsionou o crescimento, enquanto em doses mais altas, a influência positiva foi menor.

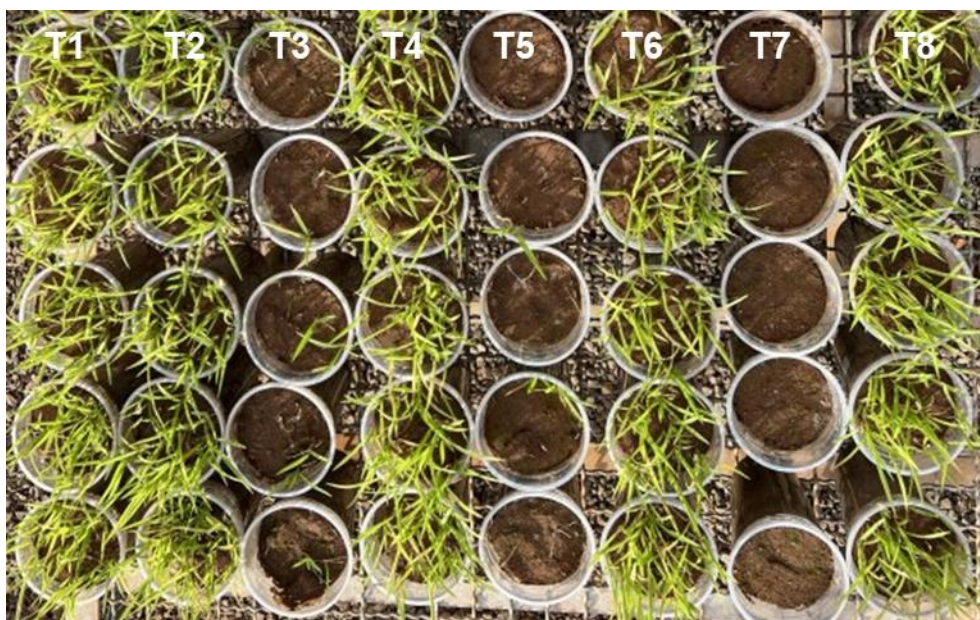
A ausência de carvão nos tratamentos com indaziflam, independentemente da dose do herbicida, resultou na ausência de produção de biomassa, tornando esses tratamentos significativamente diferentes dos outros. Isso reforça a indicação de Dias

et al. (2019) de que a espécie vegetal estudada pode ser efetivamente utilizada como um bioindicador em areia para as três doses testadas de indaziflam.

Para o solo arenoso, os resultados foram bastante semelhantes, principalmente na pouca geração de indivíduos nos tratamentos que tiveram a aplicação do indaziflam e não tiveram a presença do carvão ativado, em relação com os tratamentos que receberam o carvão.

Conforme a Figura 10, considerando as colunas de copos alinhados da esquerda para a direita, observam-se os tratamentos: testemunha; presença de carvão ativado; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 37,5 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 37,5 g ha⁻¹; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 150 g ha⁻¹; presença de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de 150 g ha⁻¹.

Figura 10 – Plântulas estabelecidas do bioindicador *Urochloa decumbens*, em solo arenoso sob os diferentes tratamentos



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Todas as doses de indaziflam nos tratamentos sem a adição de carvão foram estatisticamente diferentes da testemunha, e houve uma baixa quantidade de biomassa gerada ao final do experimento. Isso sugere que, nos solos arenosos, houve impacto significativo do indaziflam em relação ao crescimento das plantas. Essas

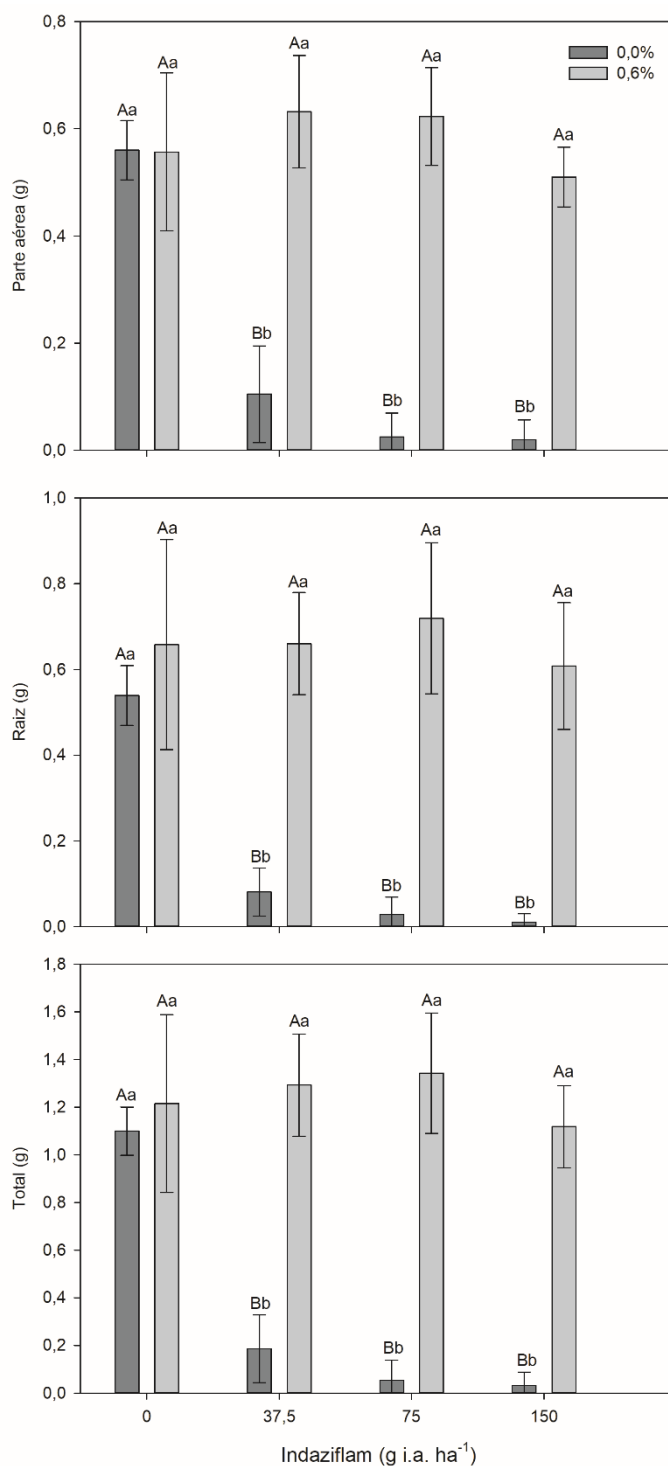
informações reforçam a importância do carvão ativado para a promoção do crescimento saudável das plantas, especialmente em solos arenosos sujeitos à aplicação de herbicidas como o indaziflam. A presença do carvão parece ser crucial para atenuar os efeitos negativos do herbicida e manter a biomassa das plantas em níveis mais satisfatórios.

A comparação entre solos arenosos e solos de texturas mais argilosas destaca diferenças importantes no potencial de sorção. Solos arenosos, geralmente, têm um potencial menor em comparação com solos mais argilosos. Mesmo assim, esse solo arenoso testado demonstrou capacidade maior do que a areia pura, o que possibilitou a germinação de algumas sementes e a emergência de plântulas.

No entanto, apesar dessa capacidade de germinação e emergência, a biomassa total seca, gerada no solo arenoso, foi estatisticamente significativa em comparação a qualquer outro tratamento e à testemunha. Isso indica que, embora algumas plantas possam ter germinado e emergido nos solos arenosos, a presença do indaziflam teve um impacto significativo para a produção de biomassa, resultando em níveis mais baixos em comparação com outros tratamentos.

Na Figura 11, representam-se os resultados obtidos para os solos arenosos, como o acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e biomassa total das plantas de braquiária, após aplicação de indaziflam em solo arenoso com e sem carvão ativado. Não houve diferenças estatísticas entre a testemunha e o tratamento apenas com adição de carvão, tanto para a parte aérea quanto para a parte radicular das plantas. Isso sugere que, nos solos arenosos, o carvão ativado não teve um impacto negativo no crescimento das plantas. Da mesma forma, não se observaram diferenças significativas entre os tratamentos com adição de carvão e as diferentes doses do herbicida, indicando uma consistência nos resultados para ambas as partes vegetais (aérea e radicular).

Figura 11 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em solo arenoso com e sem carvão ativado (0 e 0,6%)



Médias seguidas da mesma letra (maiúscula entre as concentrações de carvão em cada dose de indaziflam e minúscula entre as doses do herbicida nas diferentes concentrações de carvão ativado) não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$)

A adição de carvão na mistura de solo superficial com as sementes do bioindicador resultou em um incremento significativo de 22% na geração de biomassa

seca radicular em comparação com a testemunha. Isso sugere que o carvão ativado teve um impacto positivo no desenvolvimento radicular das plantas. Na curva dose-resposta com o indaziflam, houve um incremento em relação à testemunha de 22%, 33%, e 13% para as doses de 37,5, 75 e 150 g de indaziflam ha⁻¹, respectivamente. É importante notar que, embora esses incrementos tenham sido observados, não houve diferenças estatísticas entre as doses.

Nos tratamentos sem a adição do carvão, a geração de biomassa foi significativamente inferior, com valores relativos de 15%, 5%, e 2% em biomassa radicular seca em comparação com a testemunha, para as doses de 37,5, 75 e 150 g de indaziflam ha⁻¹, respectivamente.

A repetição do potencial observado no substrato de areia pura para o solo arenoso destaca a consistência dos resultados em relação à adição de carvão ativado. Assim como no substrato de areia pura, a adição de carvão favoreceu a geração de biomassa em comparação com a omissão desse material no solo arenoso. Esses resultados indicam a importância do carvão ativado em relação à promoção do crescimento das plantas, mesmo em solos arenosos. A adição de carvão permitiu que não houvesse diferença significativa com a testemunha, sugerindo que o carvão ativado não teve efeitos adversos e manteve os níveis de biomassa semelhantes aos da testemunha. Essa capacidade do carvão ativado em propiciar o desenvolvimento radicular saudável é essencial, pois indica ganhos na seletividade em relação ao herbicida e pode ter implicações positivas em práticas de manejo sustentável.

No entanto, a ausência do carvão fez com que o capim-braquiária ainda apresentasse alta sensibilidade ao herbicida indaziflam para o solo arenoso. Isso confirma a capacidade do capim-braquiária de atuar como um bioindicador também nessas condições, refletindo a influência do indaziflam em seu desenvolvimento.

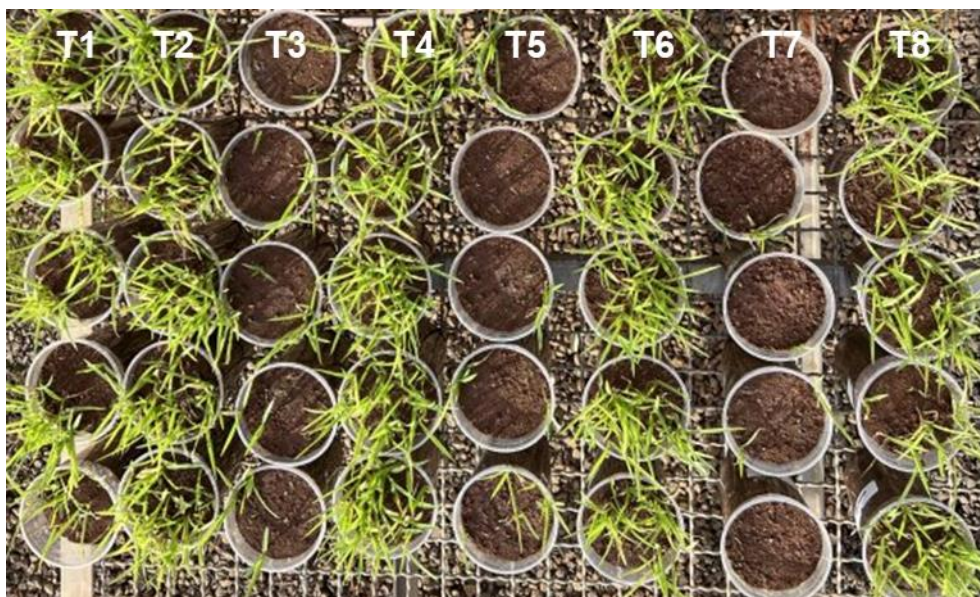
Para o solo argiloso, a tendência de maior retenção do indaziflam ao solo, devido à quantidade de argila e potencialmente maior quantidade de matéria orgânica, é uma observação relevante. Essa característica pode influenciar a disponibilidade do herbicida na solução do solo. Nos tratamentos que não receberam carvão ativado e tiveram a aplicação do indaziflam, não se observaram quantidades relevantes de biomassa desenvolvida até os 60 DAA (dias após a aplicação). Além disso, esses tratamentos apresentaram diferenças significativas em relação à testemunha.

Esses resultados indicam que, apesar da capacidade potencial de retenção do indaziflam ao solo argiloso, a presença do herbicida teve impactos negativos no

desenvolvimento da biomassa, resultando em diferenças significativas em comparação com a testemunha. Essa observação ressalta a importância do carvão ativado na mitigação dos efeitos adversos do indaziflam e destaca a sensibilidade do capim-braquiária a esse herbicida em condições de solo argiloso.

Considerando os copos organizados, na Figura 12, apresentam-se os tratamentos: testemunha; presença de carvão ativado; ausência de carvão ativado e aplicação de indaziflam na dose de $37,5 \text{ g ha}^{-1}$; com carvão ativado e indaziflam na dose de $37,5 \text{ g ha}^{-1}$; sem carvão ativado com indaziflam na dose de 75 g ha^{-1} ; com carvão ativado e com indaziflam na dose de 75 g ha^{-1} ; sem carvão ativado e com indaziflam na dose de 150 g ha^{-1} ; com carvão ativado e com indaziflam na dose de 150 g ha^{-1} .

Figura 12 – Plântulas estabelecidas do bioindicador *Urochloa decumbens* em solo argiloso sob os diferentes tratamentos

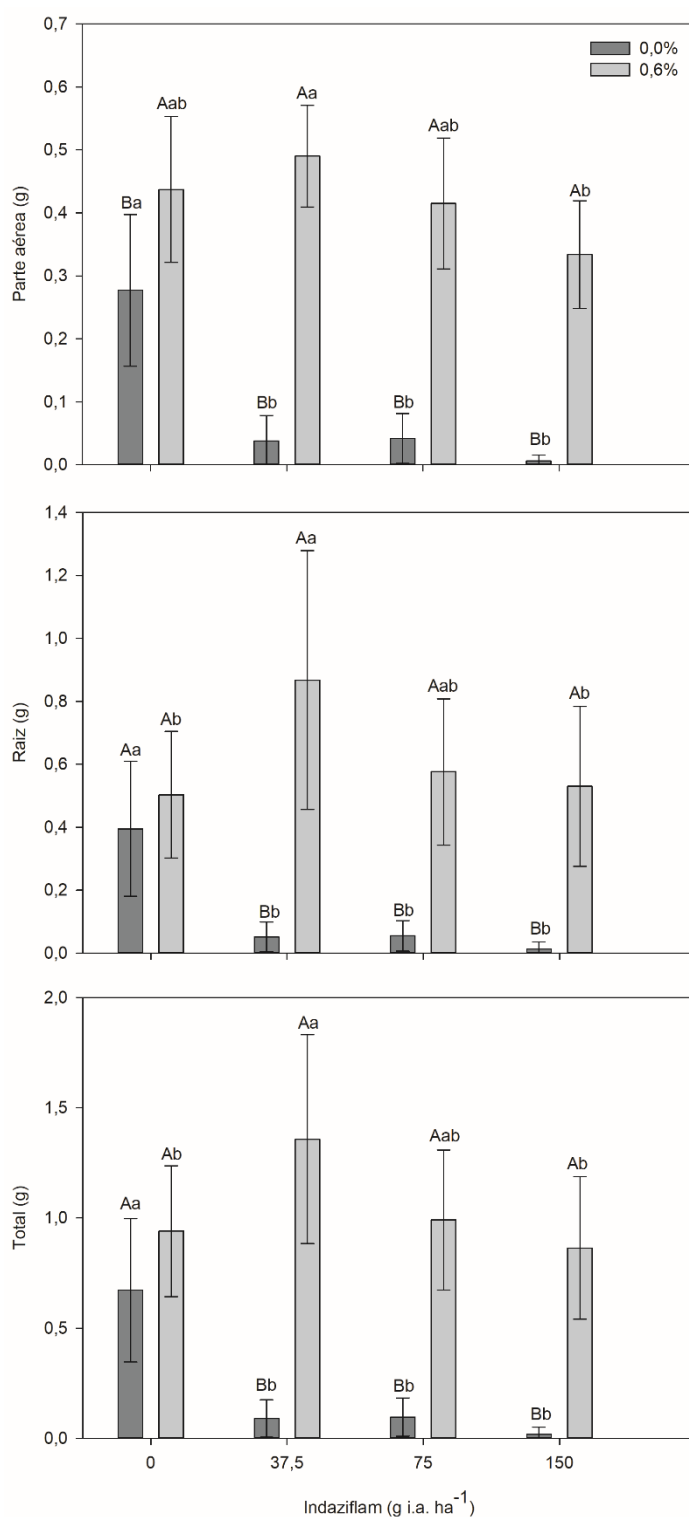


Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2022

Os resultados relacionados à biomassa seca da parte aérea e radicular com a adição do carvão ativado indicam efeitos positivos sobre o desenvolvimento das plantas. A média da biomassa seca da parte aérea no tratamento com a adição do carvão ativado foi 58% superior à testemunha, sendo significativamente diferente. Isso sugere que o carvão ativado teve um impacto positivo no crescimento da parte aérea das plantas. O desenvolvimento radicular também foi superior, com a biomassa seca

sendo 19% maior com a adição do carvão ativado. O ganho de biomassa seca total em relação à testemunha foi de 38%, embora sem diferença estatística (Figura 13).

Figura 13 – Acúmulo de massa seca (g) na parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após aplicação de indaziflam em solo argiloso com e sem carvão ativado (0 e 0,6%)

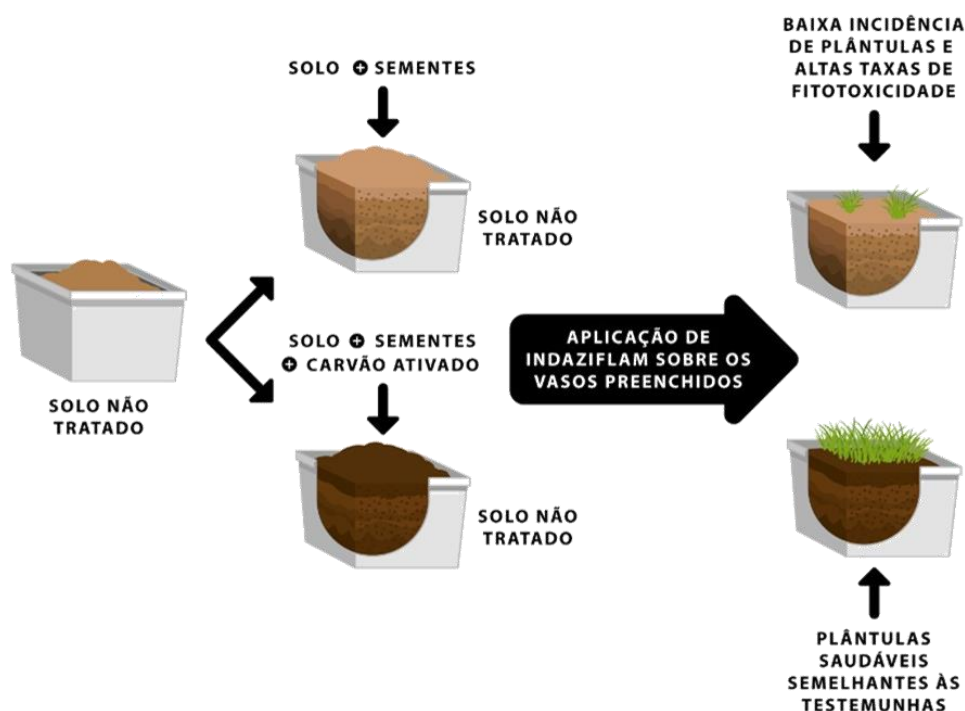


Médias seguidas da mesma letra (maiúscula entre as concentrações de carvão em cada dose de indaziflam e minúscula entre as doses do herbicida nas diferentes concentrações de carvão ativado) não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$)

A biomassa radicular seca aumentou significativamente no tratamento que recebeu 37,5 g do ingrediente ativo por hectare e teve adição de carvão. Esse tratamento mostrou um crescimento de 219% em comparação com a massa de raiz da testemunha e 172% em relação ao tratamento que recebeu apenas a adição de carvão, sendo estatisticamente diferente deste último. No caso do tratamento com dose de 75 g/ha do herbicida e adição de carvão, observou-se um maior desenvolvimento de biomassa na parte aérea (aumento de 18%) e na parte radicular (aumento de 51%). Na maior dose do indaziflam a biomassa encontrada foi bastante semelhante daquele tratamento que não recebeu o herbicida. Dessa forma, a aplicação de carvão foi suficiente para proporcionar segurança ao estabelecimento inicial da gramínea.

Na Figura 14, apresentaram-se os resultados do acúmulo de massa seca da parte aérea, raiz e total de plantas de braquiária após a aplicação de indaziflam em solo argiloso, em comparação à presença e à ausência de carvão ativado. É possível notar que o carvão ativado teve um impacto positivo no desenvolvimento das plantas, incluindo o aumento da biomassa seca da parte aérea e raiz. Ao comparar os resultados com a presença e a ausência de carvão ativado, pode-se observar como a presença desse material afeta o acúmulo de massa seca em diferentes partes das plantas de braquiária. Evidencia-se, portanto, que a presença do carvão ativado tenha influenciado, positivamente, os resultados, conforme discutido anteriormente para os experimentos com o bioindicador capim-braquiária nos outros tipos de solo.

Figura 14 – Esquema representativo do preenchimento dos copos com substratos e do estabelecimento da gramínea nos diferentes tratamentos



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

De forma geral, pode-se afirmar que houve validação do uso do carvão ativado, para as condições estudadas, sendo estas doses, tipos de solo, quantidade de água disponível, condições ambientais e bioindicador. Além disso, o bioindicador *Urochloa decumbens* se mostrou sensível ao tratamento com indaziflam, nas diferentes doses testadas, sendo, portanto, recomendado para usos em ensaios biológicos.

Em resumo, os resultados indicam que o carvão ativado pode ser uma ferramenta útil para atenuar os efeitos do indaziflam, assim como o capim-braquiária pode ser um bioindicador sensível para avaliações biológicas relacionadas a esse herbicida. Essas descobertas têm implicações práticas e devem ser ainda mais investigadas para usos operacionais e com espécies de interesse agrícola, florestal e de restauração de ambientes naturais.

2.4.2. Potencial efeito do carvão ativado no estabelecimento de plântulas de espécies utilizadas para a restauração da Mata Atlântica após a aplicação de indaziflam

Ao analisar a quantidade de plântulas germinadas aos 47 dias após a aplicação do indaziflam, nos vasos preenchidos com solo médio e cobertura com e sem carvão ativado, houve diferenças significativas entre os tratamentos que continham carvão ativado na superfície do solo em comparação com aqueles que não continham, conforme a Tabela 6. Com isso, é possível perceber que o carvão ativado desempenhou papel importante para as respostas das plantas às condições experimentais após a aplicação do indaziflam.

Tabela 6 – Valores de F e coeficiente de variação para porcentagem de germinação de nove espécies nativas sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam

Fontes de variação	QMe		
	Germinação (%)		
	<i>Peltophorum dubium</i>	<i>Croton floribundus</i>	<i>Handroanthus vellosi</i>
Tratamento	6865,0504**	11792,5719**	9408,1904**
Resíduo	280,2472	379,7254	497,8851
CV (%)	44,05	39,50	48,68
	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	<i>Platypodium elegans</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i>
	6925,4389**	1103,3944**	12990,7237**
	547,2849	189,2482	223,3219
CV (%)	44,28	49,42	30,19
	<i>Senna multijuga</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>	<i>Cajanus cajan</i>
	5357,2207**	6548,8415**	12645,8874**
	319,4805	194,3361	208,3827
CV (%)	51,56	16,40	24,61

**significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

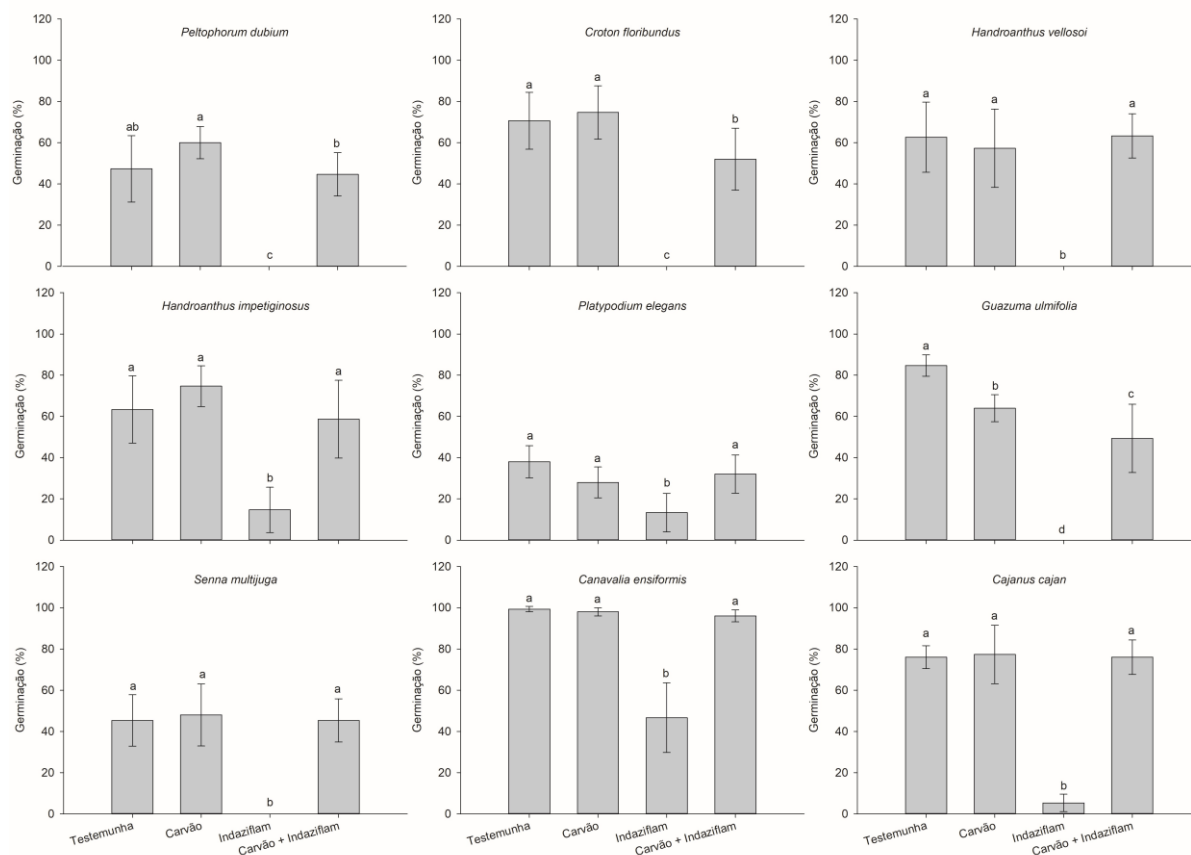
De forma a compreender o comportamento de cada uma das espécies em relação ao uso ou não do carvão ativado, além da proteção auferida por esse material contra efeitos herbicidas do indaziflam, garantindo seletividade para a germinação e estabelecimento inicial da plântula, realizou-se a contagem das plântulas aos 47 dias após a aplicação comparando os valores com a testemunha.

As espécies de recobrimento são importantes, principalmente para o início da restauração, pois, devido a sua velocidade e hábito de crescimento, cria-se sombreamento rapidamente na área, reduzindo plantas daninhas heliófilas, como as

gramíneas exóticas. Além disso, permitem que espécies de crescimento mais lento e que não possuem bom desenvolvimento a pleno sol se desenvolvam. Entretanto, é crucial que o desenvolvimento dessas espécies não seja afetado pela competição com plantas invasoras a ponto de retardar seu crescimento. Isso poderia comprometer sua capacidade de desempenhar o papel essencial para a restauração florestal, resultando em uma sequência prejudicial para esse processo. Foi possível observar que, para as três espécies estudadas, além dos adubos verdes, o uso do carvão propiciou a germinação e o desenvolvimento inicial dessas espécies, contrapondo a ausência de carvão, em que o indaziflam não permitiu que ocorresse a germinação para as cinco espécies florestais estudadas.

As espécies de diversidade, na restauração ativa, possuem a função de enriquecimento florístico. Além disso, são beneficiadas pelas condições de campo criadas pelas espécies de recobrimento, principalmente sombreamento. Nesse sentido, são importantes para garantir e simular a sucessão ecológica. Na Figura 15, mostra-se como essas espécies se comportaram nas condições do estudo. Para as duas espécies de feijões utilizadas frequentemente na restauração florestal, tanto de semeadura quanto de mudas, o carvão ativado — se adicionado juntamente à camada superficial de solo, onde se encontram as sementes dos adubos verdes — propiciou proteção à germinação e ao desenvolvimento inicial das espécies. Com a incorporação de carvão, mesmo com a aplicação do herbicida, as espécies apresentaram um comportamento análogo aos tratamentos sem indaziflam. Por outro lado, na ausência de carvão, além da reduzida taxa de germinação, observou-se uma inconsistência nos resultados alcançados. Essa disparidade exige uma análise mais aprofundada para identificar as razões relativas a essas variações. No entanto, sem tal investigação, o plantio das espécies, sem qualquer proteção contra esse herbicida, acarretaria riscos significativos.

Figura 15 – Porcentagem de germinação de espécies nativas sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam



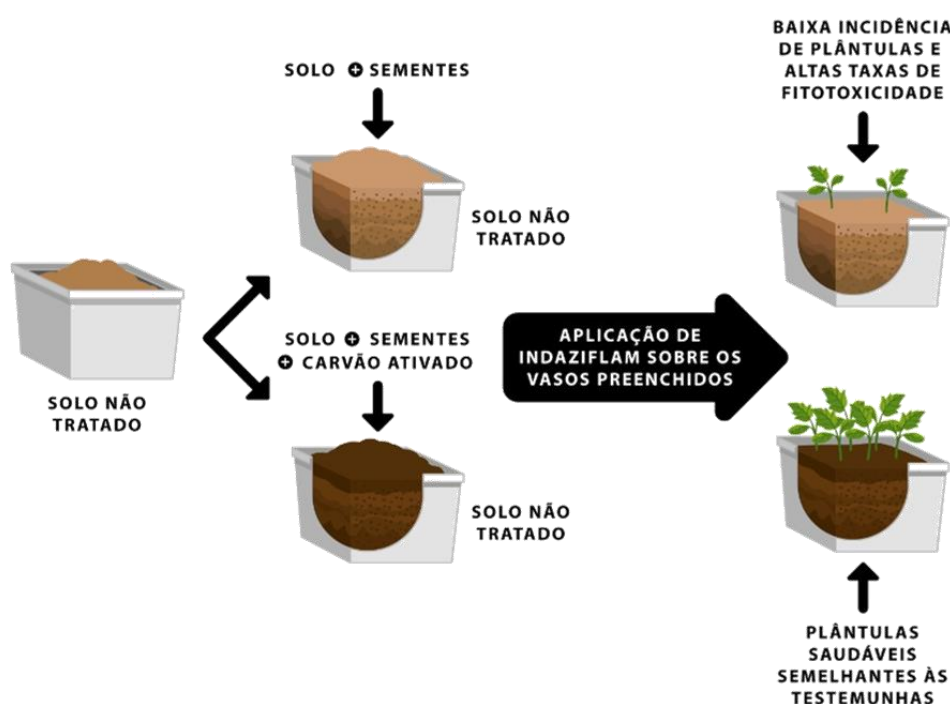
Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste T (LSD) ($p \leq 0,05$)

O esquema apresentado na Figura 16 exemplifica como ocorreu a preparação de cada tratamento, desde o preenchimento dos copos até a inserção da mistura contendo os diferentes solos, carvão ativado e sementes das espécies utilizadas para a restauração florestal ativa via semeadura. Após a montagem, realizou-se a aplicação do herbicida indaziflam nas suas diferentes doses, conforme resultados demonstrados também nessa figura.

A variação no comportamento das diferentes espécies ao longo do experimento é um achado interessante. O retardo na emergência, efeitos expressivos na má formação cotiledonar, das primeiras folhas e, inclusive, o tombamento de plântulas, especialmente no tratamento com o uso do indaziflam e a ausência do carvão ativado, sugerem uma resposta diferenciada das espécies aos tratamentos aplicados. A inclusão do carvão ativado desempenhou um papel de proteção para determinadas espécies vegetais, ao passo que a ausência desse componente, combinada com a presença do indaziflam, resultou em efeitos adversos no crescimento das plântulas.

O manejo dessas variáveis pode ser crucial para otimizar o estabelecimento das espécies e minimizar efeitos indesejados. Algumas plântulas não apresentavam sistema radicular bem formado, e, provavelmente, sobreviveram por ter irrigação diária com vários ciclos ao dia, evitando o déficit hídrico.

Figura 16 – Esquema representativo do preenchimento dos vasos jardineiras copos com substratos e do estabelecimento das espécies da restauração florestal nos diferentes tratamentos



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

Os resultados indicam que a adição de carvão ativado, juntamente às sementes da canafístula (*Peltophorum dubium*), espécie de diversidade, contribuiu, de forma significativa, para a quantidade e qualidade das plântulas em comparação com a testemunha, mesmo quando tratadas com o indaziflam. Essa melhoria na germinação e no estabelecimento inicial das plântulas sugere que o carvão ativado desempenhou um papel protetor, mitigando os efeitos fitotóxicos do indaziflam e favorecendo o desenvolvimento saudável das plantas nos 47 dias do experimento. Quando o carvão foi utilizado, observou-se uma média superior de cerca de 33% mais plântulas saudáveis em comparação com a testemunha, demonstrando a eficácia do carvão ativado para a promoção da germinação e desenvolvimento inicial dessa espécie.

A ausência de plântulas para a contagem nos tratamentos sem a adição de carvão ativado e com a aplicação do indaziflam destaca a severidade dos efeitos fitotóxicos do herbicida, ressaltando a importância do carvão ativado como um agente de proteção. A presença do carvão ativado proporcionou condições mais favoráveis para a germinação e o crescimento inicial das plântulas, mesmo na presença do herbicida, demonstrando seu potencial em relação à promoção da seletividade e à redução dos efeitos negativos sobre as espécies desejadas durante as fases iniciais de crescimento.

Os resultados para a espécie de recobrimento *Croton floribundus* (capixingui) indicam que a adição de carvão ativado não diferiu, estatisticamente, da testemunha, mostrando valores médios bastante semelhantes. Este é um resultado positivo, sugerindo que a presença do carvão ativado não afetou, negativamente, a germinação e o estabelecimento inicial de plântulas de capixingui, mantendo um desempenho comparável à testemunha.

No entanto, nos tratamentos com a adição de carvão ativado e a aplicação do herbicida indaziflam, houve diferença estatística, indicando uma média de 76% de germinação em relação à testemunha. Isso sugere que, mesmo com a presença do carvão ativado, a aplicação do herbicida teve impacto na germinação da espécie capixingui. A ausência do carvão ativado nesses tratamentos resultou na falta de germinação e estabelecimento de plântulas para essa espécie, indicando que, mesmo com a redução no número final de indivíduos saudáveis, o carvão foi fundamental para a viabilidade da espécie.

Para a espécie *Handroanthus vellosi* (ipê-amarelo) e *Handroanthus impetiginosus* (ipê-roxo), ambos classificados como de diversidade, os resultados indicam que o uso do carvão ativado não trouxe diferenças estatísticas, seja nos tratamentos com ou sem a aplicação do herbicida indaziflam. As taxas médias de germinação e plântulas saudáveis foram bastante semelhantes entre esses tratamentos, sugerindo que o carvão ativado não afetou, negativamente, o desenvolvimento inicial dessas espécies em condições de presença ou ausência do herbicida.

No entanto, é interessante observar que o tratamento que recebeu a aplicação do indaziflam, mas sem o carvão ativado, apresentou germinação e estabelecimento de um pequeno percentual de plântulas saudáveis para o ipê-roxo (*Handroanthus*

impetiginosus). Esse tratamento teve uma representatividade de 19% em relação à média obtida na testemunha, diferindo estatisticamente com uma baixa aptidão.

Esses resultados sugerem que, apesar da presença do herbicida, o carvão ativado desempenhou um papel importante para a germinação e o estabelecimento inicial dessas espécies, proporcionando um ambiente mais favorável para o desenvolvimento das plântulas.

Os resultados para o jacarandá (*Platypodium elegans*), uma espécie utilizada para trazer diversidade à restauração florestal, mostraram uma baixa taxa de germinação, com média de 38% na testemunha. No entanto, os tratamentos com carvão ativado não diferiram, estatisticamente, em relação à testemunha, indicando que o carvão ativado não impactou, negativamente, a germinação dessa espécie. As taxas médias foram de 73% para a adição de carvão e 82% para a adição de carvão com aplicação do indaziflam, em relação às não tratadas. A ausência de carvão com o uso do herbicida reduziu essa taxa para 30% do potencial encontrado nesse estudo. Assim, mesmo em condições de baixa germinação, o uso do carvão ativado foi positivo para a proteção inicial contra os efeitos herbicidas, favorecendo a germinação do jacarandá.

Os resultados para a mutamba-verdadeira (*Guazuma ulmifolia*) indicaram diferenças significativas para todos os tratamentos. A taxa de germinação na testemunha foi de cerca de 86%. No tratamento com carvão ativado, foi de 75%, e 58% com carvão e aplicação do indaziflam. Não houve germinação no tratamento que não teve carvão, mas recebeu o indaziflam. Assim, apesar de uma tendência à redução da taxa de germinação na adição de carvão e carvão com o indaziflam, a presença do carvão determinou que fosse possível o estabelecimento da espécie. Isso ocorreu devido ao potencial de sorção do herbicida pelo carvão, proporcionando proteção biológica à mutamba-verdadeira.

Para a espécie pioneira ou secundária inicial, pau-cigarra (*Senna multijuga*), utilizada para o recobrimento inicial, a taxa de germinação na testemunha foi de 45%. Os tratamentos com carvão ativado não diferiram, estatisticamente, da testemunha, indicando que o carvão ativado não teve impacto negativo na germinação dessa espécie. Por outro lado, a ausência do carvão ativado resultou em nenhuma germinação para essa espécie. Esses resultados sugerem que, mesmo em condições de baixa germinação, o uso do carvão ativado foi positivo para a proteção inicial contra os efeitos herbicidas, favorecendo a germinação do pau-cigarra.

Para o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), que é utilizada como adubo verde, os resultados indicam uma excelente germinação, praticamente total, na testemunha e nos tratamentos com carvão ativado, independentemente da presença do herbicida indaziflam. Entretanto, o tratamento que não continha carvão ativado e recebeu o herbicida apresentou uma taxa de germinação de, aproximadamente, 39% em relação à testemunha. Esse tratamento teve um impacto negativo significativo da aplicação do indaziflam na germinação dessa espécie.

Ao considerar o desenvolvimento do feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) durante sua avaliação, apesar da germinação e emergência mesmo quando teve aplicação do herbicida, mas sem a proteção do carvão ativado, teve seu desenvolvimento afetado. Na Figura 17, evidencia-se a diferença no porte das plantas do feijão-de-porco, tratadas com indaziflam antes da germinação. Além das folhas saudáveis e bem desenvolvidas no tratamento que incluía carvão ativado, observou-se a má formação vegetativa no tratamento sem a adição do carvão.

Figura 17 – Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A – esquerda e B) e ausência (A – direita e C) do carvão ativado



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023.

Os resultados encontrados para a outra espécie de adubação verde, o feijão guandu, foram também bastante expressivos. Contudo, nos tratamentos com a ausência do carvão ativado e aplicação do herbicida, poucas plantas emergiram. Já para o ipê-amarelo (*Handroanthus vellosi*), espécie florestal, não ocorreu nenhuma emergência na ausência do carvão, demonstrando que a espécie é bastante sensível a esse herbicida pré-emergente.

Já para o feijão guandu (*Cajanus cajan*), outro adubo verde, houve uma taxa de germinação média, na testemunha, de 79%, demonstrando que as sementes estavam viáveis. No tratamento com a ausência do carvão, a taxa de germinação e viabilidade foi em torno de 7% em comparação com a testemunha, evidenciando a importância do carvão ativado para a preservação da germinação e a viabilidade das sementes, mesmo na presença do herbicida indaziflam (Figura 18).

Figura 18 – Feijão guandu (*Cajanus cajan*) e ipê-amarelo (*Handroanthus vellosi*), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023.

Notam-se plantas emergidas, estabelecidas e saudáveis do tratamento com a presença do carvão ativado e aplicação do indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹. Em contraste, observam-se atraso no surgimento e uma baixa taxa de emergência das plantas da espécie *Cajanus cajan*, além da ausência de emergência das plantas da espécie *H. vellosi* no tratamento sem a presença do carvão ativado e com o uso do herbicida.

As espécies canafístula (*Peltophorum dubium*) e ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*) apresentaram boa germinação, emergência e desenvolvimento inicial saudável quando se adicionou carvão ativado em mistura ao solo superficial, e sendo posteriormente tratada com indaziflam na dose de 75 g ha⁻¹. Na ausência do carvão, as plantas foram bastante afetadas, e poucas emergiram (Figura 19).

Figura 19 – Canafístula (*Peltophorum dubium*) e ipê-roxo (*Handroanthus impetiginosus*), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023

Para as espécies de recobrimento, capixingui (*Croton floribundus*) e mutamba-verdadeira (*Guazuma ulmifolia*), o uso do carvão foi essencial para permitir a germinação e emergência, além do desenvolvimento vegetativo inicial saudável,

mesmo com a aplicação do herbicida. Para o tratamento sem a presença do carvão, não houve germinação de nenhuma das espécies, demonstrando bastante sensibilidade ao ingrediente ativo (Figura 20).

Figura 20 – Capixingui (*Croton floribundus*) e mutamba-verdadeira (*Guazuma ulmifolia*), aos 35 dias após aplicação (DAA) de indaziflam na presença (A) e ausência (B) do carvão ativado



Fonte: Fabricio Gomes de Oliveira Sebok, 2023.

Davies *et al.* (2023) empregaram algumas técnicas como o encapsulamento de sementes em grânulos de carvão ativado, e, apesar de não demonstrar efeitos positivos significativos para a semeadura de gramíneas perenes, o ocorrido foi devido à baixa precipitação e à possibilidade de o método de semeadura a lanço não ser eficaz em todas as situações.

Contudo, os mesmos autores sugeriram a necessidade de estudos adicionais para a avaliação da eficácia dessa estratégia. O emprego de tecnologias que envolvem sementes encapsuladas com carvão ativado poderia ser promissor para o restabelecimento da vegetação natural.

A eficácia dessas abordagens depende de uma série de fatores, incluindo as condições climáticas, métodos de semeadura e características específicas das espécies envolvidas.

Baughman *et al.* (2023) destacam a importância do desenvolvimento de abordagens eficazes para que haja, consistentemente, a vegetação desejada a partir de sementes, ao mesmo tempo em que são aplicadas medidas para o controle da propagação de espécies invasoras. Eles propõem a busca por um método único que possa lidar com esses desafios, cruciais para a restauração de vastas extensões de terras degradadas e semiáridas, especialmente aquelas invadidas por plantas anuais exóticas no oeste dos EUA.

Os autores ressaltam a necessidade de mais estudos em diferentes condições e com diversas espécies para compreender melhor a eficácia dessa abordagem, especialmente em grandes escalas para a restauração de espécies nativas. A pesquisa contínua é crucial para adaptar e aprimorar essas técnicas, tornando-as mais amplamente aplicáveis em diferentes contextos e ecossistemas.

Os estudos de Terry *et al.* (2021a) destacam os desafios no manejo de plantas daninhas em áreas de restauração, especialmente quando se utilizam herbicidas pré-emergentes como o indaziflam. Embora o indaziflam tenha mostrado maior potencial de controle para algumas espécies em comparação com o imazapic, há o risco de efeitos prejudiciais às espécies alvo da restauração. A busca por alternativas de manejo é crucial para minimizar esses efeitos indesejados.

Segundo Burr *et al.* (1972), é interessante explorar faixas de aplicação de carvão ativado sobre o solo após a semeadura de azevém. Os resultados sugerem que uma faixa de 2,5 cm de carvão ativado pode proporcionar seletividade para a espécie, indicando um potencial papel protetor do carvão ativado. No entanto, fatores como umidade e profundidade de semeadura podem influenciar esses resultados, ressaltando a complexidade do manejo e a necessidade de considerar diversas variáveis para obter eficácia nas práticas de restauração.

A análise de estudos realizados em casa de vegetação sugere que o uso de cápsulas de carvão ativado pode ser considerado como uma alternativa promissora para a proteção contra possíveis efeitos herbicidas (MADSEN *et al.*, 2014; DAVIES *et al.*, 2017). Essa abordagem pode oferecer flexibilidade na restauração de áreas invadidas por plantas exóticas, especialmente ao utilizar herbicidas não seletivos, conforme Sebastian *et al.* (2017). Portanto, o uso de cápsulas de carvão ativado pode representar uma estratégia relevante e eficaz a respeito da restauração de ecossistemas.

Os resultados de Clenet *et al.* (2019) sugerem que há uma diminuição nos efeitos de proteção proporcionados pelas cápsulas de carvão ativado à medida que as doses do herbicida indaziflam aumentam. Essa redução pode sugerir restrições na capacidade de adsorção do carvão ativado (LLADÓ *et al.*, 2015) ou decorrer do acréscimo da concentração do ingrediente ativo no solo, possivelmente resultando em lixiviação e contato com raízes que se desenvolveram em áreas desprovidas de carvão, ocasionando efeitos tóxicos. No entanto, os efeitos protetores demonstrados ainda foram considerados evidentes e satisfatórios.

Os resultados de Terry *et al.* (2021b) destacam algumas alternativas promissoras para o manejo do solo e semeadura, incluindo o revestimento de sementes com carvão ativado para a proteção contra efeitos indesejados do herbicida indaziflam em gramíneas. A combinação do revestimento com carvão e o tratamento do sulco demonstrou resultados positivos, parcialmente mitigando os efeitos herbicidas na espécie de interesse. Além disso, os autores sugerem que essa abordagem pode ter potencial para mitigar os efeitos sobre outras espécies, fornecendo uma estratégia mais ampla de proteção contra efeitos herbicidas indesejados.

O uso do carvão ativado para mitigar os efeitos herbicidas, especialmente o indaziflam, em espécies de restauração florestal no Brasil, é uma área de pesquisa ainda em desenvolvimento. A escassez de estudos nesse contexto destaca a necessidade de avançar na compreensão desses processos e explorar seu potencial em escalas mais amplas. Os resultados obtidos indicam que o uso do carvão ativado ofereceu maior segurança no contexto do indaziflam, reduzindo os potenciais efeitos fitotóxicos nas espécies testadas. Isso sugere que o carvão ativado pode desempenhar um papel crucial para a viabilização da restauração por semeadura, minimizando os efeitos da competição com plantas daninhas e contribuindo para a recomposição de áreas naturais degradadas.

Os resultados obtidos, embora promissores, precisam ser interpretados com cautela devido às limitações existentes. A variabilidade genética das sementes, que não passaram por processos de melhoramento genético, pode introduzir incertezas nos resultados. Além disso, reduziram-se os ensaios em condições controladas de casa de vegetação e em apenas um tipo de solo, o que pode não refletir, completamente, as condições do campo.

Recomenda-se a realização de novos estudos em condições de campo para melhor compreender os efeitos do carvão ativado na prática e métodos para sua aplicação. Caso os resultados se mantenham consistentes, seria interessante explorar a viabilidade operacional dessa abordagem em larga escala. A transição dos estudos para o ambiente natural possibilitaria uma compreensão mais ampla dos efeitos do carvão ativado em condições de campo, o que poderia impulsionar avanços substanciais na restauração por meio da semeadura direta.

2.5. CONCLUSÕES

O capim-braquiária é sensível ao herbicida indaziflam em diferentes tipos de solo, destacando sua função como bioindicador. O carvão ativado protegeu o capim-braquiária e diversas outras espécies desde a germinação até o estabelecimento inicial das plântulas, sem distinção entre os tipos de solo estudados. O carvão ativado demonstrou eficácia na proteção de espécies florestais e de adubação verde, desde a fase de germinação até o estabelecimento inicial das plântulas, nas condições estudadas.

REFERÊNCIAS

- BAUGHMAN, O. W.; ESHLEMAN, M.; GRIFFEN, J.; RIOS, R.; BOYD, C.; KILDISHEVA, O. A. Assessment of multiple herbicide protection seed treatments for seed-based restoration of native perennial bunchgrasses and sagebrush across multiple sites and years, **PLoS ONE**, v. 18, n. 3, 2023.
- BELTRAME, T. P.; RODRIGUES, E. Comparação de diferentes densidades de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) na restauração florestal de uma área de reserva legal no Pontal do Paranapanema, SP. **Scientia Forestalis**, v.36, n. 80, 2008.
- BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. **Restauração florestal**, São Paulo: Oficina de Textos, 432 p., 2015.
- BRANCALION, P. H. S.; CAMPOE, O.; MENDES, J. C. T.; NOEL, C.; MOREIRA, G. G.; VAN MELIS, J.; STAPE, J. L.; GUILLEMOT, J. Intensive silviculture enhances biomass accumulation and tree diversity recovery in tropical forest restoration. **Ecological Applications**, v. 29, n. 2, 2019.
- BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas, *In*: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOURE, M. H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**, Curitiba: Umnipax Editora, p. 1-37, 2011.
- BURR, R.; LEE, W.; APPLEBY, A. Factors Affecting Use of Activated Carbon to Improve Herbicide Selectivity. **Weed Science**, v. 20, n. 2, p. 180-183, 1972.
- CHAN, K. Y.; VAN ZWIETEN, L.; MESZAROS, I.; DOWNIE, A.; JOSEPH, S. Using poultry litter biochars as soil amendments. **Soil Research**, v. 46, n. 5, p. 437-444, 2008.
- CHAZDON, R.; BRANCALION, P. Restoring forests as a means to many ends, **Science**, v. 365, p. 24-25, 2019.
- CLENET, D. R.; DAVIES, K. W.; JOHNSON, D. D.; KERBY, J. D. Native seeds incorporated into activated carbon pods applied concurrently with indaziflam: a new strategy for restoring annual-invaded communities? **Restoration Ecology**, v. 27, n. 4, p. 738-744, 2019.
- CORREA, M. L. P.; GALVÃO, J. C. C.; FONTANETTI, A.; LEMOS, J. P.; CONCEIÇÃO, P. M. da. Interferência do feijão-de-porco na dinâmica de plantas espontâneas no cultivo do milho orgânico em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 9, n. 2, p. 160-172, 2014.
- D'ANTONIO, C. M.; AUGUST-SCHMIDT, E.; FERNANDEZ-GOING, B. Invasive Species and Restoration Challenges. **Foundations of Restoration Ecology**, e. 2, p. 216-244, 2016.
- DA SILVA, R. D. V.; CORDEIRO, I.; ARZOLLA, F. A. R. D. P. Florestas secundárias do Parque Estadual da Cantareira, São Paulo, SP, Brasil: **Variações florísticas e estruturais**. 2022.

DAVIES, K. W.; BOYD, C. S.; BAUGHMAN, O. W.; CLENET, D. R. Effects of Using Indaziflam and Activated Carbon Seed Technology in Efforts to Increase Perennials in *Ventenata dubia* – Invaded Rangelands. **Rangeland Ecology & Management**, v. 88, p. 70-76, 2023.

DAVIES, K. W.; MADSEN, M. D.; HULET, A. Using activated carbon to limit herbicide effects to seeded bunchgrass when revegetating annual grass-invaded rangelands. **Rangeland Ecology & Management**, v. 70, n. 5, p. 604-608, 2017.

DAVIS, A. S.; JACOBS, D. F.; DUMROESE, R. K. Challenging a paradigm: toward integrating indigenous species into tropical plantation forestry. **Dordrecht: Springer Netherlands**, v. 15, 2012.

DE OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M.; DOS SANTOS, A. M. B. **Controle de plantas daninhas**: métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia, Brasília, DF: Embrapa, 2018.

DIAS, R. C.; GOMES, D. M.; ANUNCIATO, V. M.; BIANCHI, L.; SIMÕES, P. S.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Seleção de espécies bioindicadoras para o herbicida indaziflam, **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 2, 2019.

FLORIDO, F. G. **Controle de plantas competidoras na restauração ecológica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

FLORIDO, F. G.; REGINATO, J. B.; ANDRADE, P. A. M.; ANDREOTE, F. D.; BRANCALION, P. H. S. A comprehensive experimental assessment of glyphosate ecological impacts in riparian forest restoration. **Ecological Applications**, v. 32, n. 1, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. General assembly resolution 73/284, **United Nations Decade on Ecosystem Restoration (2021–2030)**, 2019. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/3794317?ln=en>. Acesso em: 29 jul. 2023.

GLASER, B.; LEHMANN, J.; ZECH, W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal a review. **Biology and fertility of soils**, v. 35, p. 219-230, 2002.

HARTLEY, H. The use of range in analysis of variance. **Biometrika**, v. 37, p. 271-280, 1950.

KARHU, K.; MATTILA, T.; BERGSTRÖM, I.; REGINA, K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – results from short-term pilot field study, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, p. 309–313, 2011.

LEÃO, B. M.; BRAGA, M. A.; PEREIRA, I. M.; SANTOS, G. C. Ecological restoration in pasture areas with direct seeding. **Ciência Florestal** (01039954), v. 32, n. 4, 2022.

LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; CLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant Soil**, n. 249, p. 343-357, 2003.

LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; ALONSO, J. M. Influências do espaçamento de plantio na restauração florestal. In: Leles, P. S. S.; Oliveira Neto, S. N. **Restauração florestal e a Bacia do Rio Guandu**, Seropédica: Edur, 2015, p. 107-140.

LIU, C.; WANG, H.; TANG, X.; GUAN, Z.; REID, B. J.; RAJAPAKSHA, A. U.; OK, Y. S.; SUN, H. Biochar increased water holding capacity but accelerated organic carbon leaching from a sloping farmland soil in China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, p. 995-1006, 2016.

LLADÓ, J.; LAO-LUQUE, C.; RUIZ, B.; FUENTE, E.; SOLÉ-SARDANS, M.; DORADO, A. D. Role of activated carbon properties in atrazine and paracetamol adsorption equilibrium and kinetics, **Process Safety and Environmental Protection**, v. 95, p. 51-59, 2015.

LORENZI, H. 2016. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil** (7ª. edição). Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda. Nova Odessa, São Paulo, vol. 1, 384 p.

MACHADO, V.; SANTOS, J.; PEREIRA, I.; CABRAL, C.; LARA, R.; AMARAL, C. Controle químico e mecânico de plantas daninhas em áreas em recuperação. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 2, p. 139-147, 2012.

MADSEN, M. D.; DAVIES, K. W.; MUMMEY, D. L.; SVEJCAR, T. J. Improving restoration of exotic annual grass-invaded rangelands through activated carbon seed enhancement technologies. **Rangeland Ecology & Management**, v. 67, p. 61-67, 2014.

MAIA, C. M. B. F.; SOHI, S. P. The effect of biochar soil-carbon stabilization in a highly SOM-depleted soil. **Proceedings of the 3rd IBI Conference**, Rio de Janeiro, Brasil, 148 p., 2010.

OMIL, B. *et al.* Soil and tree responses to the application of wood ash containing charcoal in two soils with contrasting properties. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 295, p. 199-212, 2013.

MAIA, F. E. N.; MIRANDA, N. O.; MELO, I. G. C.; VIANA, M. G. P.; GÓIS, S. R. P. Biomassa de feijão de porco sob diferentes densidades de semeadura em Mossoró, RN. **Agropecuária Científica No Semiárido**, v. 9, n. 1, p. 43-49, 2013.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. D. F.; CARVALHO, M. T. D. M.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use-a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 321-344, 2015.

ISERNHAGEN, I.; BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**, São Paulo: LERF/ESALQ. 2009.

PEREIRA, M.R.R.; SOUZA, G.S.F. de; FONSECA, E.D.; MARTINS, D. Subdoses de glyphosate no desenvolvimento de espécies arbóreas nativas. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 326-332, 2015.

PIMENTA, M.; LAMBERT, A.; SHERRILL, E.; DIDONÉ, F.; DIAS, F.; FERREIRA, J.; OLIVEIRA, L.; ALVARENGA, M.; NEVES, O.; BEZERRA, P.; VELLOSO, S.; STEIN CIASCA, B. **Contas de Ecossistemas: O Uso da Terra nos Biomas Brasileiros 2000-2018**, IBGE, 2020.

PIVELLO, V. R. Invasões biológicas no cerrado brasileiro: efeitos da introdução de espécies exóticas sobre a biodiversidade. **Ecologia Info**, n. 33, 2011.

RESENDE, A. S.; LELES, P. S. S. **Controle de plantas daninhas em restauração florestal**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, p. 13-26, 2017.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**, Londrina: Edição dos autores, 2018.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2010.

RUIVO, M. L. P.; AMARANTE, C. B.; OLIVEIRA, M. L. S.; MUNIZ, I. C. M.; SANTOS, D. A. M. Microbial population and biodiversity in Amazonian Dark Earth soils. In: WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLEPRINS, A.; REBELLATO, L. **Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision**. Springer, Dordrecht, 2009. p. 351-362.

SANTANA, G. R.; BRIGANTE, G. P. Efeito da auxina e do carvão ativado no desenvolvimento de mudas de café (*Coffea arabica*). **Revista Agroveterinária do Sul de Minas** - ISSN: 2674-9661, v. 5, n. 1, p. 22-38, 2023.

SANTALLA, M. *et al.* Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 346, p. 63-78, 2011.

SANTOS, F. A. M.; LELES, P. S. S.; SANTANA, J. E. S.; NASCIMENTO, D. F.; MACHADO, A. F. L. Controle químico de plantas daninhas em povoamentos de restauração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

SCHULZ, H.; GLASER, B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 3, p. 410-422, 2012.

SEBASTIAN, D. J.; FLEMING, M. B.; PATTERSON, E. L.; SEBASTIAN, J. R.; NISSEN, S. J. Indaziflam: a new cellulose-biosynthesis-inhibiting herbicide provides

long-term control of invasive winter annual grasses. **Pest Management Science**, v. 73, n. 10, 2017.

SILVA, A. A.; FERREIRA, F. A.; FERREIRA, L. R.; SANTOS, J. B. Métodos de controle de plantas daninhas. *In*: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**, Viçosa: Ed, UFV. p. 63-81, 2009.

SILVA, W. M. **Aplicação de biochar de resíduos de café em Neossolo Regolítico: efeitos nas características químicas e biológicas e na produção de milho e feijão**. Recife, 2016. 57 f. Dissertação (Mestrado em Produção Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2016.

SOUZA, D. C. **Avanços, desafios e diretrizes para a restauração ecológica por semeadura direta de espécies arbóreas**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.

OLIVEIRA, F. S. de.; DESTEFANI, J. D.; TAVARES, L. R.; PASCHOA, J. C. da CRESPO, A. M.; ARAUJO, O. P.; PEIXOTO, P. M. C.; SIQUEIRA, C. B.; CORTAT, L. H.; SOUZA, M. N. Microrganismos simbiotes: fixação biológica de nitrogênio e recuperação de pastagens degradadas. *In*: SOUZA, Mauricio Novaes (Org.). **Tópicos em recuperação de áreas degradadas**, v. 2. Canoas, RS: Méricadas Publishers, 2021.

TERRY, T. J.; MADSEN, M. D.; GILL, R. A.; ANDERSON, V. J.; ST. CLAIR, S. B. Herbicide effects on the establishment of a native bunchgrass in annual grass invaded areas: Indaziflam versus imazapic. **Ecological Solutions and Evidence**, v. 2, n. 1, 2021a.

TERRY, T. J.; MADSEN, M. D.; GILL, R. A.; ANDERSON, V. J.; ST. CLAIR, S. B. Selective herbicide control: using furrows and carbon seed coatings to establish a native bunchgrass while reducing cheatgrass cover. **Restoration Ecology**, v. 29, n. 5, 2021b.

VERHEIJEN, F.; JEFFERY, S.; BASTOS, A. C.; Van der VELDE, M.; DIAFAS, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. **EUR 24099**, p. 162, 2010.

YAMATO, M.; OKIMORI, Y.; WIBOWO, I. F.; ANSHORI, S.; OGAWA, M. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. **Soil science and plant nutrition**, v. 52, n. 4, p. 489-495, 2006.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O carvão ativado demonstrou eficácia na retenção do herbicida indaziflam em solução, destacando-se como promissor para a remoção desse composto químico. A escolha da marca comercial de carvão ativado é crucial, pois diferentes marcas podem apresentar variações significativas em sua capacidade de retenção do ingrediente ativo.

Além disso, o carvão ativado parece desempenhar um papel benéfico na proteção de bioindicadores contra os efeitos fitotóxicos do indaziflam. Especificamente, a germinação e o desenvolvimento inicial da espécie gramínea *Urochloa decumbens*, sensível a esse herbicida, foram favorecidos na presença desse material.

A observação do expressivo desenvolvimento de nove espécies, incluindo aquelas utilizadas na restauração florestal em semeadura (duas espécies de adubos verdes e sete espécies florestais de diferentes estágios ecológicos sucessionais), sugere que o carvão ativado pode ter um impacto positivo para o crescimento dessas plantas em ambientes tratados com indaziflam.

Esses resultados destacam o potencial do carvão ativado não apenas como um agente de remoção de herbicidas, mas também como um componente que pode beneficiar o desenvolvimento de manejos da matocompetição utilizando o herbicida indaziflam. Desta forma, programas de restauração podem ser beneficiados de forma a potencializar suas chances de sucesso e aceleração dos compromissos com as florestas nativas. No entanto, é importante conduzir estudos adicionais para validar e entender melhor esses efeitos benéficos no campo e garantir a seleção adequada de marcas comerciais de carvão ativado para otimizar a eficácia do processo de sorção.

REFERÊNCIAS

- BRANCALION, P. H. S.; MELI, P.; TYMUS, J. R. C.; LENTI, F. E. B.; BENINI, R. M.; SILVA, A. P. M.; ISERNHAGEN, I.; HOLL, K. D. What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. **Biological Conservation**, v. 240, n. February, p. 108274, 2019.
- BRABHAM, C.; LEI, L.; GU, Y.; STORK, J.; BARRETT, M.; DEBOLT, S. Indaziflam herbicidal action: A Potent Cellulose Biosynthesis Inhibitor. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1177-1185, 2014.
- BURR, R.; LEE, W.; APPLEBY, A. Factors Affecting Use of Activated Carbon to Improve Herbicide Selectivity. **Weed Science**, v. 20, n. 2, p. 180-183, 1972.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; MENDES, J. C. T. Can intensive management accelerate the restoration of Brazil's Atlantic forests? **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1808-1814, 2010.
- CELIS, R.; HERMOSÍN, M. C.; CARRIZOSA, M. J.; CORNEJO, J. Inorganic, and organic clays as carriers for controlled release of the herbicide hexazinone. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 8, p. 2324-2330, 2002.
- CORREIA, N. M. **Comportamento dos herbicidas no ambiente**, Embrapa Hortaliças, 2018.
- CORREIA, F. V.; LANGENBACH, T.; CAMPOS, T. M. Avaliação do transporte de atrazina em solos sob diferentes condições de manejo agrícola. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 34, n. 2, p. 525–534, 2010.
- DAVIES, K. W.; BOYD, C. S.; BAUGHMAN, O.W.; CLENET, D.R. Effects of Using Indaziflam and Activated Carbon Seed Technology in Efforts to Increase Perennials in *Ventennata dubia* – Invaded Rangelands, **Rangeland Ecology & Management**, v. 88, p. 70-76, 2023.
- DIAS, R. C.; GOMES, D. M.; ANUNCIATO, V. M.; BIANCHI, L.; SIMÕES, P. S.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Seleção de espécies bioindicadoras para o herbicida indaziflam. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 2, 2019.
- EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194611/1/Visao-2030-o-futuro-da-agricultura-brasileira.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2023.
- FREITAS, M. A. M.; PASSOS, A. B. R. J.; TORRES, L. G.; MORAES, H. M. F.; FAUSTINO, L. A.; ROCHA, P. R. R.; SILVA, A. A. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta Daninha**, v. 32, n. 2, p. 385-392, 2014.
- GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PEREIRA, A. S.; MARCUS, B.; MATALLO, M. B.; LUCHINI, L. C. Movimento do herbicida tebutiuram em dois solos representativos

das áreas de recarga do aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 479-483, 2006.

GUERRA, N.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; DE OLIVEIRA NETO, A. M.; BRAZ, G. B. P. Aminocyclopyrachlor e indaziflam: Seletividade, controle e comportamento no ambiente. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 285-295, 2013.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Registro de Agrotóxicos de Uso Não Agrícola**-Governo Federal, Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/registros/registro-de-agrotoxicos-de-uso-nao-agricola>. Acesso em: 20 jul. 2023.

PRETE, M. C.; OLIVEIRA, F. M.; TARLEY, C. R. T. Assessment on the performance of nano-carbon black as an alternative material for extraction of carbendazim, tebuthiuron, hexazinone, diuron and ametryn. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 93-102, 2017.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito Residual no solo ("Carryover"). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011.

MEHDIZADEH, M.; ALEBRAHIM, M. T.; ROUSHANI, M. Determination of Two Sulfonylurea Herbicides Residues in Soil Environment Using HPLC and Phytotoxicity of These Herbicides by Lentil Bioassay. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, p. 1-7, 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agrofit**, Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 20 jul. 2023.

MORAES, R. F. **Agrotóxicos no Brasil**: padrões de uso, política da regulação e prevenção da captura regulatória. Brasília: IPEA. 2019, p. 39.

OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Omnipax. Curitiba, 2011, p. 263-304.

OLIVEIRA JR., R. S.; REGITANO, J. B. Dinâmica de pesticidas no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. Minas Gerais, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, p.187-248, 2009.

PEREIRA, G. A. M.; BARCELLOS JUNIOR, L. H.; GONÇALVES, V. A.; SILVA, V.; SILVA, A. A. Clomazone leaching estimate in soil columns using the biological method. **Planta Daninha**, v. 35, e017163378, 2017.

TEJU, E.; TADESSE, B.; MEGERSA, N. Salting-out assisted liquid-liquid extraction for the preconcentration and quantitative determination of 8 herbicide residues simultaneously in different water samples with high-performance liquid chromatography. **Separation Science and Technology**, v. 56, n. 4, p. 719-729, 2017.

WEIDLICH, E.; FLORIDO, F.; SORRINI, T.; BRANCALION, P. Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 9, p. 1806-1817, 2020.

SEBASTIAN, D. J.; NISSEN, S.J.; SEBASTIAN, J.R.; MEIMAN, P. J.; GEORGE BECK, K. Preemergence control of nine invasive weeds with aminocyclopyrachlor, aminopyralid, and indaziflam. **Invasive Plant Science and Management**, v. 10, p. 99-109, 2017b.

SEBASTIAN, D. J.; NISSEN, S.J.; WESTRA, P.; SHANER, D.L.; BUTTERS, G. Influence of soil properties and soil moisture on the efficacy of indaziflam and flumioxazin on *Kochia scoparia* L. **Pest management science**, v. 73, n. 2, p. 444-451, 2017a.

YAVARI, S.; MALAKAHMAD, A.; SAPARI, N. B.; YAVARI, S. Sorption-desorption mechanisms of imazapic and imazapyr herbicides on biochars produced from agricultural wastes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 4, p. 3981-3989, 2016.

APÊNDICE A – Análise da homogeneidade das variâncias residuais (F_{máximo}), entre os experimentos realizados em duplicata, para acúmulo de massa seca na parte aérea, raiz e total de plantas do capim-braquiária após aplicação de indaziflam em diferentes texturas de solo com e sem carvão ativado

Experimento	QMe		
	Parte aérea	Raiz	Total
Areia			
1	0,1635	0,8711	0,0543
2	0,0234	0,4422	0,0868
F máximo	69,872	19,699	15,985
Solo arenoso			
1	0,1293	0,0747	0,0575
2	0,2703	0,2905	0,1214
F máximo	20,905	38,889	21,113
Solo argiloso			
1	0,0781	0,4422	0,2089
2	0,0170	0,0842	0,0521
F máximo	45,941	52,518	40,096

APÊNDICE B – Análise da homogeneidade das variâncias residuais (F_{máximo}), entre os experimentos realizados em duplicata, para porcentagem de germinação de nove espécies da restauração florestal sob diferentes condições de aplicação de carvão ativado e do herbicida indaziflam

Experimento	QMe		
	Germinação (%)		
	<i>Peltophorum dubium</i>	<i>Croton floribundus</i>	<i>Handroanthus vellosi</i>
1	3810,3230	8529,5815	8339,6933
2	3721,4163	3753,3400	2423,6119
F máximo	1,0239	2,2725	3,4410
	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	<i>Platypodium elegans</i>	<i>Guazuma ulmifolia</i>
1	2799,8800	299,23409	6477,06075
2	4665,9141	914,92297	7350,34297
F máximo	1,6665	3,0575	1,1348
	<i>Senna multijuga</i>	<i>Canavalia ensiformis</i>	<i>Cajanus cajan</i>
1	1093,44001	1081,24298	6592,46963
2	5051,86815	6672,07409	6225,25926
F máximo	4,6202	6,1707	1,0590

APÊNDICE C – Análise física e química dos solos

Descrição	Solo Arenoso	Solo Médio	Solo Argiloso
Areia	66,3%	584 g dm ⁻³	37,7
Areia Grossa	35,8%	-	17,4%
Areia Fina	30,5%	-	20,3%
Argila	18,0%	371 g dm ⁻³	42,0%
Silte	15,7%	45 g dm ⁻³	20,3%
Matéria Orgânica	4,3%	8 g dm ⁻³	4,3%