

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**Richardson Fernandes de Souza**

**Disponibilidade de luz e a avaliação da eficácia de controle de plantas daninhas  
por 2,4-D e dicamba**

**Montes Claros**

**2026**

Richardson Fernandes de Souza

**Disponibilidade de luz e a avaliação da eficácia de controle de plantas daninhas  
por 2,4-D e dicamba**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo David Tuffi Santos

Coorientador: Dr. Luan Mateus Silva Donato

Montes Claros

Janeiro de 2026

Souza, Richardson Fernandes de.

S719d  
2026      Disponibilidade de luz e a avaliação da eficácia de controle de plantas daninhas por 2,4-d e dicamba [manuscrito] / Richardson Fernandes de Souza. Montes Claros, 2026. 84 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Leonardo David Tuffi Santos.

Banca examinadora: Alcinei Místico Azevedo, Evander Alves Ferreira, Leonardo David Tuffi Santos, Otávio Cardoso Filho.

Inclui referências: f. 20-26, 52-56, 77-83.

1. Pragas agrícolas - Controle integrado - Teses. 2. Herbicidas - Teses. 3. Fotoquímica - Teses. I. Santos, Leonardo David Tuffi. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 632


### ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 28 dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e seis, às 8:00 horas, sob a Presidência do Professor Leonardo David Tuffi Santos, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Alcinei Místico Azevedo, D. Sc. (UFMG/ICA), Otávio Cardoso Filho, D. Sc. (Unimontes) e do Professor Evander Alves Ferreira, D. Sc. (UFVJM), reuniu-se, presencialmente, a Banca de Defesa de Dissertação de **Richardson Fernandes de Souza**, aluno do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Após avaliação da defesa de Dissertação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa de Dissertação intitulada: **“Disponibilidade de luz e a avaliação da eficácia de controle de plantas daninhas por 2,4-D e dicamba”**, sendo o aluno considerado **aprovado**. E, para constar, eu, Professor Leonardo David Tuffi Santos, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 65 do regulamento do Curso de Mestrado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

**Art. 65 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.**


Montes Claros, 28 de janeiro de 2026.

Documento assinado digitalmente  
 LEONARDO DAVID TUFFI SANTOS  
 Data: 28/01/2026 14:59:42-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Leonardo David Tuffi Santos  
 Orientador

Documento assinado digitalmente  
 ALCINEI MISTICO AZEVEDO  
 Data: 28/01/2026 18:34:27-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Alcinei Místico Azevedo  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 OTAVIO CARDOSO FILHO  
 Data: 28/01/2026 19:17:45-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Otávio Cardoso Filho  
 Membro

Documento assinado digitalmente  
 EVANDER ALVES FERREIRA  
 Data: 28/01/2026 15:14:35-0300  
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Evander Alves Ferreira  
 Membro

## **Agradecimentos**

A Deus, pelo dom da vida, por me conceder coragem, fé, esperança, amor, pôr me iluminar e ajudar a vencer as batalhas de todo dia e por todas as coisas boas que coloca no meu destino.

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA-UFMG) pela formação, infraestrutura e realização do trabalho.

Aos meus pais, Anilson Fernandes de Souza e Tereza Alves Santa Rosa de Souza, pelo grande incentivo e apoio.

Aos meus irmãos, Handray Fernandes de Souza e Dárconys Fernandes de Souza, pelo incentivo e amizade.

Ao meu orientador, Dr. Leonardo David Tuffi Santos, no qual tenho enorme respeito e admiração. Agradeço pela orientação, paciência, ensinamentos e confiança depositada em mim.

Ao meu Coorientador Dr. Luan Mateus Silva Donato, a professora Dra. Clívia Carolina Possobom, ao Professor Dr. Alcinei Místico Azevedo e ao Dr. Evander Alves Ferreira pelo apoio e orientação nos trabalhos na dissertação.

A todos os amigos do laboratório de Biologia e Manejo Integrado de Plantas Daninhas, com o qual desfrutei muito conhecimento. Obrigado pelo apoio e incentivos.

Aos órgãos de fomento FAPEMIG e CNPq pelo financiamento do projeto que possibilitaram a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Código de Financiamento 001.

Por fim, a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para conquistar esse objetivo.

**Meu muito obrigado!**

## Epígrafe

*“Tudo com o tempo tem tempo e o tempo só é ruim para aqueles que não sabem esperar”*

(O Som do Povo)

## RESUMO

As plantas daninhas representam um dos principais fatores que comprometem a produtividade agrícola, sendo o controle químico amplamente adotado devido à sua eficiência e viabilidade operacional. No entanto, a intensidade luminosa pode modificar a morfofisiologia das plantas daninhas e influenciar na sua sensibilidade aos herbicidas e comprometer a precisão e a confiabilidade dos métodos tradicionais utilizados para a avaliação do controle. Diante disso, os objetivos com o trabalho foram: 1- investigar a influência da luminosidade na eficácia do 2,4-D e dicamba em *Euphorbia heterophylla*; 2 - desenvolver e validar uma abordagem baseada em visão computacional para a avaliação do controle de *Commelina benghalensis* com 2,4-D e dicamba sob diferentes condições de luz. O primeiro objetivo foi contemplado com dois experimentos, conduzidos em delineamento de blocos casualizados com 5 repetições, em esquema fatorial 2 x 6, onde o primeiro fator foi constituído por 2 ambientes de cultivo (pleno sol e 73% de sombreamento) em ambos experimentos e o segundo fator no primeiro experimento, foi composto pelas doses 0, 120, 240, 360, 480 e 720 g por ha<sup>-1</sup> de equivalente ácido de dicamba (XTENDICAM<sup>®</sup>, 480 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba) e no segundo experimento, pelas doses 0, 168, 335, 503, 670, 1.005 g e. a. L<sup>-1</sup> de 2,4-D (AMINOL<sup>®</sup> 806, 670 g e. a. L<sup>-1</sup>) que foram aplicadas aos 50 dias após a semeadura de *E. heterophylla*. As plantas cultivadas em pleno sol apresentaram maior teor de cera epicuticular, maior acúmulo de carboidratos e menor sensibilidade aos herbicidas. Em contrapartida, plantas mantidas sob sombreamento exibiram maior suscetibilidade, alcançando controle excelente a partir da dose de 335 g e. a. L<sup>-1</sup> de 2,4-D, enquanto o dicamba apresentou eficácia limitada, com melhor efetividade em sombreamento e na maior dose avaliada. O aumento das doses dos herbicidas e a redução da luminosidade promoveram decréscimo da massa seca, taxa de transporte de elétrons e dos espaços intercelulares, evidenciando plasticidade fisiológica e anatômica da espécie em resposta à luminosidade e a exposição ao estresse químico. O segundo objetivo foi contemplado com dois experimentos conduzidos em delineamento de blocos casualizados com 5 repetições, no esquema fatorial 2 x 6, onde o primeiro fator foi constituído por 2 ambientes de cultivo (pleno sol e 82% de sombreamento) e o segundo fator no primeiro experimento, foi composto pelas doses 0, 120, 240, 360, 480 e 720 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba (XTENDICAM<sup>®</sup>, 480 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba) e no segundo experimento, pelas doses 0, 168, 335, 503, 670, 1.005 g e. a. L<sup>-1</sup> de 2,4-D (AMINOL<sup>®</sup> 806, 670 g e. a. L<sup>-1</sup>). As doses de herbicida foram aplicadas sobre plantas de *C. benghalensis* aos 30 dias após o transplantio das mudas. Foram obtidas imagens de *C. benghalensis* com um *smartphone* e através das imagens foram estimados 25 índices de vegetação como variáveis de entrada, buscando-se estimar o controle com base nos dados de avaliação visual. Imagens RGB obtidas por *smartphone*, associadas a índices de vegetação e ao algoritmo Random Forest, permitiram estimar com boa precisão o controle de *Commelina benghalensis*, principalmente para o 2,4-D, além de desempenho satisfatório quando ambos os herbicidas foram avaliados conjuntamente. Os resultados demonstram que a luminosidade é fator determinante na eficácia dos herbicidas mimetizadores de auxina e que a visão computacional constitui uma alternativa objetiva, eficiente e de baixo custo para a avaliação do controle de plantas daninhas.

**Palavras-chave:** Intensidade luminosa, mimetizadores de auxinas, índices de vegetação, imagens RGB, Visão computacional.

## ABSTRACT

Weeds are among the main factors limiting agricultural productivity, and chemical control has been adopted due to its efficiency and operational feasibility. However, light intensity can alter weed morphophysiology, influencing their sensitivity to herbicides and compromising the accuracy and reliability of traditional methods used to assess control. Therefore, the objectives of this study were: (1) to investigate the influence of light conditions on the efficacy of 2,4-D and dicamba in *Euphorbia heterophylla*; and (2) to develop and validate a computer vision-based approach for evaluating the control of *Commelina benghalensis* using 2,4-D and dicamba under different light conditions. The first objective was addressed through two experiments conducted in a randomized complete block design with five replicates, arranged in a  $2 \times 6$  factorial scheme. The first factor consisted of two growing environments (full sun and 73% shading) in both experiments. The second factor, in the first experiment, consisted of dicamba doses of 0, 120, 240, 360, 480, and 720 g ha<sup>-1</sup> of acid equivalent (XTENDICAM®, 480 g a.e. L<sup>-1</sup>), and in the second experiment, 2,4-D doses of 0, 168, 335, 503, 670, and 1,005 g ha<sup>-1</sup> of acid equivalent (AMINOL® 806, 670 g a.e. L<sup>-1</sup>), applied at 50 days after sowing of *E. heterophylla*. Plants grown under full sun showed higher epicuticular wax content, greater carbohydrate accumulation, and lower herbicide sensitivity. In contrast, shaded plants exhibited greater susceptibility, achieving excellent control starting at 335 g ha<sup>-1</sup> of 2,4-D, whereas dicamba showed limited efficacy, with better performance under shading and at the highest evaluated dose. Increasing herbicide doses and reduced light availability led to decreases in dry mass, electron transport rate, and intercellular spaces, demonstrating the physiological and anatomical plasticity of the species in response to light and chemical stress. The second objective was addressed through two experiments conducted in a randomized complete block design with five replicates, in a  $2 \times 6$  factorial scheme. The first factor consisted of two growing environments (full sun and 82% shading). The second factor, in the first experiment, consisted of dicamba doses of 0, 120, 240, 360, 480, and 720 g a.e. ha<sup>-1</sup> (XTENDICAM®, 480 g a.e. L<sup>-1</sup>), and in the second experiment, 2,4-D doses of 0, 168, 335, 503, 670, and 1,005 g a.e. ha<sup>-1</sup> (AMINOL® 806, 670 g a.e. L<sup>-1</sup>). Herbicide applications were performed on *C. benghalensis* plants at 30 days after transplanting. Images of *C. benghalensis* were acquired using a smartphone, and from these images, 25 vegetation indices were estimated as input variables to predict control based on visual assessment data. RGB images obtained via smartphone, combined with vegetation indices and the Random Forest algorithm, allowed accurate estimation of *Commelina benghalensis* control, particularly for 2,4-D, and also showed satisfactory performance when both herbicides were evaluated together. The results demonstrate that light conditions are a determining factor in the efficacy of auxin-mimicking herbicides and that computer vision represents an objective, efficient, and low-cost alternative for evaluating weed control.

**Keywords:** Light intensity, auxin mimics, vegetation indices, RGB images, computer vision.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | 10 |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....   | 12 |
| 2.1 Objetivo geral .....   | 12 |
| 2.2 Objetivos específicos .....  | 12 |
| <b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | 13 |
| <b>3.1 Histórico do uso de herbicidas na Agricultura</b> .....   | 13 |
| <b>3.2 Dicamba e 2,4-D</b> .....   | 14 |
| <b>3.3 <i>Euphorbia heterophylla</i> L. e <i>Commelina benghalensis</i> L.</b> .....   | 15 |
| <b>3.4 Restrição luminosa no desenvolvimento de plantas daninhas e na eficiência de herbicidas</b> .....   | 16 |
| <b>3.5 Avaliação do controle químico de plantas daninhas e avanços com imagens digitais e aprendizado de máquina</b> .....   | 18 |
| Referencias .....  | 20 |
| <b>4 ARTIGOS</b> .....   | 27 |
| <b>4.1 Artigo I – Influência da intensidade luminosa na eficácia do 2,4-D e do dicamba no controle de <i>Euphorbia heterophylla</i> L.</b> .....                       | 27 |
| <b>4.2 Artigo II – Modelagem computacional a partir de imagens na avaliação do controle de plantas daninhas por 2,4-D e dicamba sob diferentes luminosidades</b> ..... | 57 |
| <b>5 Considerações finais</b> .....  | 84 |

## 1 INTRODUÇÃO

A relevância das espécies de plantas daninhas *Commelina benghalensis* L. e *Euphorbia heterophylla* L. nos sistemas agrícolas tropicais está diretamente associada à elevada plasticidade fenotípica, à capacidade adaptativa frente a diferentes condições ambientais e ao impacto negativo que exercem sobre as culturas. Conhecida como trapoeraba, *C. benghalensis*, é uma espécie perene ou semiperene, caracterizada por crescimento prostrado, elevada capacidade de enraizamento nos nós e reprodução tanto sexuada quanto vegetativa, incluindo a produção de sementes aéreas e subterrâneas, o que contribui para sua persistência em áreas agrícolas e para a dificuldade de seu controle (Costa *et al.*, 2021; Gazziero *et al.* 2020). A espécie apresenta elevada tolerância ao sombreamento, sendo frequentemente favorecida em sistemas de plantio direto, consórcios culturais e áreas com fechamento precoce do dossel, nos quais consegue manter crescimento ativo e competitividade mesmo sob baixa disponibilidade de radiação solar (Costa *et al.*, 2021).

*Euphorbia heterophylla*, por sua vez, é uma das principais dicotiledôneas infestantes de culturas anuais e perenes no Brasil, destacando-se pelo rápido crescimento inicial, elevada produção de sementes e forte competição por recursos como luz, água e nutrientes (Galon *et al.*, 2018). Além disso, essa espécie apresenta histórico amplamente documentado de evolução de resistência e tolerância a herbicidas de diferentes mecanismos de ação, o que a torna um desafio constante para o manejo e um modelo relevante para estudos sobre adaptação e dinâmica populacional de plantas daninhas em agroecossistemas intensivos (Mendes e Silva *et al.*, 2023).

No manejo químico dessas plantas daninhas, os herbicidas mimetizadores de auxina 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) e dicamba (ácido 3,6-dicloro-2-metoxibenzoico) assumem papel central devido à sua eficácia no controle e à ampla utilização em sistemas agrícolas convencionais e com culturas geneticamente modificadas tolerantes. Esses herbicidas atuam como análogos do ácido indolacético (AIA), promovendo desregulação hormonal, crescimento celular desordenado, epinastia de caules e folhas, alterações na diferenciação vascular e aumento da respiração, levando à morte das plantas suscetíveis (Zuanazzi *et al.*, 2020). O 2,4-D permanece como uma das moléculas mais utilizadas globalmente em razão de sua eficiência e baixo custo, enquanto o dicamba tem ganhado destaque recente em função de sua associação a

tecnologias transgênicas e ao manejo de plantas daninhas resistentes (Zuanazzi *et al.*, 2020). Entretanto, a eficácia desses herbicidas pode ser influenciada por fatores ambientais, como a luz disponível no ambiente de cultivo.

Do ponto de vista fisiológico e anatômico, plantas daninhas apresentam atributos estruturais como cutícula e ceras epicuticulares que influenciam a absorção e a eficiência dos herbicidas, os quais podem variar conforme o ambiente (Mendes e Silva, 2023). Estudos anatômicos demonstram que *C. benghalensis* possui folhas com cutícula espessa, elevada deposição de ceras epicuticulares e presença de tricomas, constituindo barreiras físicas à penetração de herbicidas (Monquero *et al.*, 2004b). Fisiologicamente, essa espécie apresenta elevada eficiência no uso da luz em ambientes sombreados, com aumento da área foliar específica, ajustes na razão clorofila a/b e manutenção da assimilação de carbono mesmo sob baixa irradiância, o que favorece sua persistência e competitividade (Santos Júnior *et al.* 2019). Já as plantas de *E. heterophylla*, espécie de metabolismo fotossintético C3, apresenta plasticidade anatômica e fisiológica em resposta ao sombreamento. Estudos indicam que sob condições de sombreamento folhas de plantas C3 desenvolvem menor espessura do mesófilo e da densidade estomática, além de alterações fisiológicas que resultam em menor taxa fotossintética e crescimento reduzido (Vidal; Trezzi, 2000; Taiz *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2024a).

As modificações morfoanatômicas e fisiológicas apresentadas por plantas daninhas sombreadas podem influenciar a absorção, translocação e eficácia de herbicidas mimetizadores de auxinas. Adicionalmente, o sombreamento é um fator determinante na dinâmica de crescimento e competitividade das plantas, o que reforça a importância do conhecimento da luminosidade incidente no ambiente de cultivo sobre as estratégias de manejo das plantas daninhas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a influência da luminosidade disponível no ambiente com as alterações morfoanatômicas, fisiológicas e metabólicas e o manejo de plantas daninhas por herbicidas usados em pós-emergência.

### **2.2 Objetivos específicos**

Avaliar o efeito de diferentes condições de luminosidade sobre a ação do dicamba e 2,4-D no controle de *E. heterophylla* e *C. benghalensis* e sua relação com as características morfoanatômicas, fisiológicas e metabólicas das plantas.

Avaliar a eficiência do uso da visão computacional por meio de *Random Forest* na eficácia da avaliação de controle de *C. benghalensis* pelos herbicidas dicamba e 2,4-D em diferentes condições de luminosidade, com uso de imagens de smartphone com sensores RGB.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Histórico do uso de herbicidas na Agricultura

A agricultura começou a ser praticada há cerca de 10.000 anos durante a Revolução Neolítica (Bowles; Choi, 2019). Esse período marcou a transição das sociedades humanas de um estilo de vida de caça e coleta para um estilo de vida baseado na agricultura e na domesticação de animais (Bowles; Choi, 2019). Ao decorrer dos anos, a agricultura veio passando por diversas fases e revoluções tecnológicas como a Revolução agrícola, Revolução Industrial e Revolução Verde, eventos que promoveram a modernização do sistema de produção agrícola com a introdução de novas tecnologias que favoreceram a produção em larga escala (Salomão; Ferro; Ruas, 2020).

Uma dessas tecnologias é o uso de agrotóxicos que é empregado desde a Segunda Guerra Mundial, quando as indústrias químicas que fabricavam venenos utilizados como armas químicas começaram a empregar seus produtos na agricultura. Diante os avanços nas pesquisas com essa nova descoberta e o início da Revolução Verde, houve a intensificação do uso destes produtos visto que essas substâncias foram adaptadas para o controle de plantas daninhas e outras pragas, revolucionando a produção agrícola ao aumentar a eficiência de produção (Tudi *et al.*, 2021).

Dentre os diversos tipos de controle de plantas daninhas existentes, o uso de herbicidas é o mais utilizado na agricultura moderna devido a melhor eficiência, rapidez e viabilidade em relação aos outros métodos, principalmente em plantios em larga escala (Mendes; Silva, 2023). Em escala global, os herbicidas constituem a principal classe de agrotóxicos em termos de volume aplicado, representando cerca de 40 a 50% do total de pesticidas utilizados, superando inseticidas e fungicidas (Benbrook, 2016; Parveen *et al.*, 2025).

O predomínio de herbicidas químicos em sistemas agrícolas intensivos está amplamente documentado, com o glyphosate sendo o herbicida mais utilizado no mundo e outros compostos como 2,4-D e atrazine também empregados com frequência no manejo de plantas daninhas (Merotto Jr. *et al.*, 2022; Benbrook, 2016; Freisthler *et al.*, 2022; Oreja, 2024). No contexto agrônomico brasileiro, os herbicidas correspondem à maior parcela das vendas de agrotóxicos, com destaque para o glyphosate como o produto mais comercializado, seguido pelo 2,4-D, o que evidencia a forte dependência do manejo químico nos sistemas de produção agrícola (Ibama, 2024; Barroso *et al.*, 2025). Apesar

dos benefícios agrônômicos associados a essa prática, o uso inadequado e intensivo de herbicidas pode acarretar impactos ambientais significativos, como a contaminação de recursos hídricos (Medalie *et al.*, 2020), do solo (Lupi *et al.*, 2019) e de organismos não alvos (Wan *et al.*, 2025). Além disso, quando utiliza herbicidas de mesmo mecanismo de ação constantemente, ocorre uma pressão de seleção de plantas daninhas. Essa pressão seleciona indivíduos resistentes ao herbicida devido a variabilidade genética dentro da população de plantas e as mesmas podem gerar descendentes com características idênticas, assim aumentando o número de indivíduos resistentes em comparação aos suscetíveis (Salomão; Ferro; Ruas, 2020).

Atualmente a trapoeraba (*Commelina benghalensis*) e o leiteiro (*Euphorbia heterophylla*) figuram entre as espécies daninhas problemáticas em sistemas de produção devido a tolerância e a resistência ao herbicida glyphosate, respectivamente (Lucio *et al.*, 2019; Palma-Bautista *et al.*, 2020) e a dificuldade de controle com outros herbicidas como o dicamba e o 2,4-D (Santos *et al.*, 2002; Osipe *et al.*, 2017). Contudo, há necessidade de criar estratégias mais sustentáveis e eficazes para o manejo e controle dessas plantas daninhas.

### 3.2 Dicamba e 2,4-D

O ácido 3,6-dicloro-2-metoxibenzoico (dicamba) e o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) são herbicidas seletivos, pertencentes a classe dos mimetizadores de auxina, sistêmico e utilizado em aplicações em pós-emergência das plantas daninhas (Pereira *et al.*, 2020).

Os mimetizadores de auxina marcaram um avanço histórico no controle das plantas daninhas, com destaque ao 2,4-D que foi a primeira molécula orgânica sintetizada pelas indústrias químicas na década de 1940 a ser empregada como herbicida no controle de plantas daninhas de folhas largas (dicotiledôneas) sem afetar as culturas de interesse pertencentes a família das gramíneas (Peterson *et al.*, 2016). Logo depois, em 1958 foi descoberto o dicamba (Grossmann, 2010). Esses herbicidas estão registrados com indicação de uso em culturas como milho, cana-de-açúcar, pastagens e para soja geneticamente modificada (Agrofit, 2025).

As auxinas são hormônios vegetais que em concentrações normais atuam no crescimento e divisão celular, fototropismo e geotropismo da planta (Taiz *et al.*, 2017). Dessa forma, os herbicidas mimetizadores de auxinas são substâncias sintéticas que imitam a ação das auxinas em concentrações excessiva. Eles promovem um crescimento

acelerado devido o desbalanço hormonal que causam nas células, o qual induz a atividade das enzimas RNA polimerase e CM celulase, e conseqüentemente aumenta a síntese de proteínas e ácidos nucleicos dentro da célula. Isso resulta na produção de carboximetilcelulase que é uma enzima que atua degradando a celulose presente na parede celular, conferindo uma maior flacidez à parede. Essa maior flacidez juntamente com o incremento de síntese de proteína e ácido nucleico diminui o potencial osmótico da célula, facilitando a entrada de água com maior rapidez, favorecendo o crescimento e multiplicação celular. Esse crescimento desordenado causa encarquilhamento e epinastia das folhas e caule, interrupção no fluxo de floema, gerando danos nas relações fonte e dreno, levando as plantas até a morte (Grossmann, 2010; Sarkar *et al.*, 2024).

O 2,4-D é o principal herbicida mimetizador de auxina utilizado em pastagens, sendo o segundo ingrediente ativo mais comercializado no Brasil (Ibama, 2023), enquanto o dicamba apresenta uso ainda limitado nesses sistemas. O glyphosate permanece como o herbicida de maior uso em escala global (Ahuja *et al.*, 2024). No entanto, a seleção de biótipos de plantas daninhas com resistência ou tolerância a esse herbicida, tem impulsionado a necessidade de diversificação das estratégias de controle químico. Nesse contexto, a introdução comercial de cultivares de soja tolerantes ao dicamba (Henry *et al.*, 2024) e ao 2,4-D (Conkesta E3), amplia as alternativas para o manejo de plantas daninhas, favorecendo a intensificação do uso desses herbicidas auxínicos.

### **3.3 *Euphorbia heterophylla* L. e *Commelina benghalensis* L.**

*Euphorbia heterophylla*, popularmente conhecida como leiteira, amendoim bravo, flor-de-poetas, café-do-diabo, entre outros, é uma espécie nativa do continente americano, pertencente à família Euphorbiaceae (Lorenzi, 2014). É uma planta de ciclo reprodutivo curto, herbácea, ereta, leitosa que pode chegar até 80 cm de altura. Possui raiz pivotante, caule cilíndrico esverdeado e folhas glabras, alternas de formato e tamanho variável (Lorenzi, 2014). Sua propagação é feita através de sementes que são lançadas a longas distâncias pela abertura explosiva dos frutos (Lorenzi, 2000).

A espécie tem capacidade de germinar em condições adversas, o que contribui na sua ocorrência em diferentes regiões pelo mundo (Chauhan, 2012). É considerada planta daninha que afeta culturas anuais e perenes como soja (Carvalho; Bianco; Guzzo, 2010), milho (Galon *et al.*, 2021) e cana-de-açúcar (Castro *et al.*, 2023). Além de competir por água, luz e nutrientes, possui rápido crescimento inicial que causa sombreamento sobre

as plantas de crescimento lento, diminuindo o rendimento das culturas (Kismann; Groth, 1999). Além disso, é uma planta de difícil controle, fato que pode ser justificado pela dificuldade de penetração do herbicida na planta, devido ao alto teor de cera epicuticular e espessura da cutícula presentes na espécie (Ferreira *et al.*, 2003). Além disso, já foi relatado a existência de biótipos da espécie resistentes a herbicidas de diferentes mecanismos de ação, como inibidor da EPSPs (Palma-Bautista *et al.*, 2020), ALS (Trezzi<sup>1\*</sup> *et al.*, 2005) e Protox (Trezzi *et al.*, 2005).

*Commelina benghalensis* L. é uma espécie originária da África tropical, pertencente à família Commelinaceae, sendo popularmente conhecida no Brasil como trapoeraba (Webster; Grey, 2008; LORENZI, 2014). É uma planta herbácea, perene ou semiperene, de hábito prostrado, elevada capacidade de enraizamento nos nós e reprodução tanto sexuada quanto vegetativa, incluindo a produção de sementes aéreas e subterrâneas, podendo atingir até 60 cm de comprimento. (Kissmann; Groth, 1997; Lorenzi, 2014). No Brasil, é frequentemente encontrada infestando culturas anuais e perenes, onde compete por água, luz e nutrientes, interferindo negativamente no crescimento e no rendimento das culturas (Webster; Grey, 2008; Costa *et al.*, 2021). Além disso, *C. benghalensis* apresenta baixa suscetibilidade a herbicidas amplamente utilizados, com relatos de tolerância ao glyphosate mesmo em doses elevadas, sobretudo em estádios avançados de desenvolvimento, o que reduz a eficiência do controle químico (Monquero *et al.*, 2004a). Essa tolerância está associada à reduzida absorção foliar, devido a maior espessura da cutícula e disposição horizontal das folhas, que dificultam a retenção e a penetração do herbicida (Ferreira *et al.*, 2003; Santos *et al.*, 2015b).

A resistência ou tolerância por alguns mecanismos de ação de herbicidas dificulta o controle de *E. heterophylla* e *C. benghalensis*, sendo essencial a busca de outras alternativas como por exemplo o manejo integrado aliado ao uso de herbicidas mimetizadores de auxina como o dicamba e 2,4-D.

### **3.4 Luminosidade no ambiente no desenvolvimento de plantas daninhas e na eficiência de herbicidas**

A restrição na luminosidade no ambiente, caracterizada pela limitação da quantidade ou qualidade da luz recebida pelas plantas, comum em ambientes agrícolas e florestais, resulta em importantes alterações no crescimento e desenvolvimento das plantas daninhas (Colbach; gardarin; Moreau, 2019; Li *et al.*, 2019). Variações na luminosidade no ambiente podem ser causadas por dosséis de plantas maiores, como

culturas de milho, cana-de-açúcar ou até mesmo outras plantas daninhas, induzindo modificações anatômicas e morfofisiológicas nas espécies presentes abaixo do dossel de outras plantas.

Em resposta à menor luminosidade disponível, de modo geral, as plantas aumentam a área foliar (Ajmi *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2003) e reduzem a espessura das folhas (Ajmi *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2015a), além de apresentarem mudanças na anatomia estomática, como maior densidade de estômatos (Ajmi *et al.*, 2018; Taiz *et al.*, 2017) e deposição de cutina e cera na superfície foliar (Costa *et al.*, 2020). Ocorrem alterações na eficiência fotossintética das plantas, com reduções na condutância estomática, na transpiração e na taxa fotossintética (Ferreira *et al.*, 2024b; Silva *et al.*, 2024b), altera também a partição e a alocação de matéria seca nas plantas, com redução no acúmulo de estruturas de reservas (Donato *et al.*, 2021). Além disso, plantas sombreadas se tornam mais eficientes na utilização da luz, apresentando maior produtividade quântica do fotossistema II ( $\Phi$ PSII), porém, com menor aproveitamento da taxa de transporte de elétrons (Barros *et al.*, 2022; Hazrati *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2024b).

A restrição na luminosidade, ao induzir alterações fisiológicas e anatômicas nas plantas daninhas, pode influenciar significativamente sua sensibilidade aos herbicidas. Plantas cultivadas sob sombreamento, como já relatado para espécies como *Cyperus rotundus* (Donato *et al.*, 2021), espécies do gênero *Uroclhoa* (Oliveira *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2026), *Euphorbia heterophylla* (Ferreira *et al.*, 2024a) e *Digitaria insularis* (Ferreira *et al.*, 2024b), tendem a ser mais sensíveis à ação do glyphosate, respectivamente. Essa maior sensibilidade pode ser explicada, em parte, pela menor espessura foliar e pela redução na deposição de cutícula e cera nas folhas, o que facilita a absorção dos herbicidas aplicados via foliar (Ajmi *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2020). A intensidade e a qualidade da luz influenciam de forma variável as respostas das plantas, o que pode resultar em diferentes efeitos dependendo das condições experimentais e da espécie estudada (Fan *et al.*, 2013; Heo *et al.*, 2006).

Essa maior sensibilidade aos herbicidas implica que doses menores podem ser suficientes para alcançar um controle efetivo em ambientes sombreados (Barros *et al.*, 2022; Hazrati *et al.*, 2016). Isso contribui para a redução de impactos ambientais, melhora o manejo sustentável e diminui os custos operacionais.

### 3.5 Avaliação do controle químico de plantas daninhas e avanços com imagens digitais e aprendizado de máquina

A adoção do controle químico com herbicidas envolve etapas sequenciais que incluem o diagnóstico correto das espécies de plantas daninhas presentes na área, seleção do herbicida e da dose adequada para aplicação e avaliação da eficiência de controle (Agrofit, 2025). Entre essas etapas, a avaliação do controle é fundamental para validar a eficácia do herbicida, auxiliar nos ajustes em programas de manejo integrado de plantas daninhas e evitar aplicações desnecessárias.

A eficiência dos herbicidas é tradicionalmente determinado por meio de avaliações visuais, nas quais estimam o controle a partir de notas percentuais atribuídas conforme a intensidade dos sintomas de fitotoxicidade, como clorose, necrose, epinastia, redução do crescimento e morte das plantas (Frans, 1972; SBCPD, 1995; Ghimire *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2024). No entanto, apesar de amplamente utilizada devido à sua simplicidade operacional e ao baixo custo, a avaliação visual apresenta limitações relevantes. Diferentes avaliadores, mesmo treinados, podem interpretar de maneira distinta os sintomas de fitotoxicidade e a redução da biomassa vegetal, o que resulta em variabilidade e inconsistência nos dados obtidos, sobretudo quando é necessário detectar diferenças sutis de controle (Gómez-Zamanillo *et al.*, 2023).

No manejo de plantas daninhas o processamento computacional de imagens tem sido usado para diferenciação de culturas na presença de ervas daninhas (Moazzam *et al.*, 2023), aumentar a precisão da aplicação de herbicidas (Asad e Bais, 2020; Sanchez; Zhang, 2022), na segmentação de áreas infestadas utilizando redes neurais convolucionais (Silva *et al.*, 2024a), desenvolver sistemas inteligentes de aplicação de herbicidas (Upadhyay *et al.*, 2024), identificar e classificar plantas daninhas com precisão (Niu *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022) e no controle autônomo de plantas daninhas (Raja *et al.*, 2023). Nesse contexto, o uso de imagens obtidas por smartphones surge como uma alternativa promissora para tornar a avaliação do controle de plantas daninhas mais objetiva, rápida e de baixo custo. A partir dessas imagens, é possível extrair índices de vegetação baseados em bandas do espectro visível que quantificam alterações na coloração, vigor e cobertura vegetal associadas aos efeitos dos herbicidas.

Os índices de vegetação permitem captar de forma indireta e quantitativa os danos causados às plantas daninhas (Lussem *et al.*, 2018; Sapkota *et al.*, 2023), reduzindo a dependência exclusiva da percepção visual humana. O potencial dessas imagens pode ser ampliado quando associado a algoritmos de aprendizado de máquina, como o Random

Forest. Esse método baseia-se em um conjunto de árvores de decisão e permite a integração simultânea de múltiplas variáveis extraídas das imagens, favorecendo a identificação de padrões complexos e relações não lineares nos dados (Breiman, 2001). Além disso, o Random Forest apresenta robustez frente a variações indesejadas nos dados e menor risco de sobreajuste, características desejáveis em ambientes agrícolas heterogêneos (Belgiu; Drăgut, 2016). Dessa forma, a combinação de imagens de smartphone, índices de vegetação e modelos de aprendizado de máquina representa um avanço significativo na avaliação do controle químico de plantas daninhas, contribuindo para maior padronização, reprodutibilidade e precisão dos resultados, além de fortalecer a tomada de decisão em programas de manejo integrado.

## Referencias

AGROFIT - Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA)**. Brasília, DF: AGROFIT, c2003. Disponível em: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 02 jan. 2025.

AHUJA, M. et al. Glyphosate: a review on its widespread prevalence and occurrence across various systems. **Environmental Science: Advances**, v. 3, n. 7, p. 1030-1038, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4VA00085D>

AJMI, A. et al. Prolonged artificial shade affects morphological, anatomical, biochemical and ecophysiological behavior of young olive trees (cv. Arbosana). **Scientia Horticulturae**, v. 241, p. 275-284, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.089>

ASAD, M. H.; BAIS, A. Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network. **Information Processing in Agriculture**, v. 7, n. 4, p. 535-545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.002>

BARROS, R. E. et al. Light availability in the cultivation environment and the action of glyphosate on *Digitaria insularis*: physiological aspects and herbicide root exudation. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 57, n. 7, p. 597-607, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2088198>

BARROSO, G. M. et al. Pesticide residues in Brazil: analysis of environmental legislation and regulation and the challenge of sustainable production. **Sustainability**, v. 17, n. 6, p. 2583, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17062583>

BELGIU, M.; DRĂGUȚ, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 114, p. 24-31, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2016.01.011>

BENBROOK, C. M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. **Environmental Sciences Europe**, v. 28, n. 1, p. 3, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>

BOWLES, S.; CHOI, J. K. The Neolithic agricultural revolution and the origins of private property. **Journal of Political Economy**, v. 127, n. 5, p. 2186-2228, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1086/701789>

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

CARVALHO, L. B.; BIANCO, S.; GUZZO, C. D. Interferência de *Euphorbia heterophylla* no crescimento e acúmulo de macronutrientes da soja. **Planta Daninha**, v. 28, p. 33-39, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000100004>

CASTRO, R. A. et al. Selectivity and control of *Euphorbia heterophylla* in sugarcane by herbicide in post-emergence. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 58, n. 6, p. 506-513, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2235248>

CHAUHAN, B. S. Weed ecology and weed management strategies for dry-seeded rice in Asia. **Weed Technology**, v. 26, n. 1, p. 1-13, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-11-00105.1>

COLBACH, N.; GARDARIN, A.; MOREAU, D. The response of weed and crop species to shading: Which parameters explain weed impacts on crop production?. **Field crops research**, v. 238, p. 45-55, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.008>

COSTA, A. G. F. et al. Interferência de *Commelina benghalensis* no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* no inverno e no verão. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 590-606, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509825556>

COSTA, G. A. et al. Efficiency of glyphosate and carfentrazone-ethyl in the control of *Macropodium atropurpureum* (DC.) Urb. under different light intensities. **South African Journal of Botany**, v. 131, p. 302-309, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.028>

DONATO, L. M. S. et al. Light restriction associated with halosulfuron methyl application efficiently reduces the number and mass of tubers of *Cyperus rotundus* L. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 57, n. 1, p. 39-46, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2021.2020531>

FAN, X. et al. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. **Scientia horticulturae**, v. 153, p. 50-55, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.017>

FERREIRA, E. A. et al. Estudos anatômicos de folhas de espécies de plantas daninhas de grande ocorrência no Brasil: IV- *Amaranthus deflexus*, *Amaranthus spinosus*, *Alternanthera tenella* e *Euphorbia heterophylla*. **Planta daninha**, v. 21, p. 263-271, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200012>

FERREIRA, G. A. P. et al. Glyphosate doses should be lower for shaded environments: light and the sensitivity of *Euphorbia heterophylla*. **International Journal of Pest Management**, v. 70, n. 4, p. 992-999, 2024a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09670874.2022.2056254>

FERREIRA, G. A. P. et al. Control of *Digitaria insularis* (L.) Fedde in eucalyptus forests: shading increases sensitivity to glyphosate applied alone and in a mixture with carfentrazone-ethyl. **Discover Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 3, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00014-5>

Frans, R.W., 1972. Measuring plants response. In: WILKINSON, R.E. (Ed.). Research methods in weed science. Puerto Rico: Weed Science Society, 28-41.

FREISTHLER, M. S. et al. Association between increasing agricultural use of 2, 4-D and population biomarkers of exposure: findings from the National Health and Nutrition Examination Survey, 2001-2014. **Environmental Health**, v. 21, n. 1, p. 23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00815-x>

GALON, L. et al. Competição entre híbridos de milho com plantas daninhas. **South American Sciences**, v. 2, n. 1, p. e21101-e21101, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17648/sas.v2i1.101>

GALON, L. et al. Competitive interaction between common black bean cultivars and *Euphorbia heterophylla*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 254-260, 2018.

GAZZIERO, D. L. P. et al. *Euphorbia heterophylla*: um novo caso de resistência ao glifosato no Brasil. **Comunicado Técnico**, 2020.

GHIMIRE, B.; CHANG, Y.; KIM, S. Evaluation of pre-emergence and post-emergence herbicides for weed management in. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 92, n. 5, p. 1439, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.023076>

GÓMEZ-ZAMANILLO, L. et al. Damage assessment of soybean and redroot amaranth plants in greenhouse through biomass estimation and deep learning-based symptom classification. **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100243, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100243>

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 66, n. 2, p. 113-120, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.1860>

HAZRATI, S. et al. Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of Aloe vera L. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 141-148, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.046>

HENRY, J. L. et al. Persistence of dicamba residue in harvested soybeans. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 3, p. e20564, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20564>

HEO, J. W.; LEE, C. W.; PAEK, K. Y. Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. **Journal of Plant Biology**, v. 49, n. 4, p. 286-290, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03031157>

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatórios de comercialização de agrotóxicos. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 15 dez. 2025.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. 2. ed. São Paulo: BASF, 1997. v. 1.

LI, T. et al. Topical shading substantially inhibits vegetative branching by altering leaf photosynthesis and hormone contents of cotton plants. **Field Crops Research**, v. 238, p. 18-26, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.019>

LORENZI, H. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional**. 7.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2014.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas**. 3 ed., Plantarum, 2000.

LUCIO, F. R. et al. Dispersal and frequency of glyphosate-resistant and glyphosate-tolerant weeds in soybean-producing edaphoclimatic microregions in Brazil. **Weed Technology**, v. 33, n. 1, p. 217-231, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2018.97>

LUPI, L. et al. Glyphosate runoff and its occurrence in rainwater and subsurface soil in the nearby area of agricultural fields in Argentina. **Chemosphere**, v. 225, p. 906-914, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.090>

LUSSEM, U. et al. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 1215-1219, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>

MEDALIE, L. et al. Influence of land use and region on glyphosate and aminomethylphosphonic acid in streams in the USA. **Science of the Total Environment**, v. 707, p. 136008, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136008>.

MENDES, K. F.; SILVA, A. A. **Plantas daninhas: herbicidas**. Oficina de Textos, 2023.

MEROTTO JR, A. et al. Herbicide use history and perspective in South America. **Advances in Weed Science**, v. 40, n. spe 1, p. e020220050, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five010>

MOAZZAM, S. I. et al. Towards automated weed detection through two-stage semantic segmentation of tobacco and weed pixels in aerial Imagery. **Smart Agricultural Technology**, v. 4, p. 100142, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100142>

MONQUERO, P. A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, v. 22, p. 445-451, 2004a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000300015>

MONQUERO, P. A. et al. Caracterização da superfície foliar e das ceras epicuticulares em *Commelina benghalensis*, *Ipomoea grandifolia* e *Amaranthus hybridus*. **Planta Daninha**, v. 22, p. 203-210, 2004b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000200005>

NIU, Z. et al. Advanced plant phenotyping technologies for enhanced detection and mode of action analysis of herbicide damage management. **Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1166, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17071166>

OLIVEIRA, V. A. V. et al. Influence of tree shading on the desiccation of grasses with glyphosate and straw decomposition in a silvopastoral system. **Agroforestry Systems**, v. 100, n. 1, p. 20, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01396-1>

OLIVEIRA, V. A. V. et al. The light intensity in the cultivation environment and the impact of glyphosate on plants of the *Urochloa* genus. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 59, n. 8, p. 540-549, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2024.2381934>

OREJA, F. H. et al. Survey of major weed problems, management practices and herbicide use in extensive row crops from Argentina. **Advances in Weed Science**, v. 42, p. e020240050, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2024;42:00015>

OSIPE, J. B. et al. Espectro de controle de plantas daninhas com os herbicidas 2, 4-D e dicamba associados ou não ao glyphosate. **Planta Daninha**, v. 35, p. e017160815, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582017350100053>

PALMA-BAUTISTA, C. et al. Resistance to fomesafen, imazamox and glyphosate in *Euphorbia heterophylla* from Brazil. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1573, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101573>

PARVEN, A. et al. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 1181-1202, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>

PEREIRA, L. S. et al. Controle de plantas daninhas tolerantes ao glifosato com 2,4-d e dicamba. **Revista Ciência Agrícola**, v. 18, n. 3, p. 22-28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.28998/rca.v18i3.10065>

PETERSON, M. A. et al. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>

RAJA, R. et al. Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control. **Biosystems Engineering**, v. 228, p. 31-48, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.02.006>

SALOMÃO, P. E. A.; FERRO, A. M. S.; RUAS, W. F. Herbicidas no Brasil: uma breve revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 2, p. e32921990-e32921990, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1990>

SANCHEZ, Paolo Rommel; ZHANG, Hong. Evaluation of a cnn-based modular precision sprayer in broadcast-seeded field. **Sensors**, v. 22, n. 24, p. 9723, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s2224972>

SANTOS JUNIOR, A. et al. Management of *Commelina benghalensis* with saflufenacil in shaded environments. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019178088, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100051>

SANTOS, I. C. et al. Eficiência do 2, 4-D aplicado isoladamente e em mistura com glyphosate no controle da trapoeraba. **Planta Daninha**, v. 20, p. 299-309, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582002000200017>

SANTOS, L. D. T. et al. Phenotypic plasticity of *Neonotonia wightii* and *Pueraria phaseoloides* grown under different light intensities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 01, p. 519-528, 2015a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140017>

SANTOS, S. A. et al. Influence of shading on the leaf morphoanatomy and tolerance to glyphosate in *Commelina benghalensis* L. and *Cyperus rotundus* L. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 2, p. 135-142, 2015b.

SAPKOTA, R. et al. Towards reducing chemical usage for weed control in agriculture using UAS imagery analysis and computer vision techniques. **Scientific reports**, v. 13, n. 1, p. 6548, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33042-0>

SARKAR, B. et al. Insights into the mechanism of abscisic acid-induced 2, 4-D tolerance in maize (*Zea mays* L.) seedlings: Study on the regulation of osmolytes, fluorescence, photosynthetic carbon reactions, and antioxidant metabolism. **Plant Stress**, v. 11, p. 100396, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100396>

SILVA, A. A. et al. Herbicidas: classificação e mecanismo de ação. **Tópicos em manejo de plantas daninhas. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa**, v. 2, p. 58-117, 2007.

SILVA, J. A. O. S. et al. Deep learning for weed detection and segmentation in agricultural crops using images captured by an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 16, n. 23, p. 4394, 2024a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16234394>

SILVA, M. S. N. et al. Restrição luminosa e o manejo químico com glyphosate sob a resposta fisiológica de *Urochloa brizantha*. **CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 6600–6619, 2024b. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-397>

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017. 858p.

TREZZI 1\*, Michelangelo M. et al. Multiple resistance of acetolactate synthase and protoporphyrinogen oxidase inhibitors in *Euphorbia heterophylla* biotypes. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 40, n. 1, p. 101-109, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1081/PFC-200034254>

TUDI, M. et al. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. **International journal of environmental research and public health**, v. 18, n. 3, p. 1112, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>

UPADHYAY, A. et al. Development and evaluation of a machine vision and deep learning-based smart sprayer system for site-specific weed management in row crops: An edge computing approach. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101331, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101331>

VIDAL, R. A.; TREZZI, M. M. Análise de crescimento de biótipos de leiteira (*Euphorbia heterophylla*) resistentes e suscetível aos herbicidas inibidores da ALS. **Planta Daninha**, v. 18, p. 427-433, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582000000300006>

WAN, N. et al. Os pesticidas têm efeitos negativos em organismos não-alvo. **Nature communications**, v. 16, n. 1, p. 1360, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56732-x>

WANG, S. et al. Weed density extraction based on few-shot learning through UAV remote sensing RGB and multispectral images in ecological irrigation area. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 735230, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.735230>

WEBSTER, T. M.; GREY, T. L. Growth and reproduction of Benghal dayflower (*Commelina benghalensis*) in response to drought stress. **Weed Science**, v. 56, n. 4, p. 561-566, 2008.

YANG, L. *et al.* Real-time classification of invasive plant seeds based on improved YOLOv5 with attention mechanism. **Diversity**, v. 14, n. 4, p. 254, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d14040254>

ZUANAZZI, N. R.; GHISI, N. C.; OLIVEIRA, E. C. Analysis of global trends and gaps for studies about 2, 4-D herbicide toxicity: a scientometric review. **Chemosphere**, v. 241, p. 125016, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125016>

## **4 ARTIGOS**

**4.1 Artigo I – Influência da intensidade luminosa na eficácia do 2,4-D e do dicamba no controle de *Euphorbia heterophylla* L.**

## **Influência da intensidade luminosa na eficácia do 2,4-D e do dicamba no controle de *Euphorbia heterophylla* L.**

**Resumo:** *Euphorbia heterophylla*, popularmente conhecida como leiteira, é uma planta daninha prejudicial em diversas culturas. Essa planta daninha se destaca por seu rápido crescimento inicial, habilidade competitiva, capacidade de germinar em condições adversas e dificuldade de controle. Dentre as diferentes formas de controle de plantas daninhas, o uso de herbicidas é o mais utilizado. Para a recomendação de doses de herbicidas aplicados em pós - emergência, prevista na bula dos produtos, não considera a luminosidade no ambiente, fator que pode alterar a morfofisiologia das plantas e influenciar sua sensibilidade aos herbicidas. O objetivo foi avaliar o efeito de diferentes condições de luminosidade sobre a ação do 2,4-D e dicamba no controle de *E. heterophylla*. Foram realizados dois experimentos que se diferiram no herbicida utilizado. Foi empregado o delineamento de blocos casualizados com 5 repetições. Os tratamentos foram estabelecidos em esquema fatorial 2 x 6, onde o primeiro fator foi constituído por 2 ambientes de cultivo (pleno sol e 82% de sombreamento) e o segundo fator por 6 doses de herbicida. No primeiro experimento foram usadas as doses 0 (testemunha sem herbicida), 120, 240, 360, 480 e 720 g e. a. ha<sup>-1</sup> de dicamba (XTENDICAM®, 480 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba) e no segundo estudo 0 (testemunha sem herbicida), 168, 335, 670, 1.005 e 1.340 g e. a. ha<sup>-1</sup> de 2,4-D (AMINOL® 806, 670 g e. a. L<sup>-1</sup>) que foram aplicadas aos 50 dias após a semeadura. Foram avaliados o teor de cera epicuticular, porcentagem de controle, características fisiológicas e anatômicas. As plantas de *E. heterophylla* mantidas em pleno sol apresentaram valores médios de teor de cera 83% maior em relação as plantas sombreadas. Plantas mantidas em sombreamento mostraram maior sensibilidade ao 2,4-D em menores doses testadas e em todas as doses para o dicamba. Aos 30 dias após a aplicação dos herbicidas, a dose necessária para controle excelente (≥91%) de *E. heterophylla* em pleno sol e sombreamento foi de 554,80 e 319,30 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No estudo com o dicamba, somente a dose 720 g ha<sup>-1</sup> em sombreamento proporcionou controle bom, atingindo 80%. O aumento das doses aplicadas de 2,4-D e dicamba ocasionou decréscimo nas reservas de amido e aumento dos açúcares solúveis, independente do ambiente de cultivo de *E. heterophylla*. Plantas sombreadas apresentam menor acúmulo de amido e açúcares solúveis que o observado no pleno sol, independente da dose de 2,4-D e dicamba. O aumento das doses dos herbicidas e o sombreamento reduziu a massa seca total das plantas de *E. heterophylla*. O sombreamento e a aplicação de 2,4-D e dicamba reduziram a ETR de *E. heterophylla*. O aumento das doses dos herbicidas reduziu os espaços intercelulares de *E. heterophylla* em pleno sol e sombreamento. *E. heterophylla* apresenta plasticidade morfoanatômica, fisiológica e bioquímica em resposta à luminosidade, o que modula sua sensibilidade aos herbicidas 2,4-D e dicamba. Plantas mantidas em sombreamento apresentam maior suscetibilidade aos herbicidas, alcançando controle excelente com a dose de 319,30 g ha<sup>-1</sup> de 2,4-D, enquanto em pleno sol foi necessária a aplicação de 554,80 g ha<sup>-1</sup> para atingir o mesmo nível de eficácia. Para o dicamba, o controle efetivo da espécie ocorre exclusivamente em sombreamento e apenas na maior dose avaliada (670 g ha<sup>-1</sup>).

**Palavras-chave:** Planta daninha, leiteiro, herbicida, sombreamento, redução de dose.

## ABSTRACT

*Euphorbia heterophylla*, commonly known as wild poinsettia, is a harmful weed in several crops. This species stands out for its rapid initial growth, strong competitive ability, ability to germinate under adverse conditions, and difficulty in controlling. Among the different weed control methods, herbicide use is the most widely adopted. However, herbicide dose recommendations for post-emergence applications, as indicated on product labels, do not account for environmental light conditions. This factor can alter plant morphophysiology and influence herbicide sensitivity. The objective of this study was to evaluate the effect of different light conditions on the efficacy of 2,4-D and dicamba in controlling *E. heterophylla*. Two experiments were conducted, differing in the herbicide used. A randomized complete block design with five replicates was adopted. Treatments were arranged in a  $2 \times 6$  factorial scheme, with the first factor comprising two growing environments (full sun and 82% shading) and the second comprising six herbicide doses. In the first experiment, dicamba (XTENDICAM®, 480 g a.e. L<sup>-1</sup>) was applied at doses of 0 (untreated control), 120, 240, 360, 480, and 720 g a.e. ha<sup>-1</sup>. In the second experiment, 2,4-D (AMINOL® 806, 670 g a.e. L<sup>-1</sup>) was applied at doses of 0 (untreated control), 168, 335, 670, 1,005, and 1,340 g a.e. ha<sup>-1</sup>. Applications were performed at 50 days after sowing. Epicuticular wax content, control percentage, and physiological and anatomical characteristics were evaluated. *E. heterophylla* plants grown under full sun showed a mean epicuticular wax content 83% higher than shaded plants. Plants grown under shading exhibited greater sensitivity to 2,4-D at lower doses and to dicamba at all tested doses. At 30 days after herbicide application, the dose required to achieve excellent control ( $\geq 91\%$ ) of *E. heterophylla* under full sun and shading was 554.80 and 319.30 g ha<sup>-1</sup>, respectively. In the dicamba experiment, only the 720 g ha<sup>-1</sup> dose under shading provided good control, reaching 80%. Increasing doses of 2,4-D and dicamba reduced starch reserves and increased soluble sugars, regardless of the growing environment. Shaded plants showed lower starch and soluble sugar accumulation than those grown under full sun, irrespective of herbicide dose. Increasing herbicide doses and shading reduced the total dry mass of *E. heterophylla* plants. Shading and the application of 2,4-D and dicamba reduced the electron transport rate (ETR) of *E. heterophylla*. Increasing herbicide doses reduced intercellular spaces in plants grown under both full-sun and shaded conditions. *E. heterophylla* exhibits morphoanatomical, physiological, and biochemical plasticity in response to light conditions, which modulates its sensitivity to the herbicides 2,4-D and dicamba. Plants grown under shading are more susceptible to herbicides, achieving excellent control with a dose of 319.30 g ha<sup>-1</sup> of 2,4-D, whereas under full sun, 554.80 g ha<sup>-1</sup> was required to reach the same level of efficacy. For dicamba, effective control of the species occurred exclusively under shading and only at the highest evaluated dose (720 g ha<sup>-1</sup>).

**Keywords:** Weed, milkweed, herbicide, shading, dose reduction.

## Introdução

As plantas daninhas constituem um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola (Horvath *et al.*, 2023). *Euphorbia heterophylla* é uma das principais dicotiledôneas infestantes de culturas anuais e perenes no Brasil (Castro *et al.*, 2023; Agrofit, 2025), com ocorrências em outros países tropicais e subtropicais (Palma-Bautista *et al.*, 2020). A espécie se destaca pelo rápido crescimento inicial, elevada produção de sementes e forte competição por recursos como luz, água e nutrientes (Galon *et al.*, 2018). Além disso, *E. heterophylla* apresenta histórico amplamente documentado de evolução de resistência (Palma-Bautista *et al.*, 2020) e tolerância a herbicidas de diferentes mecanismos de ação, o que a torna um desafio constante para o manejo e um modelo relevante para estudos sobre adaptação e dinâmica populacional dessa planta daninha em agroecossistemas intensivos (Mendes e Silva *et al.*, 2023).

Entre as diferentes formas de manejo dessas espécies, o controle químico com herbicidas se destaca como a principal forma utilizada, devido à sua elevada eficiência, rapidez de ação e viabilidade operacional em sistemas agrícolas de larga escala (Parven *et al.*, 2025). No entanto, um dos desafios da agricultura moderna, frente aos impactos ambientais ligados ao uso de agrotóxicos, tema em evidência, é a implementação de tecnologias que sejam eficazes e, ao mesmo tempo, amparadas pela sustentabilidade e uso racional do ambiente.

Plantas submetidas ao sombreamento sofrem alterações fisiológicas e estruturais (Costa *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2022), tais como redução da deposição de cera na camada superficial das folhas (Costa *et al.*, 2020), alterações nos teores de pigmentos fotossintéticos (Taiz; Zaiger, 2013), redução da taxa fotossintética, da transpiração e da condutância estomática (Ajimi *et al.*, 2018) e de enzimas importantes para o processo fotossintético, como rubisco e peroxidase (Hussain *et al.*, 2019), o que pode alterar sua resposta aos herbicidas.

Algumas espécies, entre mono e dicotiledôneas, quando cultivadas em ambientes sombreados, apresentam maior sensibilidade ao glyphosate, herbicida mais utilizado no Brasil (IBAMA, 2024) e no mundo (Novotny, 2022), como *Urochloa decumbens* e *Urochloa brizantha* (Oliveira *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2026), *Merremia cissoides* (Ferreira *et al.*, 2022), *Euphorbia heterophylla* (Ferreira *et al.*, 2024), *Macroptilium atropurpureum* (Costa *et al.*, 2020), *Commelina benghalensis* e *Cyperus rotundus* (Santos *et al.*, 2015), sendo controladas com doses mais baixas desse produto. Contudo, o

surgimento de plantas resistentes ao glyphosate estimula a busca por herbicidas alternativos.

Para os herbicidas 2,4-D e dicamba, objetos do presente estudo, não há informações na literatura sobre a resposta de plantas daninhas sombreadas a estes herbicidas. O lançamento, no mercado, de genótipos de soja resistentes ao 2,4-D (Conkesta E3) e ao dicamba (Henry *et al.*, 2024), amplifica a importância de se conhecer a resposta de plantas sombreadas a estes herbicidas, devido a possibilidade de controlar plantas daninhas, com redução de doses aplicadas.

A aplicação de herbicidas com doses menores e elevada eficiência de controle pode contribuir para a redução dos impactos negativos destes produtos no ambiente (Oliveira *et al.*, 2026; Ferreira *et al.*, 2022), tema em evidência e bastante discutido atualmente pela sociedade (Novotny, 2022; Agostini *et al.*, 2020), além de apresentar potencial para reduzir os custos de produção. Logo, o objetivo foi avaliar o efeito de diferentes condições de luminosidade sobre a ação do dicamba e 2,4-D no controle de *Euphorbia heterophylla* e sua relação com as características morfoanatômicas, fisiológicas e metabólicas da planta.

## **Material e métodos**

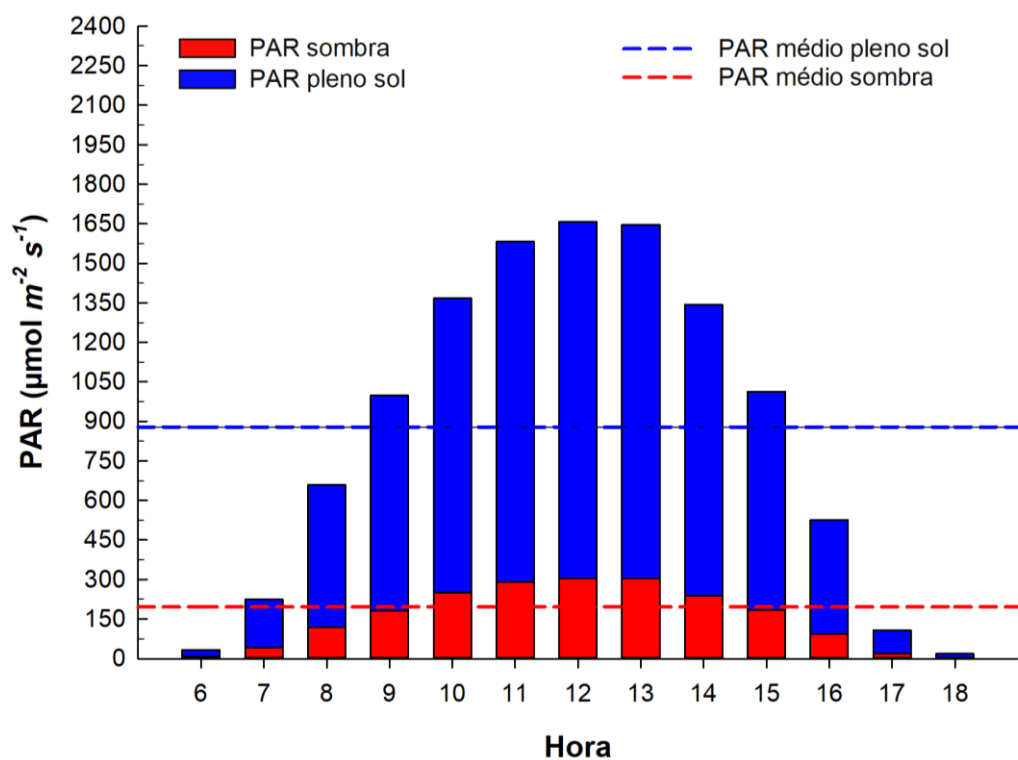
### **Instalação do experimento e materiais utilizados**

Foram conduzidos dois experimentos de controle químico de *E. heterophylla* que diferiram quanto aos herbicidas e às doses utilizadas, conduzidos em Montes Claros - MG, Brasil (16°40'58.10"S, 43°50'19.03"W). Segundo a classificação de Köppen, a região apresenta clima do tipo Aw, caracterizado por uma estação seca no inverno e chuvas concentradas no verão (Martins *et al.*, 2018).

As sementes de *E. heterophylla* foram colhidas de cerca de 40 plantas a campo, secas à sombra por 7 dias e armazenadas sob refrigeração a  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ . Depois foram semeadas em vasos de 8 litros contendo solo com as seguintes características físicas e químicas: pH em água – 6,2; P mehlich – 304,1 mg dm<sup>-3</sup>; K – 430,3 mg dm<sup>-3</sup>; Ca – 7,24 cmolc dm<sup>-3</sup>; Mg – 1,89 cmolc dm<sup>-3</sup>; areia - 23 dag kg<sup>-1</sup>; silte - 38 dag kg<sup>-1</sup>; argila - 40 dag kg<sup>-1</sup>; saturação por bases - 84,67 % e teor de matéria orgânica – 3,26 dag kg<sup>-1</sup>. Após a emergência, as duas plântulas mais vigorosas foram mantidas e as demais desbastadas manualmente. As plantas foram cultivadas em duas condições ambientais: pleno sol e 73%  $\pm$  0,29 % de sombreamento, durante todo o período experimental.

O sombreamento foi obtido com o uso de tela sombrite 70% de polipropileno preta, fixada em suportes de madeira a dois metros de altura e com fechamento lateral. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi medida nos ambientes de cultivo com o ceptômetro AccuPar LP-80 (Decagon Devices, Pullman, EUA). As medições foram realizadas a cada hora no período das 06:00 às 18:00 horas, durante sete dias aleatórios ao longo do experimento (Figura 1).

O nível de sombreamento foi determinado pela porcentagem de interceptação da luz pela tela sombrite, calculada para cada horário a partir da razão entre a luminosidade a pleno sol e sombreamento. O sombreamento de  $73\% \pm 0,29\%$  foi o nível médio obtido nos diferentes horários e o erro padrão associado à média. A umidade do solo foi controlada por meio de irrigações diárias, sendo mantida entre 80 a 100% da capacidade de campo.



**Figura 1.** Variação da disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) nos ambientes de cultivo no intervalo entre 06:00 e 18:00 horas.

### Delineamento experimental e tratamentos

Ambos os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados com 4 repetições, em esquema fatorial 2 x 6. As parcelas experimentais foram constituídas por vasos de 8 L contendo 2 plantas. O primeiro fator comum em

ambos os experimentos foi constituído pelos ambientes de cultivo pleno sol e 73,00% de sombreamento. O segundo fator no primeiro experimento, foi composto pelas doses 0, 120, 240, 360, 480 e 720 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba (XTENDICAM<sup>®</sup>, 480 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba) e no segundo experimento, pelas doses 0, 168, 335, 503, 670, 1.005 g e. a. L<sup>-1</sup> de 2,4-D (AMINOL<sup>®</sup> 806, 670 g e. a. L<sup>-1</sup>).

A aplicação das doses de dicamba e 2,4-D ocorreu aos 50 dias após a semeadura com pulverizador costal equipado com ponta modelo TTI 110-02 (Teejet, Wheaton, USA) e válvula reguladora de pressão constante a 200 KPa (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), com o volume de 112 L ha<sup>-1</sup> de calda. As plantas apresentavam altura média de 34 ± 2 cm e 39 ± 3 cm para indivíduos crescidos em pleno sol e na sombra, respectivamente. No momento da aplicação as condições climáticas locais apresentavam temperatura média de 20,9°C, umidade relativa do ar de 70,8% e velocidade média do vento de 0,7 Km h<sup>-1</sup>.

#### **Avaliações do teor de cera epicuticular e da anatomia foliar**

Em ambos os experimentos, uma das plantas do vaso foi destinada às análises destrutivas, enquanto a outra foi utilizada para avaliações não destrutivas. No dia anterior à aplicação dos herbicidas, foi coletado uma folha totalmente expandida do terço mediano das plantas, que foi digitalizada em scanner para determinação da área foliar no software Image-Pro Plus. Em seguida, cada amostra foliar foi imersa em placa de Petri contendo 30 mL de clorofórmio por 30 s, sob agitação suave, para não extravasar o conteúdo celular. O extrato obtido (cera + clorofórmio) foi transferido para tubos de ensaio de massa conhecida e, em seguida, colocado em banho-maria dentro da capela de exaustão de gases até que ocorresse a completa evaporação do clorofórmio. A massa residual de cera aderida ao tubo foi quantificada em balança analítica e dividida pela área foliar, obtendo-se o teor de cera epicuticular por unidade de área foliar ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ), conforme metodologia adaptada de Costa *et al.* (2020).

Aos 3 dias após a aplicação dos herbicidas (DAH) foram coletadas duas folhas totalmente expandidas do terço mediano das plantas, fracionadas em três partes e fixadas em FAA 50% por 48 horas. Após a fixação com FAA 50% os fragmentos foliares foram armazenados em etanol 70%. O material armazenado foi então incluído em resina acrílica tipo metacrilato para obtenção de cortes transversais com 8  $\mu\text{m}$  de espessura, em micrótomo rotativo manual YD-315 (Jinhua Yidi Medical Appliance Co., Ltd., China),

corados em azul de toluidina pH=4,0 (O'Brien & McCully, 1981) e montados de laminário histológico semipermanente.

Os cortes transversais da folha de *E. heterophylla* foram analisados em microscópio de luz Primo Star (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Alemanha) e a documentação fotográfica obtida com câmera digital acoplada Axiocam 105 color (Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH, Oberkochen, Alemanha). No material digitalizado foi avaliado a proporção de espaço intercelular. O número de estômatos e células epidérmicas foi determinado pelo método de impressão paradérmica e através desses dados foram calculados o índice e a densidade de estômatos (Equação 1 e 2), respectivamente.

$$IE(\%) = \frac{n^{\circ} \text{ de estômatos}}{n^{\circ} \text{ de estômatos} + n^{\circ} \text{ de células epidérmicas}} * 100 \quad (\text{Equação 1})$$

$$DE = \frac{n_a}{A} \quad (\text{Equação 2})$$

IE: índice estomático;

N<sub>a</sub>: número total de estômatos contados na área analisada;

A: área da epiderme observada (mm<sup>2</sup>);

DE: densidade estomática (estômatos mm<sup>-2</sup>).

### **Avaliações de açúcares e amido**

Aos 3 DAH foi determinado o acúmulo de açúcares solúveis e amido seguindo a metodologia adaptada de McCready *et al.* (1950). Inicialmente as amostras foram moídas em moinho tipo Willey (modelo CE 340/MACRO, Cienlab, Campinas, Brasil) com peneira de 1 mm. Uma alíquota de 0,2 g do material seco e moído foi tratada com 1,5 mL de etanol 80% em ebulição para extração de mono, di e trissacarídeos. Após centrifugação a 3000 rpm por 10 min (VS 15000CFN II, Vision Scientific, Daejeon, Coreia do Sul), todo esse procedimento foi repetido quatro vezes. Os sobrenadantes foram coletados em balão volumétrico de 100 mL, completados com água destilada e reservados para quantificação de açúcares solúveis. O precipitado resultante foi submetido à extração de amido mediante adição de 1,5 mL de ácido perclórico a 30%, com agitação em turbilhador

por 2 min e repouso por 30 min, seguido de centrifugação a 3000 rpm por 10 min. Esse procedimento foi realizado três vezes, e os sobrenadantes foram reunidos em balão volumétrico de 100 mL e completados com água destilada. A quantificação dos teores de amido e açúcares foi realizada pela reação com antrona (Fales 1951) em espectrofotômetro (modelo 1600 UV, Nova Instruments, Piracicaba, Brasil), com leituras em 620 nm.

### **Avaliações da taxa de transporte de elétrons, controle e massa seca total pós aplicação dos herbicidas**

Aos 15 DAH foi analisado taxa de transporte de elétrons (ETR), com auxílio do aparelho fluorômetro Y (II) meter (OPTI-SCIENCES, Hudson, USA). A avaliação foi realizada em folhas de *E. heterophylla* localizadas no terço mediano das plantas, no horário compreendido entre 8 e 10 h da manhã.

Aos 30 DAH foram feitas avaliações visuais de controle das plantas pelos herbicidas, por três avaliadores treinados utilizando uma escala de notas de 0 a 100%, onde 0 é a inexistência de injúrias causadas pelos herbicidas e 100 a morte da planta, conforme a metodologia proposta por ALAM (1974) (Tabela 1). A nota atribuída a cada parcela foi obtida através da média aritmética simples das três notas de controle, uma de cada avaliador. Aos 30 DAH, as partes vivas da parte aérea das plantas foram coletadas e colocados em estufa de ventilação forçada a 65° C até atingir peso constante, para determinação da massa seca total em balança de precisão.

Tabela 1 - Escala de classificação da eficácia de herbicida no controle de plantas daninhas, conforme Alam (1974).

| <b>Controle (%)</b> | <b>Nota e Classificação</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| 0 - 40              | 1 – Nenhum/pobre            |
| 41 -60              | 2 - Regular                 |
| 61 - 70             | 3 - Suficiente              |
| 71 - 80             | 4 - Bom                     |
| 81 - 90             | 5 - Muito bom               |
| 91 - 100            | 6 - Excelente               |

### **Análise dos dados**

As análises estatísticas foram feitas com o auxílio do software R (R Core Team, 2025) considerando o nível de 5% de significância. Os dados foram submetidos à análise

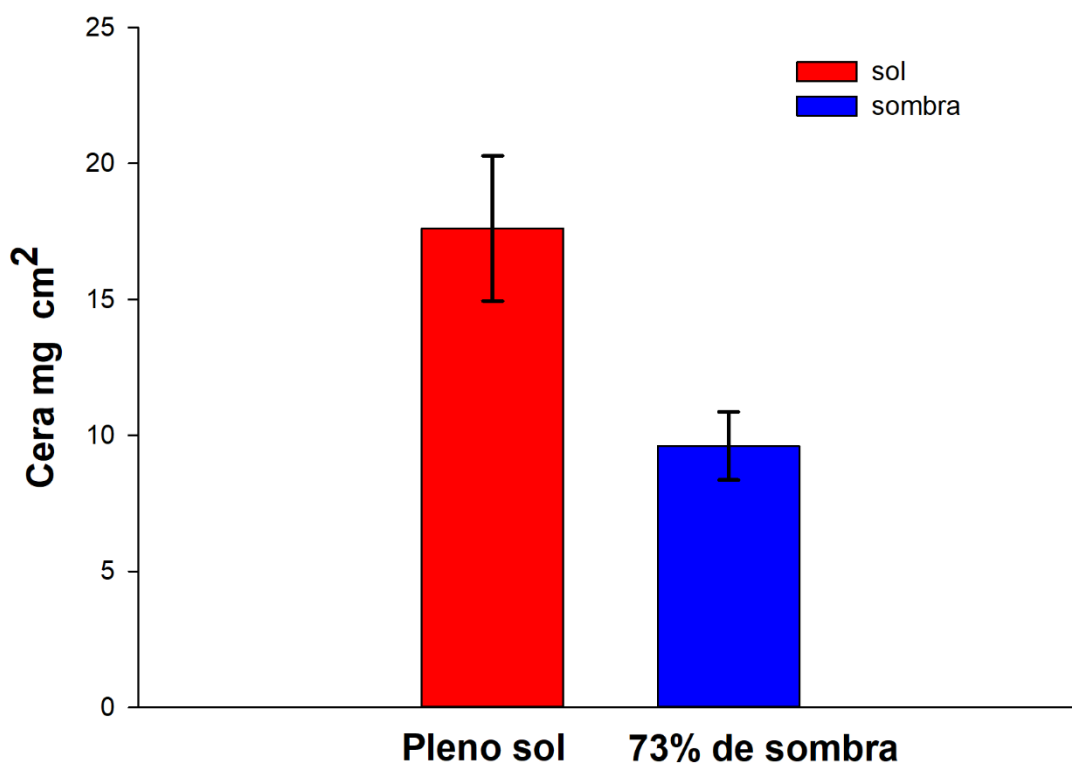
de variância, posteriormente, encontrando-se efeitos significativos, foi realizado o teste Tukey na comparação das condições de sombreamento (Fator qualitativo) com o auxílio do pacote ExpDes.pt, já para as doses foram ajustados modelos de regressão (Fator quantitativo). Para a melhor visualização dos efeitos estudados do ponto de vista multivariado, foi realizado estudo de variáveis canônicas com o auxílio do pacote MultivariateAnalysis (Monteiro & Azevedo, 2025).

Os modelos de regressão testados foram os modelos sigmoidal, exponencial, linear e quadrático e foram escolhidos em função do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ).

As análises de regressão foram realizadas por meio do software SigmaPlot 16.0 (SYSTAT SOFTWARE INC., 2021), adotando um nível de significância de 5%.

## RESULTADOS

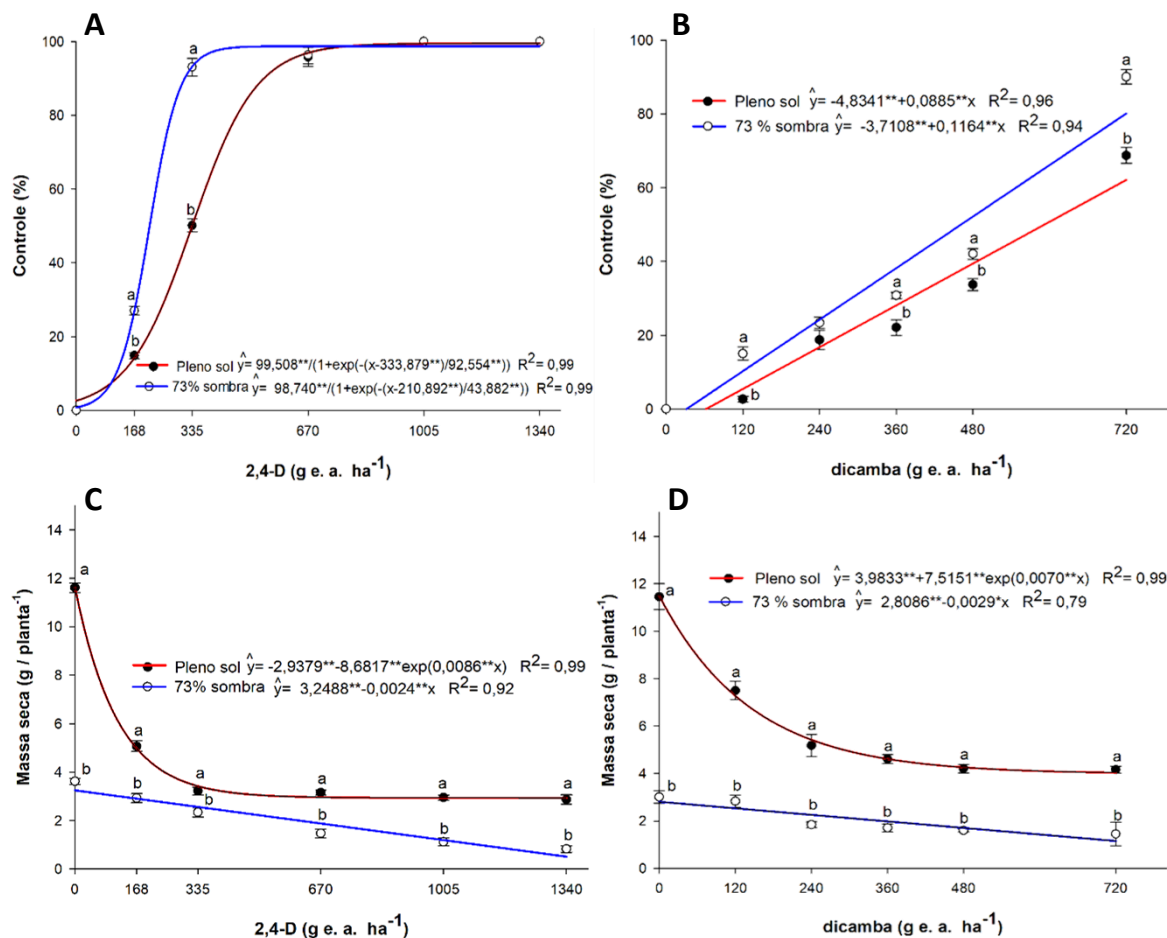
As plantas de *E. heterophylla* mantidas em pleno sol apresentaram teor de cera epicuticular de  $17,61 \text{ mg/cm}^2$ , valor cerca de 83% maior que o observado nas plantas de sombra (Figura 2).



**Figura 2.** Teor de cera epicuticular de *Euphorbia heterophylla* aos 49 dias após a emergência. Barras verticais = erro padrão da média.

As respostas de *E. heterophylla* ao 2,4-D e dicamba variaram para o controle das plantas e a massa seca total ( $p \leq 0,05$ ), de acordo com a interação entre dose e as condições de luminosidade no ambiente de crescimento das plantas (Figura 3). Plantas mantidas em sombreamento apresentaram maior sensibilidade ao 2,4-D em menores doses testadas (Figura 3A) e em todas as doses para o dicamba (Figura 3B). Aos 30 dias após a aplicação dos herbicidas (DAH) a dose necessária para controle excelente ( $\geq 91\%$ ) de *E. heterophylla* em pleno sol e sombreamento foi de 554,80 e 319,30 g ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 3A). No estudo com o dicamba, somente a dose 720 g ha<sup>-1</sup> em sombreamento proporcionou controle bom, atingindo 80% (Figura 3B). A diferença entre as doses de controle entre os ambientes de cultivo representa redução de 42,40% de 2,4-D aplicado em sombreamento.

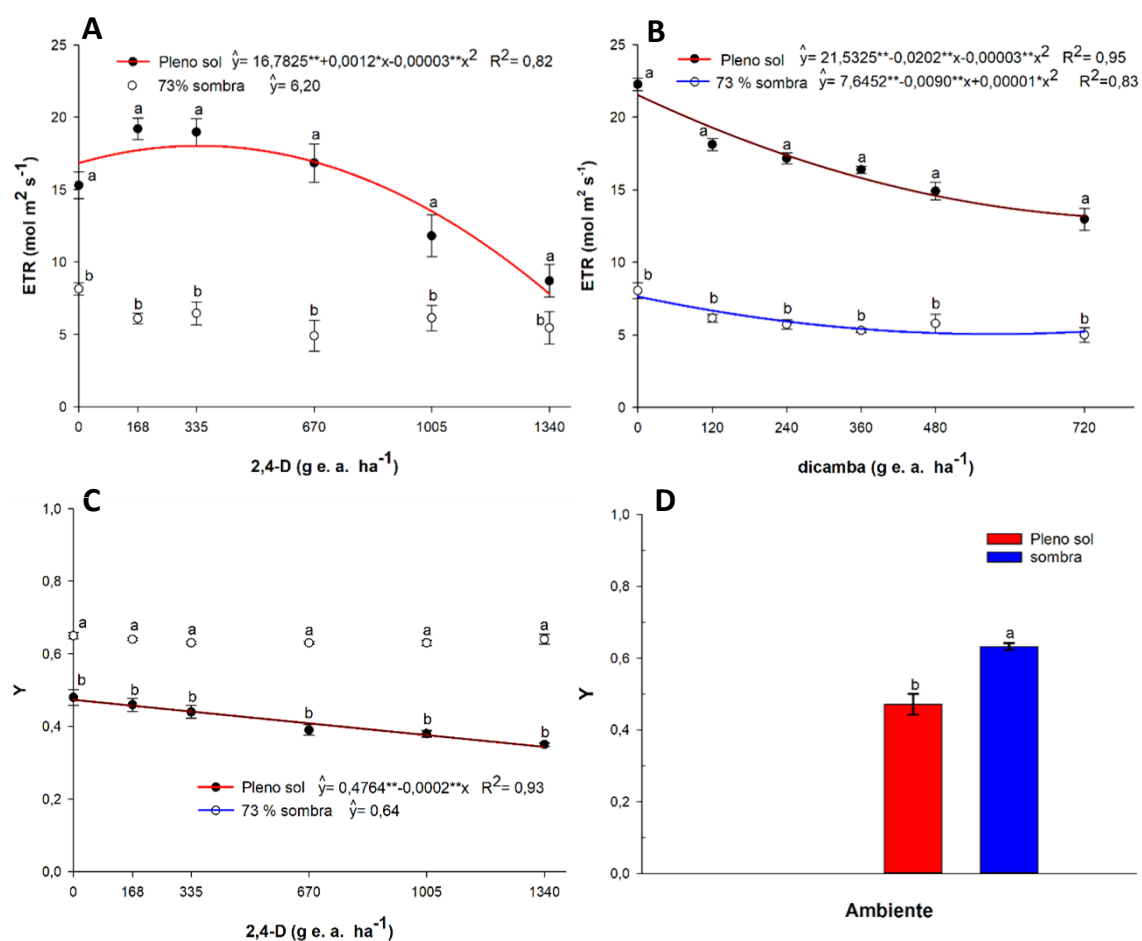
A massa seca total após a aplicação dos herbicidas apresentou redução progressiva com o aumento das doses de 2,4-D e dicamba, com menores valores observados em ambiente sombreado (Figura 3C e D). Com a aplicação da maior dose de 2,4-D, as plantas de *E. heterophylla* apresentaram massa seca total de 2,94 e 0,51 g em pleno sol e sombreamento, respectivamente. Esses valores correspondem a reduções de 72,77 e 85,83% em relação à testemunha sem aplicação de herbicida, que apresentou acúmulo de massa seca de 11,60 g em pleno sol e 3,60 g em sombreamento (Figura 3C). Com a aplicação da dose de 720 g e. a ha<sup>-1</sup> de dicamba em sombreamento, as plantas de *E. heterophylla* apresentaram valores de massa seca total de 1,15 g, o que representa redução de 59% em relação à testemunha sem aplicação de herbicida (Figura 3D).



**Figura 3.** Controle e massa seca total de *Euphorbia heterophylla* aos 30 dias após a aplicação das doses de 2,4-D (A e C) e dicamba (B e D), respectivamente. Mesma letra entre os pontos de diferentes ambientes (na vertical), não diferem entre si pelo teste tukey a 5% de significância. \*\* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,05$ ) e \* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,01$ ).

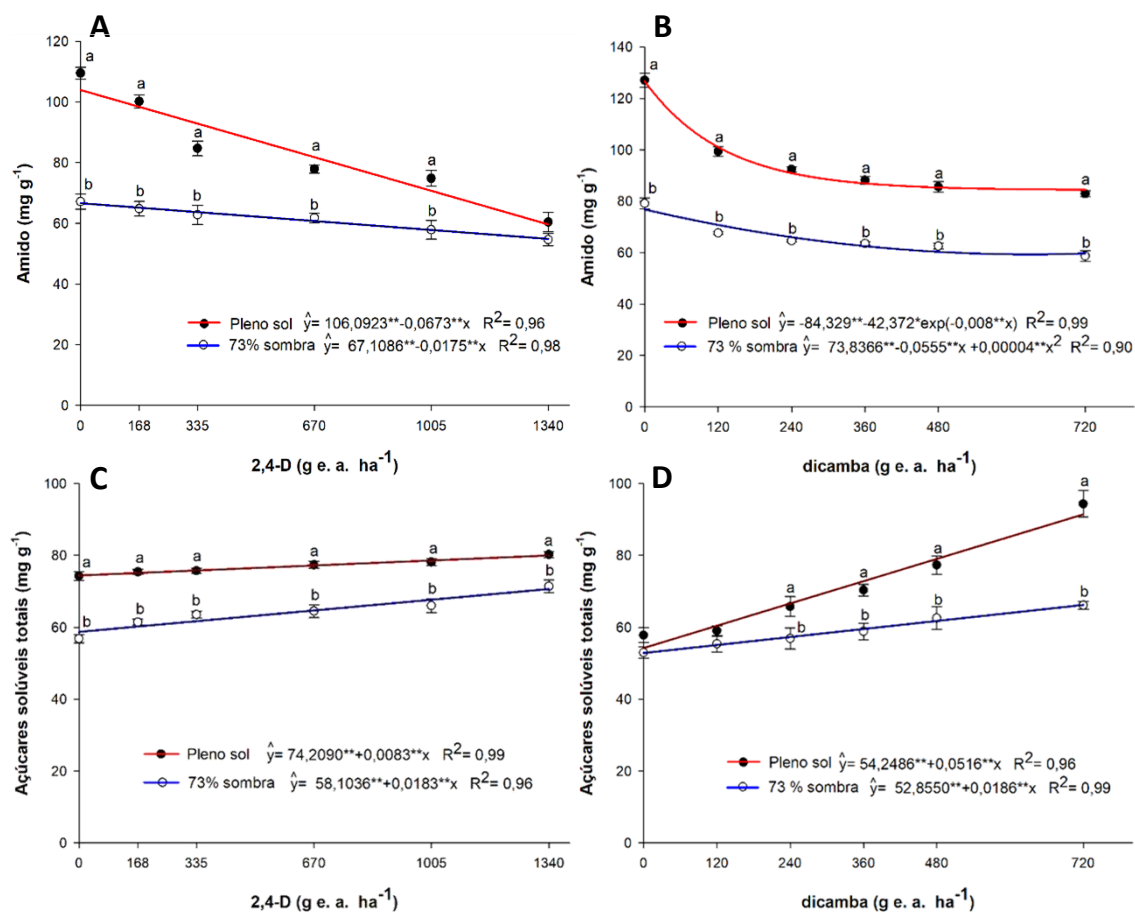
A taxa de transporte de elétrons (ETR) e a eficiência quântica do fotossistema II (Y) de *E. heterophylla* responderam de maneira distinta às doses de 2,4-D e dicamba nos ambientes de pleno sol e sombreamento (Figura 4). Com a aplicação de 2,4-D houve incremento inicial da ETR das plantas de *E. heterophylla* cultivada em pleno sol seguido de declínio nas maiores doses aplicadas. Plantas mantidas sob sombreamento não apresentaram variação ( $p > 0,05$ ) na ETR em função das doses de 2,4-D, com valores menores ( $p \leq 0,05$ ) ao pleno sol em todas as doses testadas (Figura 4A). A eficiência quântica do fotossistema II (Y) de *E. heterophylla* diminuiu linearmente com o aumento das doses de 2,4-D em pleno sol, enquanto em sombreamento permaneceu sem variação

( $p > 0,05$ ) e sempre maior ( $p \leq 0,05$ ) que ao observado em plantas no pleno sol, independentemente da dose aplicada (Figura 4C). No estudo com o dicamba a ETR de *E. heterophylla* diminuiu com o aumento das doses em ambas as condições ambientais de cultivo. Porém, os valores de ETR das plantas em pleno sol foram maiores ( $p \leq 0,05$ ) aos do sombreado (Figura 4B). Além disso, as doses de dicamba e a interação entre os fatores não influenciaram ( $p > 0,05$ ) na variável Y de *E. heterophylla*. No entanto, os valores dessa variável foram estatisticamente maiores no ambiente sombreado em comparação ao observado em plantas crescidas no pleno sol (Figura 4D).



**Figura 4.** Taxa de transporte de elétrons (ETR) e Eficiência quântica do fotossistema II (Y) de *Euphorbia heterophylla* aos 15 dias após a aplicação das doses de 2,4-D (A e C) e dicamba (B e D), respectivamente. Mesma letra entre os pontos de diferentes ambientes (na vertical), não diferem entre si pelo teste tukey a 5% de significância. \*\* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,05$ ) e \* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,01$ ).

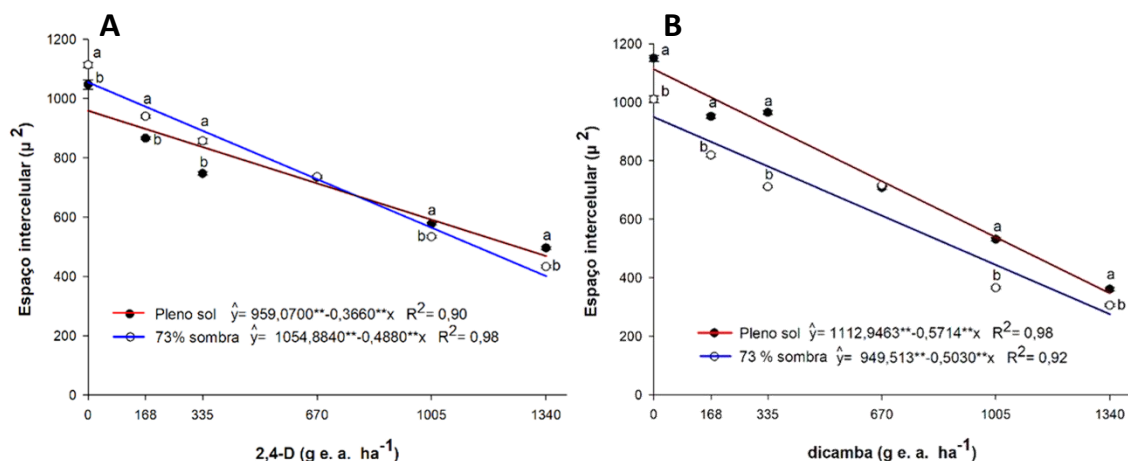
Aos 3 dias após a aplicação dos herbicidas, tanto o 2,4-D quanto o dicamba promoveram redução nas reservas de amido e aumento dos açúcares solúveis totais, independente do ambiente de cultivo de *E. heterophylla* (Figura 5). Para ambos os herbicidas, o teor de amido diminuiu com o aumento das doses, sendo que as plantas cultivadas em pleno sol apresentaram valores maiores ( $p \leq 0,05$ ) aos observados em sombreamento, em todas as doses avaliadas (Figura 5A e B). Em contrapartida, as doses crescentes de ambos os herbicidas promoveram aumento linear nos teores de açúcares solúveis totais. Além disso, as plantas cultivadas em pleno sol apresentaram maiores concentrações de açúcares solúveis totais e diferiram estatisticamente das plantas mantidas em sombreamento em todas as doses aplicadas (Figura 5C e D).



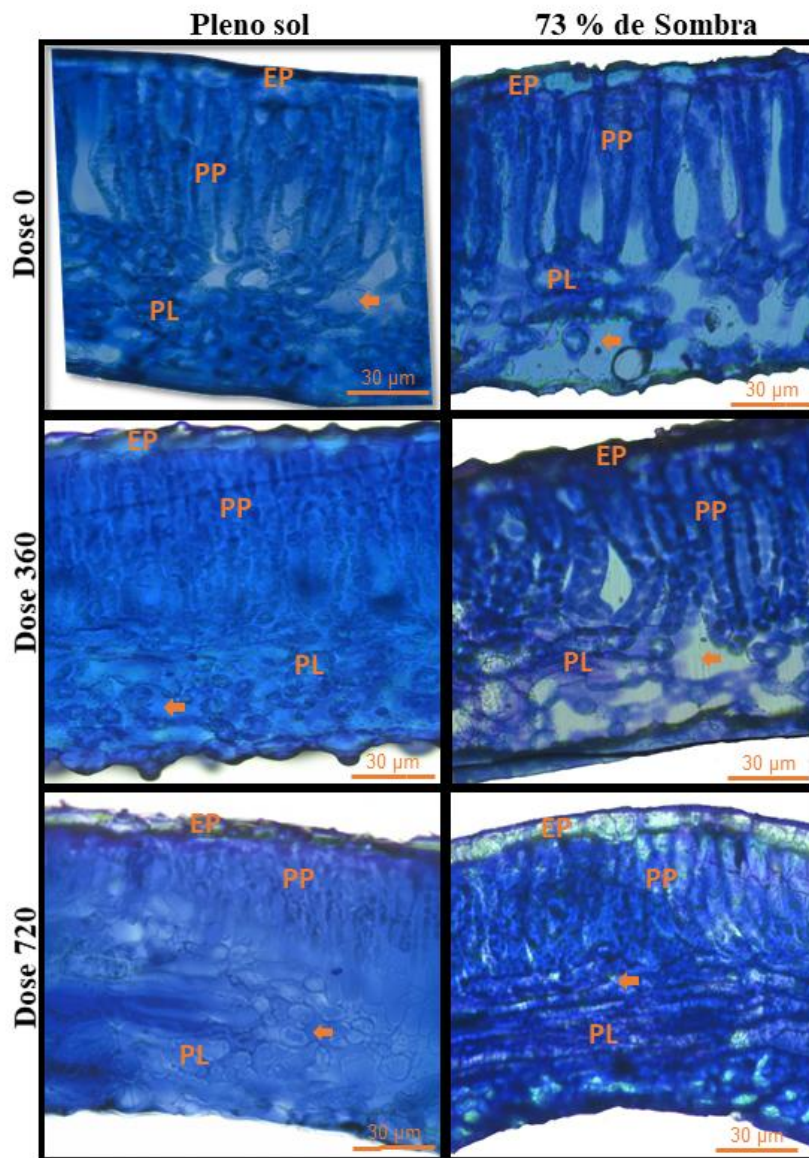
**Figura 5.** Acúmulo de amido e açúcares solúveis totais de *Euphorbia heterophylla* aos 3 dias após a aplicação das doses de 2,4-D (A e C) e dicamba (B e D), respectivamente. Mesma letra entre os pontos de diferentes ambientes (na vertical), não diferem entre si pelo teste tukey a 5% de significância. \*\* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,05$ ) e \* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,01$ ).

Aos 3 DAH os herbicidas, o ambiente e a interação entre os dois fatores não influenciaram ( $p > 0,05$ ) na anatomia estomática de *E. heterophylla*. Em pleno sol, as plantas tratadas com dicamba apresentaram índices estomáticos de 7,56% na face adaxial e 11,83% na abaxial. Por outro lado, a aplicação de 2,4-D resultou em índices de 8,66% e 11,96% nessas mesmas faces. Em sombreamento, os valores permaneceram dentro da mesma faixa, uma vez que a aplicação de dicamba resultou em índices de 8,03% e 12,60% nas faces adaxial e abaxial, enquanto o 2,4-D gerou 9,66% e 11,66%, respectivamente. Em relação a densidade estomática, plantas cultivadas em pleno sol e tratadas com o dicamba apresentaram 58 estômatos  $\text{mm}^{-2}$  na face adaxial e 104,46  $\text{mm}^{-2}$  na abaxial, enquanto plantas tratadas com 2,4-D apresentaram 69,1 e 102,23 estômatos  $\text{mm}^{-2}$  nas respectivas faces. Em sombreamento, a aplicação do dicamba resultou em 51,36 estômatos  $\text{mm}^{-2}$  na face adaxial e 91,20  $\text{mm}^{-2}$  na abaxial, enquanto que o 2,4-D resultou em 62,53 e 89,03 estômatos  $\text{mm}^{-2}$ , respectivamente.

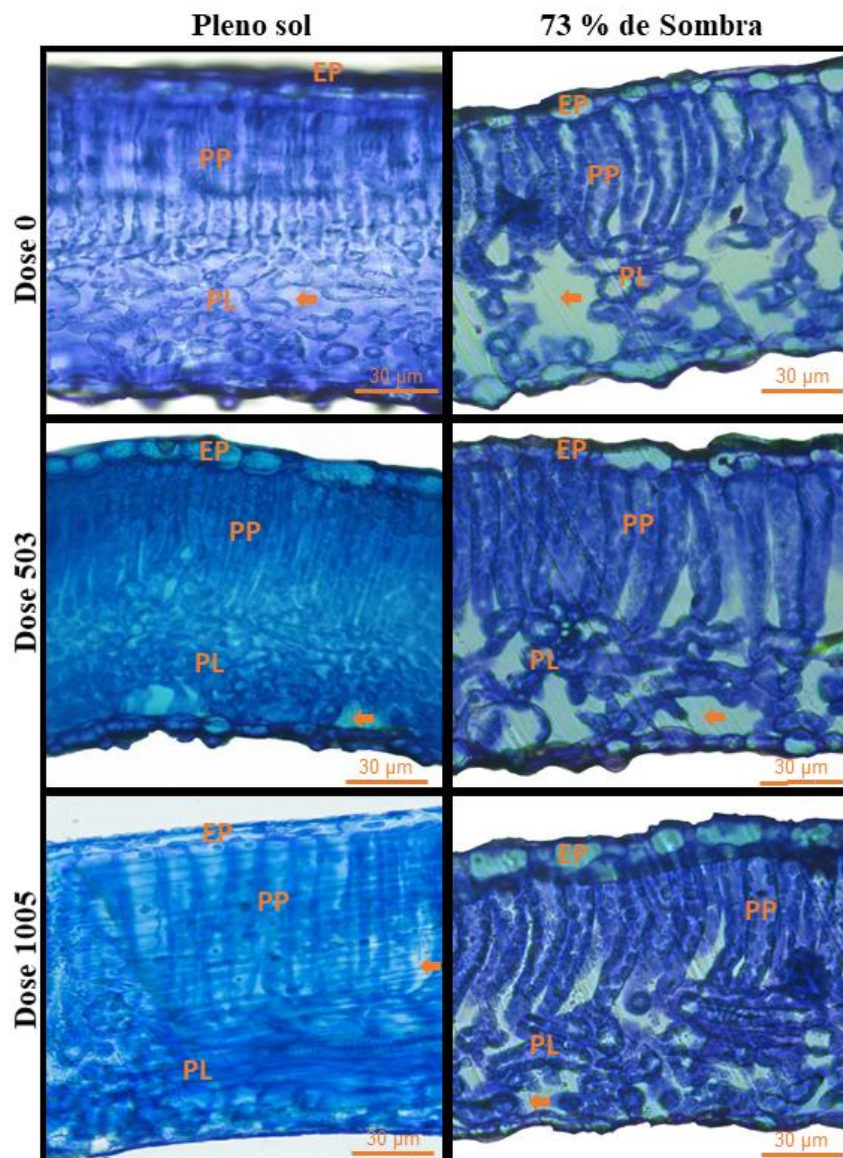
Aos 3 DAH, tanto o 2,4-D quanto o dicamba promoveram redução linear dos espaços intercelulares de *E. heterophylla* com o aumento das doses (Figura 6, 7 e 8). Os espaços intercelulares de *E. heterophylla* foram maiores em sombreamento até a dose de 786 g e. a.  $\text{ha}^{-1}$  de 2,4-D. No entanto, a partir dessa dose, passaram a ser superiores nas plantas cultivadas em pleno sol (Figura 6A). Já no estudo com o dicamba, em todas as doses avaliadas, as plantas cultivadas em pleno sol apresentaram maiores valores ( $p \leq 0,05$ ) de espaços intercelulares e diferiram estatisticamente daquelas mantidas em sombreamento, exceto para a dose de 670 g e. a.  $\text{ha}^{-1}$  (Figura 6B).



**Figura 6.** Espaços intercelulares de *Euphorbia heterophylla* aos 3 dias após a aplicação das doses de 2,4-D (A) e dicamba (B). Mesma letra entre os pontos de diferentes ambientes (na vertical), não diferem entre si pelo teste tukey a 5% de significância. \*\* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,05$ ) e \* significativo pelo teste tukey ( $p \leq 0,01$ ).



**Figura 7.** Cortes transversais da folha de *Euphorbia heterophylla* cultivadas a pleno sol ou com 73% de sombra, aos 3 dias após a aplicação das doses de dicamba. Setas laranjas = Espaço intercelular; EP = tecido celular da epiderme; PP = tecido celular do parênquima paliádico; PL = tecido celular do parênquima lacunoso.

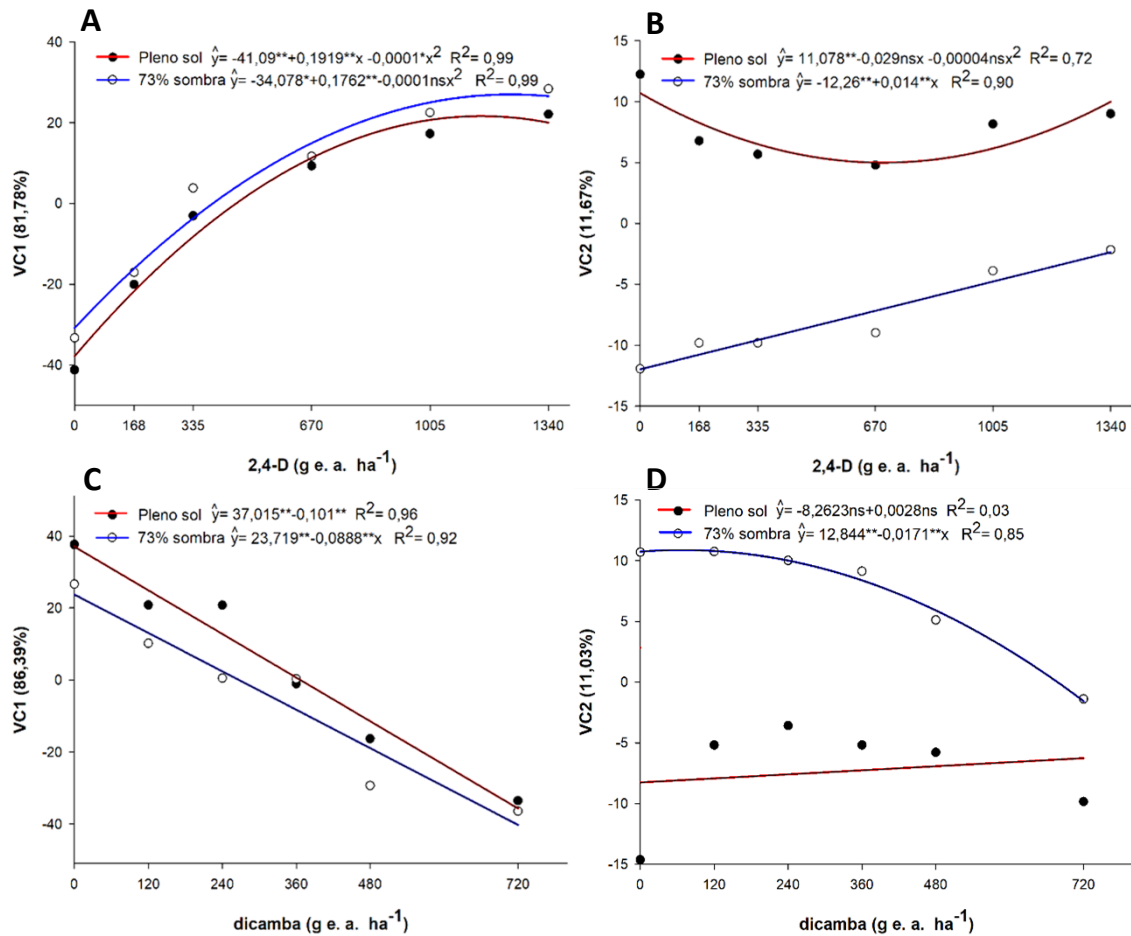


**Figura 8.** Cortes transversais da folha de *Euphorbia heterophylla* cultivadas a pleno sol ou com 73% de sombra, aos 3 dias após a aplicação das doses de 2,4-D. Setas laranjas = Espaço intercelular; EP = tecido celular da epiderme; PP = tecido celular do parênquima paliçádico; PL = tecido celular do parênquima lacunoso.

Na análise multivariada com variáveis canônicas o VC1 explicou 81,78% da variabilidade no estudo com 2,4-D (Figura 9A) e 86,39% no estudo com dicamba (Figura 9C). Verificou-se crescimento quadrático e redução linear com o aumento das doses de 2,4-D e dicamba nos dois ambientes de cultivo de *E. heterophylla*, respectivamente. Dessa forma, o controle apresentou forte correlação positiva (0,9616) com a VC1, indicando aumento do nível de controle à medida que aumenta as doses de 2,4-D foram elevadas. Em contrapartida, a massa seca total (-0,7587) e os espaços intercelulares (-0,9454) que apresentaram forte correlação negativa, diminuiram à medida que aumentou as doses de 2,4-D (Tabela 2). Já no estudo com o dicamba, o controle apresentou forte correlação negativa (-0,9116) com a VC1 e os espaços intercelulares apresentou forte correlação positiva (0,9991) (Tabela 2). Isso indica que à medida que aumentou as doses de dicamba, aumentou o controle e diminuiu os espaços intercelulares de *E. heterophylla*. Além disso, as demais variáveis avaliadas tanto no experimento com 2,4-D quanto com o dicamba, não tiveram alta correlação com a VC1. Isso indica essas variáveis foram menos afetadas no ponto de vista multivariado. A VC2 explicou apenas 11,67% da variabilidade no estudo com 2,4-D (Figura 9B) e 11,03% para o dicamba (Figura 9D), caracterizando um componente de menor importância para a interpretação dos resultados.

**Tabela 2** – Coeficientes de correlação explicada pelas funções canônicas obtidas a partir da análise multivariada das respostas de *Euphorbia heterophylla* submetida à aplicação de 2,4-D e dicamba em dois ambientes de cultivo.

| Variáveis                    | Correlações 2,4-D |         | Correlações dicamba |         |
|------------------------------|-------------------|---------|---------------------|---------|
|                              | VC1               | VC2     | VC1                 | VC2     |
| Controle                     | 0,9616            | -0,0226 | -0,9116             | -0,0983 |
| Açúcares solúveis totais     | 0,2993            | 0,9330  | -0,6254             | -0,5687 |
| amido                        | -0,6803           | 0,6470  | 0,6306              | -0,7570 |
| Massa seca total             | -0,7587           | 0,5371  | 0,6207              | -0,7484 |
| ETR                          | -0,3764           | 0,7212  | 0,4823              | -0,8399 |
| Y                            | -0,0840           | -0,8808 | -0,0540             | 0,8612  |
| Índice estomático adaxial    | 0,5830            | -0,1479 | -0,0204             | 0,2981  |
| Índice estomático abaxial    | 0,2920            | 0,1745  | -0,3830             | 0,4818  |
| Densidade estomática adaxial | 0,5108            | 0,2784  | -0,0910             | -0,2611 |
| Densidade estomática abaxial | 0,1101            | 0,4310  | -0,4935             | -0,3476 |
| Espaços intercelulares       | -0,9454           | -0,2375 | 0,9991              | -0,0325 |



**Figura 9.** Relação entre as duas variáveis canônicas (VC1 e VC2) e as doses de 2,4-D (A e B) e dicamba (C e D), avaliadas em plantas de *Euphorbia heterophylla* cultivadas em dois ambientes de cultivo. \* significativo pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ) e \*\* significativo pelo teste F ( $p \leq 0,01$ ) e ns = não significativo.

## DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo indicam que *E. heterophylla* apresenta plasticidade morfoanatômica e fisiológica em resposta tanto às variações de luminosidade quanto a exposição aos herbicidas 2,4-D e dicamba. Plantas de *E. heterophylla* cultivadas em sombreamento apresentam maior sensibilidade ao 2,4-D e dicamba, evidenciada pelos maiores níveis de controle e pela redução da massa seca em relação as plantas mantidas a pleno sol (Figura 3). Portanto, esse estudo destaca a relevância da disponibilidade de luz na definição de estratégias de manejo químico de plantas daninhas, uma vez que atributos anatômicos e fisiológicos modulados pela luminosidade do ambiente podem

influenciar significativamente na absorção, translocação e no efeito final dos herbicidas sobre o organismo alvo (Santos *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2022).

As plantas de *E. heterophylla* cultivadas em pleno sol apresentaram teor de cera epicuticular 83% maior que aquelas em sombreamento (Figura 2). Em condições de pleno sol, a maior luminosidade estimula a biossíntese de ceras epicuticulares como mecanismo de proteção contra perda de água e excesso de radiação (Guan *et al.*, 2024). As ceras epicuticulares são compostas predominantemente por longas cadeias de hidrocarbonetos, álcoois e ácidos graxos de alto peso molecular (Laskos *et al.*, 2021), cujas proporções desses componentes podem variar entre as espécies de plantas e os ambientes de cultivo (Costa *et al.*, 2020; Nogueira *et al.*, 2022). Esses compostos possuem natureza hidrofóbica, o que reduz a molhabilidade da superfície foliar e a penetração de herbicidas como 2,4-D e dicamba que são moléculas relativamente hidrofílicas (Staiger *et al.*, 2019; Islam *et al.*, 2018; Cuvaca *et al.*, 2020) e dependem da permeabilidade cuticular para atingir os tecidos-alvo. Assim, a maior deposição de cera nas plantas em pleno sol reduz a permeabilidade foliar, resultando em menor eficiência dos herbicidas nesse ambiente.

Os resultados de controle e massa seca total corroboram com esse efeito da cera epicuticular e da luminosidade na sensibilidade das plantas de *E. heterophylla* ao 2,4-D e dicamba (Figura 3). Aos 30 dias após a aplicação do herbicida (DAH) o controle de *E. heterophylla* foi excelente ( $\geq 91\%$ ) com a dose de  $554,80 \text{ g ha}^{-1}$  de 2,4-D em pleno sol. Já nas plantas sombreadas o controle excelente foi atingido com a aplicação de  $319,30 \text{ g ha}^{-1}$ , representando redução de 42,40% na dose em comparação ao pleno sol. No estudo com o dicamba, a eficácia alcançou nível considerado bom (80%) apenas na maior dose testada e exclusivamente em sombreamento, reforçando que a modificação da estrutura cuticular pela baixa luminosidade potencializa a penetração e a ação fitotóxica dos herbicidas. A massa seca total de *E. heterophylla* diminuiu conforme o aumento das doses de 2,4-D e dicamba aplicadas, sendo essa redução mais intensa em condições de sombreamento (Figura 3). Nesse ambiente, a maior dose de 2,4-D promoveu uma queda de 85,83% na massa seca total, enquanto em pleno sol a redução foi de 72,77% em relação as plantas não tratadas com o herbicida. O dicamba apresentou comportamento semelhante, resultando em diminuição de 59% da massa seca total em plantas mantidas em sombreamento. Esses resultados indicam a maior sensibilidade das plantas de *E. heterophylla* ao 2,4-D e ao dicamba quando crescidas em ambiente sombreado, em comparação aos indivíduos crescidos sob maior insolação. Além da menor deposição de cera epicuticular (Figura 2), plantas cultivadas em sombreamento apresentam menor

lignificação, paredes celulares mais delgadas e tecidos estruturalmente mais frágeis (Zhang *et al.*, 2022), características que aumentam sua sensibilidade aos processos de hiperplasia, hipertrofia e desorganização vascular induzidos pelos herbicidas mimetizadores de auxinas (Peterson *et al.*, 2016). Essas respostas de *E. heterophylla* é corroborada pela análise de correlação canônica, na qual a VC1 aumentou com o aumento das doses de 2,4-D em pleno sol e sombreamento, apresentando alta correlação positiva com o controle e correlação negativa com a massa seca total e os espaços intercelulares (Figura 9A) (Tabela 2). No estudo com dicamba, a VC1 diminuiu com o aumento das doses em pleno sol e sombreamento e apresentou alta correlação negativa com o controle e correlação positiva com os espaços intercelulares (Figura 9C) (Tabela 2). Isso evidencia que o aumento da intensidade do estresse induzido pelo dicamba e 2,4-D esteve diretamente associado à maior eficiência de controle e à redução da biomassa das plantas, bem como à diminuição dos espaços intercelulares das folhas.

A resposta fotoquímica de *E. heterophylla* ao 2,4-D e ao dicamba demonstra que esses herbicidas alteram a eficiência quântica do fotossistema II (Y) e a taxa de transporte de elétrons (ETR), com padrões de respostas distintos entre plantas de pleno sol e de sombreamento (Figura 4). Em pleno sol, o 2,4-D induziu um incremento inicial na ETR seguido de queda em doses superiores (Figura 4A), fenômeno compatível com a maior capacidade fotossintética de plantas aclimatadas a alta irradiância e com a fase de hiperativação metabólica (Grossmann *et al.*, 2010; Peterson *et al.*, 2016). Posteriormente, essa resposta inicial é superada por distúrbios fisiológicos desencadeados pelo 2,4-D e dicamba que desregulam o balanço hormonal, estimulam a biossíntese de etileno e aumenta a formação de espécies reativas de oxigênio (Grossmann *et al.*, 2010; Romero-Puertas *et al.*, 2022). O aumento dessas moléculas sinalizadoras e oxidantes promove estresse oxidativo, desencadeando peroxidação lipídica, desorganização das membranas tilacoidais e degradação acelerada da proteína D1 que é componente essencial para a renovação do centro de reação do fotossistema II (PSII) (Theis; Schroda, 2016; Foyer; Hanker, 2022). Como consequência, ocorre o declínio da ETR (Figura 4A) e redução da Y (Figura 4C), indicando perda progressiva da funcionalidade do PSII à medida que as doses de 2,4-D e dicamba aumentam. Em contrapartida, plantas mantidas sob sombreamento não apresentaram variação significativa da ETR e do Y em resposta às doses de 2,4-D ( $p > 0,05$ ) (Figura 3A), indicando capacidade limitada de ajustar a atividade fotoquímica sob condições de baixa irradiância. Essa limitação é característica de plantas aclimatadas ao sombreamento, as quais apresentam menor capacidade de

excitação eletrônica, menor densidade de centros de reação ativos e eficiência reduzida do PSII (Rossatto *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2024). Como resultado, a ETR permaneceu consistentemente inferior à observada em pleno sol ( $p \leq 0,05$ ) em todas as doses testadas (Figura 4A), evidenciando restrição fisiológica imposta pelo ambiente de baixa luminosidade.

Em pleno sol, a Y de *E. heterophylla* diminuiu de forma linear com o aumento das doses de 2,4-D (Figura 3C), resultado associado a intensificação da fotoinibição decorrente do estresse oxidativo e pela sobrecarga de energia luminosa causada pelo herbicida. Por outro lado, em sombreamento, a Y permaneceu estável e superior nesse ambiente (Figura 3C) visto que a baixa luminosidade confere proteção ao PSII contra fotoinibição e danos oxidativos, mesmo na presença do herbicida. Já com a aplicação de dicamba houve redução progressivamente na taxa de transporte de elétrons (ETR) em *E. heterophylla* tanto em pleno sol quanto em sombreamento (Figura 4B), resultado que pode ser explicado pelos mecanismos fisiológicos e bioquímicos associados à ação dos herbicidas auxínicos e à resposta fotoquímica das plantas. O dicamba, ao mimetizar a ação da auxina natural, desencadeia desregulação metabólica, o que resulta no aumento da síntese de espécies reativas de oxigênio além de causar alterações na integridade das membranas e provocar desbalanço energético celular (Grossmann, 2010; Traxler *et al.*, 2023). Os processos oxidativos causados pelos herbicidas hormonais compromete diretamente as estruturas dos tilacoides nos cloroplastos, afetando componentes essenciais da cadeia transportadora de elétrons, como a plastoquinona e citocromos (Murata *et al.*, 2007; Traxler *et al.*, 2023). Além disso, como a cadeia de transporte de elétrons é sensível ao estresse oxidativo, o impacto do herbicida se manifesta independentemente do ambiente luminoso, explicando por que tanto plantas de pleno sol quanto plantas sob sombreamento apresentaram queda na ETR.

A ausência de efeito das doses de dicamba e da interação entre os fatores sobre a Y em *E. heterophylla* ( $p > 0,05$ ) (Figura 4D) indica que a etapa inicial da fotossíntese responsável pela conversão de energia luminosa em energia química, permanece funcional mesmo sob a aplicação de diferentes doses de dicamba. Essa preservação da integridade fotoquímica funcional decorre da ativação de mecanismos fotoprotetores que atuam para evitar danos estruturais ao PSII quando a planta é submetida a estresse (Zhang *et al.*, 2024). Entre esses mecanismos fotoprotetores existe o ajuste dinâmico do aparato antena e principalmente a dissipação não fotoquímica mediada pelo ciclo das xantofilas (Zhang *et al.*, 2024). Nesse ciclo, a violaxantina, anteraxantina e zeaxantina são

interconvertidas conforme a intensidade luminosa e o estado energético do cloroplasto. Dentre essas três xantofilas, a zeaxantina é a mais eficaz na dissipação do excesso de energia luminosa na forma de calor, reduzindo a formação de espécies reativas de oxigênio e protegendo componentes essenciais do PSII, como a proteína D1 que é fundamental para a conversão da energia luminosa em energia química (Taiz; Zaiger, 2013; Demmig-Adams *et al.*, 2025). O fato de Y apresentar valores maiores em plantas sombreadas (Figura 4D) está ligado a fisiologia de folhas desenvolvidas sob baixa irradiância. Nesse ambiente, o aparato fotoquímico funciona em condições de menor saturação luminosa, o que reduz a formação de espécies reativas de oxigênio e mantém um maior número de centros de reação do PSII abertos (Li *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2025). Como resultado, a eficiência quântica do PSII é naturalmente mais alta em plantas cultivadas sob sombreamento do que naquelas expostas ao pleno sol, uma vez que a alta irradiância aumenta a pressão foto-oxidativa, intensifica a formação de espécies reativas de oxigênio e favorece a ocorrência de fotoinibição (Sharma *et al.*, 2023; Ruban, 2016).

Aos 3 DAH, tanto o 2,4-D quanto o dicamba reduziram os teores de amido e elevaram os açúcares solúveis totais em *E. heterophylla*, independentemente do ambiente de cultivo. Ainda assim, plantas mantidas em pleno sol apresentaram maiores valores de ambos os carboidratos em todas as doses avaliadas (Figura 5). Essa resposta está relacionada com o efeito dos herbicidas auxínicos no metabolismo de carboidratos, uma vez que mimetizam a auxina natural e desencadeiam desregulação metabólica afetando o gasto de energia pela planta (Grossmann, 2010; Marko; White, 2018). Essa desregulação causa o aumento da produção de etileno e de espécies reativas de oxigênio, fatores que intensificam processos catabólicos e comprometem a integridade celular. Em função desse cenário de estresse, a planta aciona mecanismos metabólicos destinados a garantir energia imediata para auxiliar na recuperação do estresse causado pelo herbicida (Grossmann, 2010; Baena-González, 2008). Entre esses mecanismos, destaca-se a ativação de vias de mobilização de reservas, que incluem o aumento da atividade de enzimas hidrolíticas, como amilases e invertases (Wang *et al.*, 2023). As amilases catalisam a degradação do amido em moléculas menores, como a glicose (Fan *et al.*, 2024). As invertases, por sua vez, hidrolisam sacarose em glicose e frutose, elevando ainda mais a quantidade de açúcares solúveis disponíveis (Liu *et al.*, 2025). Esse conjunto de reações provoca redução do conteúdo de amido, ao mesmo tempo em que aumenta as concentrações de açúcares solúveis, como observado no presente estudo (Figura 5). Por outro lado, plantas expostas à alta irradiância apresentam maior taxa fotossintética,

produzindo mais carboidratos e acumulando mais amido nos tecidos foliares, o que resulta em maiores teores de amido e açúcares mesmo após a mobilização induzida pelos herbicidas (Baker *et al.*, 2023; Kang *et al.*, 2024; Sen *et al.*, 2023).

A ausência de alterações significativas nos índices e na densidade estomática de *E. heterophylla* aos 3 DAH indica que a anatomia estomática permanece estruturalmente estável no curto prazo, mesmo diante das alterações na luminosidade no ambiente de cultivo. A estomatogênese é um processo lento e complexo, dependente de etapas sucessivas de diferenciação celular que se desenvolvem ao longo do crescimento foliar (Zhou *et al.*, 2024), o que explicaria a ausência de efeito da ação dos herbicidas 2,4-D e dicamba sobre essas variáveis. Desse modo, modificações detectáveis na densidade ou no índice estomático dificilmente se manifestam em intervalos de tempo curto, mesmo com a aplicação de herbicidas auxínicos, reconhecidos por causarem divisão e alongamento celular em plantas tratadas (Grossman, 2010; Song *et al.*, 2014). Contudo, os espaços intercelulares de *E. heterophylla*, mostraram elevada sensibilidade à aplicação do 2,4-D e dicamba, apresentando redução linear à medida que as doses foram aumentadas (Figura 6). O 2,4-D e o dicamba desencadeiam descontrole do crescimento celular, resultando em expansão desequilibrada e perda da coordenação entre divisão e alongamento celular (Muselikova; Muralova, 2024; Mundt *et al.*, 2024). Como consequência, ocorre aumento excessivo da pressão de turgor e relaxamento da parede celular devido à ativação desregulada de expansinas, hidrolases e outros moduladores da extensibilidade da parede celular (Majda; Robert, 2018). Dessa forma, essas alterações promovem a dilatação e multiplicação das células o que reduz o volume dos espaços intercelulares, uma vez que a expansão desordenada das células tende a ocupar os espaços intercelulares. Além disso, os resultados indicam que a organização dos espaços intercelulares em *E. heterophylla* é modulada pela interação entre o ambiente luminoso e o grau de estresse estrutural causado pelos herbicidas. No caso do 2,4-D, plantas mantidas em sombreamento apresentaram maiores espaços intercelulares até a dose de 786 g e.a. ha<sup>-1</sup> (Figura 6A), o que está relacionado com as modificações anatômicas de folhas aclimatadas à baixa luminosidade no ambiente. Plantas mantidas em sombreamento desenvolvem folhas mais delgadas com maior proporção de parênquima lacunoso (Théroux-Rancourt *et al.*, 2023). Essas características favorecem a maior proporção de espaços intercelulares sob condições de menor estresse. Entretanto, a partir dessa dose o dano anatômico induzido pelo 2,4-D se intensifica e provoca colapso e compactação do mesófilo em folhas sombreadas, fazendo com que as plantas de pleno sol passem a apresentar maior volume intercelular. No estudo

com dicamba, as plantas cultivadas em pleno sol apresentaram maiores proporção de espaços intercelulares na maioria das doses avaliadas, exceto na dose intermediária de 670 g e.a. ha<sup>-1</sup> (Figura 6B). Esse resultado indica que o dicamba causa danos estruturais mais intensos em folhas sombreadas, enquanto folhas de pleno sol, por apresentarem anatomia mais espessa e maior rigidez das células do mesófilo (Théroux-Rancourt *et al.*, 2023), possuem menor susceptibilidade ao colapso celular, mantendo assim maiores valores de proporção de espaços intercelulares mesmo diante do estresse causado pelo herbicida. Com isso, o arranjo anatômico dessas plantas se aproxima temporariamente daquele observado em folhas sombreadas. Assim, a resposta ao dicamba depende da interação entre a estrutura foliar moldada pela luminosidade e a intensidade do estresse causado pelo herbicida.

Plantas de *E. heterophylla* apresenta plasticidade morfoanatômica, fisiológica e bioquímica frente as variações de luminosidade e à exposição ao 2,4-D e dicamba, o que resulta em sensibilidade distinta entre plantas de pleno sol e de sombreamento. A luminosidade condiciona tanto a absorção quanto a resposta metabólica, fisiológicas e estrutural da planta aos herbicidas, afetando diretamente a eficácia desses herbicidas no controle dessa planta daninha. Em conjunto, essas respostas evidenciam que a disponibilidade de luz é um fator relevante na eficiência do manejo químico de *E. heterophylla*, determinando a dose necessária para alcançar níveis satisfatórios de controle dessa espécie. Assim, este trabalho destaca a importância de considerar a condição de luminosidade no ambiente ao definir estratégias de manejo, promovendo o uso mais eficiente dos herbicidas, diminuindo falhas de controle e contribuindo para práticas ambientalmente mais sustentáveis no manejo integrado de plantas daninhas.

## CONCLUSÃO

Plantas de *E. heterophylla* apresentam plasticidade morfoanatômica, fisiológica e bioquímica em resposta à luminosidade, o que modula sua sensibilidade aos herbicidas 2,4-D e dicamba.

Plantas de *E. heterophylla* mantidas em 73% de sombreamento apresentam maior suscetibilidade aos herbicidas, alcançando controle excelente com a dose de 319,30 g ha<sup>-1</sup> de 2,4-D, enquanto em pleno sol foi necessária a aplicação de 554,80 g ha<sup>-1</sup> para atingir o mesmo nível de eficácia. Para o dicamba, o controle efetivo da espécie ocorre exclusivamente em 73% de sombreamento e apenas na maior dose avaliada (670 g ha<sup>-1</sup>).

## Referências

AGOSTINI, L. P. et al. Effects of glyphosate exposure on human health: Insights from epidemiological and in vitro studies. **Science of the Total Environment**, v. 705, p. 135808, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135808>

AGROFIT - Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA). Brasília, DF: AGROFIT, c2003. Disponível em: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 02 jan. 2025.

AJIMI, A. et al. Prolonged artificial shade affects morphological, anatomical, biochemical and ecophysiological behavior of young olive trees (cv. Arbosana). *Scientia Horticulturae*, [S. l.], v. 241, p. 275-284, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.089>

ALAM - Asociación Latinoamericana de Malezas. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. *ALAM*, Bogotá, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.

BAENA-GONZÁLEZ, E.; SHEEN, J. Convergent energy and stress signaling. **Trends in plant science**, v. 13, n. 9, p. 474-482, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.06.006>

BAKER, C. R. et al. Time-resolved systems analysis of the induction of high photosynthetic capacity in *Arabidopsis* during acclimation to high light. **New Phytologist**, v. 240, n. 6, p. 2335-2352, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.19324>

CASTRO, R. A. et al. Selectivity and control of *Euphorbia heterophylla* in sugarcane by herbicide in post-emergence. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 58, n. 6, p. 506-513, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2235248>

CHEN, S. et al. Moderate Shading Improves Growth, Photosynthesis, and Physiological Traits in *Spuriopinella brachycarpa* (Kom.) Kitag. **Plants**, v. 14, n. 24, p. 3824, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14243824>

COSTA, G. A. et al. Efficiency of glyphosate and carfentrazone-ethyl in the control of *Macroptilium atropurpureum* (DC.) Urb. under different light intensities. *South African Journal of Botany*, [S. l.], v. 131, p. 302-309, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.028>

CUVACA, I. et al. Aumento da absorção e translocação contribuem para a melhoria da eficácia do dicamba no controle do estágio inicial de crescimento do amaranto-palmer (*Amaranthus palmeri*). **Weed Science**, v. 68, n. 1, p. 27-32, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.67>

DEMMIG-ADAMS, B. et al. Zeaxanthin and other carotenoids: Roles in abiotic stress defense with implications for biotic defense. **Plants**, v. 14, n. 17, p. 2703, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14172703>

FALES, F. The assimilation and degradation of carbohydrates by yeast cells. **Journal of Biological chemistry**, v. 193, n. 1, p. 113-124, 1951. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52433-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52433-4).

FAN, X. et al. Jasmonates promote  $\beta$ -amylase-mediated starch degradation to confer cold tolerance in tomato plants. **Plants**, v. 13, n. 8, p. 1055, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13081055>

FERREIRA, G. A. P. et al. Glyphosate doses should be lower for shaded environments: light and the sensitivity of *Euphorbia heterophylla*. *International Journal of Pest Management*, [S. l], v. 68, p. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09670874.2022.2056254>

FERREIRA, G. A. P. et al. Adequacy of glyphosate doses in the *Merremia cissoides* (Lam.) Hallier f. control as a function of light intensity in the growth environments. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 57, n. 12, p. 960-969, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2151790>

FOYER, C. H.; HANKE, G. ROS production and signalling in chloroplasts: cornerstones and evolving concepts. **The Plant Journal**, v. 111, n. 3, p. 642-661, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/tpj.15856>

GALON, L. et al. Competitive interaction between common black bean cultivars and *Euphorbia heterophylla*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, p. 254-260, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4851669>

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 66, n. 2, p. 113-120, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.1860>

GUAN, P. et al. Effects of Different Shade Treatments on the Epidermal Wax Deposition of Hosta Genotypes with Different Glauousness of Leaf Surface. **Horticulturae**, v. 10, n. 9, p. 981, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090981>

HENRY, J. L. et al. Persistence of dicamba residue in harvested soybeans. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, v. 7, n. 3, p. e20564, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20564>

HORVATH, D. P. et al. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. **Trends in Plant Science**, v. 28, n. 5, p. 567-582, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.12.014>

HUSSAIN, S. et al. Changes in morphology, chlorophyll fluorescence performance and Rubisco activity of soybean in response to foliar application of ionic titanium under normal light and shade environment. *Science of The Total Environment*, v. 658, p. 626-637, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.182>

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Relatórios de comercialização de agrotóxicos. Brasília: IBAMA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>

ISLAM, F. et al. Potential impact of the herbicide 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment international**, v. 111, p. 332-351, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.020>

KANG, Y. et al. High daily light integral positively regulate photosynthetic capacity through mediating nitrogen partitioning and leaf anatomical characteristic in flowering Chinese cabbage. **Scientia Horticulturae**, v. 326, p. 112715, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112715>

LASKOS, K. et al. Correlation between leaf epicuticular wax composition and structure, physio-biochemical traits and drought resistance in glaucous and non-glaucous near-isogenic lines of rye. **The Plant Journal**, v. 108, n. 1, p. 93-119, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/tpj.15428>

LI, Y. et al. Made in the shade: Leaf responses of native wildflowers to single-axis photovoltaic solar energy. **Plants, People, Planet**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ppp3.70138>

LIU, D. et al. Investigation of the Global Changes in Photosynthetic Electron Transport in Hosta Plants Grown Under Different Light Levels. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 23, p. 12876, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms252312876>

LIU, J. et al. Roles and Regulations of Acid Invertases in Plants: Current Knowledge and Future Perspectives. **Plants**, v. 14, n. 3, p. 320, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants14030320>

MAJDA, M.; ROBERT, S. The role of auxin in cell wall expansion. **International journal of molecular sciences**, v. 19, n. 4, p. 951, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms19040951>

MARKO, M. D.; WHITE, J. C. Direct comparison of herbicidal or biological treatment on *Myriophyllum spicatum* control and biochemistry. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1814, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01814>

MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual (1981–2010) e projeções futuras (2011–2100). **Revista Brasileira de Climatologia**, Itajubá, v. 1, Dossiê Climatologia de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>.

MCCREADY, R. M. et al. Determination of starch and amylose in vegetables. **Analytical chemistry**, v. 22, n. 9, p. 1156-1158, 1950. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ac60045a016>.

MENDES, K. F.; SILVA, A. A. **Plantas daninhas: herbicidas**. Editora UFV, Viçosa-MG, 344p. 2023.

MONTEIRO, A. L. M.; AZEVEDO, A. M. Multivariate Analysis: um pacote R para análise multivariada. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 47, n. 1, p. e74349, 2025. Disponível em: <https://DOI:10.4025/actasciagron.v47i1.74349>

MUNDT, T. T. et al. Dicamba: Dynamics in Straw (Maize) and Weed Control Effectiveness. **Agronomy**, v. 14, n. 10, p. 2294, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14102294>

MURATA, N. et al. Photoinhibition of photosystem II under environmental stress. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1767, n. 6, p. 414-421, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2006.11.019>

MUSELIKOVA, K.; MOURALOVA, K. Synthetic auxin herbicide 2, 4-D and its influence on a model BY-2 suspension. **Molecular Biology Reports**, v. 51, n. 1, p. 444, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11033-024-09392-x>

NOGUEIRA, M. S. et al. Luminous restriction and chemical control with glyphosate in integrated management of *Urochloa brizantha* L. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 17, p. e177111738758-e177111738758, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38758>,

NOVOTNY, E. Glyphosate, Roundup and the Failures of Regulatory Assessment. **Toxics**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. 321, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/toxics10060321>

O'BRIEN, T. P.; MCCULLY, M. E. The Study of Plant Structure: Principles and Selected Methods; Termarcarphi Pty. Ltd.: Melbourne, Australia, 1981, 45p.

OLIVEIRA, V. A. V. et al. Influence of tree shading on the desiccation of grasses with glyphosate and straw decomposition in a silvopastoral system. **Agroforestry Systems**, v. 100, n. 1, p. 20, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01396-1>

OLIVEIRA, V. A. V. et al. The light intensity in the cultivation environment and the impact of glyphosate on plants of the *Urochloa* genus. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 59, n. 8, p. 540-549, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2024.2381934>

PALMA-BAUTISTA, C. et al. Resistance to fomesafen, imazamox and glyphosate in *Euphorbia heterophylla* from Brazil. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1573, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101573>

PARVEN, A. et al. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 1181-1202, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>

PETERSON, M. A. et al. 2, 4-D past, present, and future: a review. **Weed Technology**, v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>

R Core Team (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 02 jan. 2026.

ROMERO-PUERTAS, M. C. et al. Insights into ROS-dependent signalling underlying transcriptomic plant responses to the herbicide 2, 4-D. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n. 2, p. 572-590, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.14229>

ROSSATTO, D. R. et al. Características funcionais de folhas de sol e sombra de espécies arbóreas em uma mata de galeria no Distrito Federal, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, p. 640-647, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000300007>

RUBAN, A. V. Nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching: mechanism and effectiveness in protecting plants from photodamage. **Plant physiology**, v. 170, n. 4, p. 1903-1916, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.15.01935>

SANTOS, S. A. et al. Influence of shading on the leaf morphoanatomy and tolerance to glyphosate in *Commelina benghalensis* L. and *Cyperus rotundus* L. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 2, p. 135-142, 2015. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.040996667183771>

SEN, M. K. et al. Comprehensive insights into herbicide resistance mechanisms in weeds: a synergistic integration of transcriptomic and metabolomic analyses. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1280118, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1280118>

SHARMA, N. et al. Photosystems under high light stress: throwing light on mechanism and adaptation. **Photosynthetica**, v. 61, n. 2, p. 250, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32615/ps.2023.021>

SONG, Y. Insight into the mode of action of 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) as an herbicide. **Journal of integrative plant biology**, v. 56, n. 2, p. 106-113, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jipb.12131>

STAIGER, S. et al. The permeation barrier of plant cuticles: uptake of active ingredients is limited by very long-chain aliphatic rather than cyclic wax compounds. **Pest Management Science**, v. 75, n. 12, p. 3405-3412, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.5589>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 5ª ed. Porto Alegre: Ed Artmed, 2013.

THEIS, J.; SCHRODA, M. Revisiting the photosystem II repair cycle. **Plant signaling & behavior**, v. 11, n. 9, p. e1218587, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15592324.2016.1218587>

THÉROUX-RANCOURT, G. et al. A análise da anatomia em três dimensões revela as diferenças na área difusiva do mesófilo entre folhas de *Vitis vinifera* expostas ao sol e à sombra. **AoB Plants**, v. 15, n. 2, p. plad001, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plad001>

TRAXLER, C. et al. The nexus between reactive oxygen species and the mechanism of action of herbicides. **Journal of Biological Chemistry**, v. 299, n. 11, p. 105267, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2023.105267>

WANG, J. et al. Effect of nicosulfuron on dynamic changes in the starch-sugar interconversion in sweet maize (*Zea mays* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 21, p. 59606-59620, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26766-z>

ZHANG, M. et al. Strategies for adaptation to high light in plants. **Abiotech**, v. 5, n. 3, p. 381-393, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42994-024-00164-6>

ZHANG, Y. et al. Anatomia foliar, fotossíntese e ultraestrutura dos cloroplastos de plântulas de *Heptacodium miconioides* revelam adaptação ao ambiente luminoso. **Environmental and Experimental Botany**, v. 195, p. 104780, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104780>

ZHOU, W. et al. Molecular mechanisms for regulating stomatal formation across diverse plant species. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 19, p. 10403, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms251910403>

#### **4.2 Artigo II – Análise computacional de imagens na avaliação do controle de trapoeraba por 2,4-D e dicamba sob diferentes luminosidades**

## Modelagem computacional a partir de imagens na avaliação do controle de plantas daninhas por 2,4-D e dicamba sob diferentes luminosidades

**Resumo:** A avaliação da eficiência de herbicidas no controle de plantas daninhas é etapa essencial em programas de manejo, porém métodos tradicionais baseados em estimativas visuais apresentam subjetividade, o que compromete a precisão e a reprodutibilidade dos resultados. Nesse contexto, o uso de imagens RGB obtidas por smartphones, aliado a índices de vegetação e algoritmos de aprendizado de máquina, surge como alternativa promissora para avaliações mais objetivas e automatizadas. O objetivo foi avaliar a eficiência do uso da visão computacional por meio de *Random Forest* na avaliação do controle de *Commelina benghalensis* pelos herbicidas dicamba e 2,4-D em diferentes condições de luminosidade, com uso de imagens de smartphone com sensores RGB. Foram realizados dois experimentos que se diferiram no herbicida utilizado. Foi empregado o delineamento de blocos casualizados com 5 repetições. Os tratamentos foram estabelecidos em esquema fatorial 2 x 6, onde o primeiro fator foi constituído por 2 ambientes de cultivo (pleno sol e 82% de sombreamento) e o segundo fator por 6 doses de herbicida. No primeiro experimento foram usadas as doses 0 (testemunha sem herbicida), 120, 240, 360, 480 e 720 g e. a. ha<sup>-1</sup> de dicamba (XTENDICAM®, 480 g e. a. L-1 de dicamba) e no segundo estudo 0 (testemunha sem herbicida), 168, 335, 670, 1.005 e 1.340 g e. a. ha<sup>-1</sup> de 2,4-D (AMINOL® 806, 670 g e. a. L -1) que foram aplicadas aos 30 dias após o transplântio das mudas de *C. benghalensis*. O controle de *C. benghalensis* foi avaliado em 8 épocas após a aplicação dos herbicidas, com registro de imagens RGB por smartphone. A partir dessas imagens, foram extraídos índices de vegetação e a proporção de pixels da planta, utilizados para o ajuste de modelos Random Forest, cuja performance foi avaliada por regressão linear, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro quadrático médio (EQM). O controle de *C. benghalensis* aumentou com as doses de 2,4-D, atingindo até 100% na maior dose em pleno sol, enquanto o dicamba apresentou controle suficiente somente na maior dose (61 a 70%) em pleno sol. Os índices espectrais mostraram ser influenciados pela luminosidade, com maior contraste em plantas cultivadas a pleno sol. Para o 2,4-D, os modelos Random Forest apresentaram elevado desempenho preditivo ( $R^2 = 93,2\%$ ; EQM = 0,011). Para o dicamba, a acurácia foi inferior ( $R^2 = 67,3\%$ ; EQM = 0,016), refletindo o menor nível de injúria visual. A modelagem conjunta dos dois herbicidas resultou em desempenho satisfatório ( $R^2 = 90,0\%$ ; EQM = 0,016). A porcentagem de pixels da planta foi a variável mais importante nos modelos, seguida pelos índices HUE, g/r e GLI. A associação de imagens RGB obtidas por smartphone com índices de vegetação e o algoritmo Random Forest permite criar modelos capazes de estimar com alta precisão ( $R^2 = 93,2\%$ ) a eficiência de controle de *C. benghalensis* pelo 2,4-D. Apesar da redução de acurácia no cenário envolvendo dicamba ( $R^2 = 67,3\%$ ), o modelo apresenta desempenho satisfatório quando os dois herbicidas são considerados simultaneamente ( $R^2 = 90,0\%$ ), indicando boa capacidade de generalização. A abordagem representa uma alternativa prática, de baixo custo e eficiente comparada as avaliações visuais tradicionais, com potencial aplicação em condições reais de campo.

**Palavras-Chave:** Random Forest, Índices de vegetação RGB, *Commelina benghalensis*, Controle químico, Luminosidade.

## ABSTRACT

The evaluation of herbicide efficacy in weed control is an essential step in management programs; however, traditional methods based on visual assessments are subjective, compromising the precision and reproducibility of results. In this context, the use of RGB images captured with smartphones, combined with vegetation indices and machine learning algorithms, emerges as a promising alternative for more objective, automated evaluations. The objective of this study was to assess the efficiency of computer vision using the Random Forest algorithm to evaluate the control of *Commelina benghalensis* by dicamba and 2,4-D under different light conditions, using smartphone-acquired RGB images. Two experiments were conducted, differing in the herbicide used. A randomized complete block design with five replicates was adopted. Treatments were arranged in a 2 × 6 factorial scheme, with the first factor comprising two growing environments (full sun and 82% shading) and the second comprising six herbicide doses. In the first experiment, dicamba (XTENDICAM®, 480 g a.e. L<sup>-1</sup>) was applied at doses of 0 (untreated control), 120, 240, 360, 480, and 720 g a.e. ha<sup>-1</sup>. In the second experiment, 2,4-D (AMINOL® 806, 670 g a.e. L<sup>-1</sup>) was applied at doses of 0 (untreated control), 168, 335, 670, 1,005, and 1,340 g a.e. ha<sup>-1</sup>. Applications were performed 30 days after transplanting *C. benghalensis* seedlings. Control of *C. benghalensis* was evaluated at eight time points after herbicide application, with RGB images recorded using a smartphone. From these images, vegetation indices and plant pixel proportion were extracted and used as input variables to fit Random Forest models. Model performance was evaluated using linear regression, coefficient of determination (R<sup>2</sup>), and mean squared error (MSE). Control of *C. benghalensis* increased with 2,4-D dose, reaching 100% at the highest dose under full sun, whereas dicamba provided sufficient control only at the highest dose (61–70%). Spectral indices were influenced by light conditions, with greater contrast observed in plants grown under full sun. For 2,4-D, Random Forest models showed high predictive performance (R<sup>2</sup> = 93.2%; MSE = 0.011). For dicamba, accuracy was lower (R<sup>2</sup> = 67.3%; MSE = 0.016), reflecting the lower level of visible injury. Joint modeling of both herbicides resulted in satisfactory performance (R<sup>2</sup> = 90.0%; MSE = 0.016). The proportion of plant pixels was the most important variable in the models, followed by the HUE, g/r, and GLI indices. The combination of smartphone-acquired RGB images, vegetation indices, and the Random Forest algorithm enables the development of models capable of accurately estimating (R<sup>2</sup> = 93.2%) the control efficiency of *C. benghalensis* by 2,4-D. Although accuracy decreased in the dicamba scenario (R<sup>2</sup> = 67.3%), the model performed satisfactorily when both herbicides were considered simultaneously (R<sup>2</sup> = 90.0%), indicating good generalization capacity. This approach represents a practical, low-cost, and efficient alternative to traditional visual assessments, with potential application under real field conditions.

**Keywords:** Random Forest, RGB vegetation indices, *Commelina benghalensis*, chemical control, light conditions.

## INTRODUÇÃO

As plantas daninhas representam um dos principais fatores que comprometem a rentabilidade dos sistemas agrícolas (Horvath *et al.*, 2023). *Commelina benghalensis*, popularmente conhecida como trapoeraba é uma planta daninha prejudicial para cultivos agrícolas e florestais. Essa infestante acomete a cultura da soja (Silva; Mendes; Karam, 2024), amendoim (Daramola *et al.*, 2024), interfere no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* (Costa *et al.*, 2021) e na produtividade de grão-de-bico (Teixeira *et al.*, 2017), entre várias outras culturas de interesse comercial. Dentre os diversos tipos de manejo de plantas daninhas existentes, o uso de herbicidas é o mais utilizado na agricultura moderna devido a sua eficiência, rapidez e viabilidade no controle em relação aos outros métodos, principalmente em plantios em larga escala (Parven *et al.*, 2025).

O glyphosate é o herbicida mais utilizado no mundo (Ahuja *et al.*, 2024). Porém, o surgimento de plantas daninhas resistentes ou tolerantes ao glyphosate como a trapoeraba (Monquero *et al.*, 2004) tem levado a busca por outros herbicidas. Com a inserção da tecnologia de soja resistente ao dicamba no mercado (Henry *et al.*, 2024) e resistente ao 2,4-D (Conkesta E3), o uso destes herbicidas no controle de plantas daninhas se torna uma alternativa favorável cuja a adoção pelos agricultores deve ser crescente.

A adoção do controle químico com herbicidas envolve etapas como diagnóstico de plantas daninhas, escolha do produto e dose a ser usada, aplicação e avaliação do controle. A avaliação do controle das plantas daninhas pelos herbicidas é essencial em programas de manejo integrado de plantas daninhas. A avaliação da eficiência dos herbicidas no controle de plantas daninhas, é realizada por avaliações visuais, atribuindo notas de controle conforme os sintomas de fitotoxicidade (Frans, 1972; SBCPD, 1995; Ghimire *et al.*, 2023) e pela redução de biomassa das plantas (Oliveira *et al.*, 2024). No entanto, esses métodos apresentam limitações que comprometem a precisão e a reprodutibilidade dos resultados (Fellmann *et al.*, 2024). Diferentes avaliadores, mesmo quando treinados, interpretam de forma heterogênea os sintomas de fitotoxicidade e a redução da biomassa das plantas, gerando inconsistência nos dados coletados (Gómez-Zamanillo *et al.*, 2023).

O uso da visão computacional e o processamento de imagens tem sido adotado em diferentes frentes na agricultura inclusive na proteção de plantas. No manejo de plantas daninhas o processamento computacional de imagens tem sido usado para diferenciação de culturas na presença de ervas daninhas (Moazzam *et al.*, 2023), aumentar a precisão da aplicação de herbicidas (Asad e Bais, 2020; Sanchez; Zhang, 2022), na

segmentação de áreas infestadas utilizando redes neurais convolucionais (Silva *et al.*, 2024a), desenvolver sistemas inteligentes de aplicação de herbicidas (Upadhyay *et al.*, 2024), identificar e classificar plantas daninhas com precisão (Niu *et al.*, 2025; Yang *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022) e no controle autônomo de plantas daninhas (Raja *et al.*, 2023).

O uso de imagens capturadas por smartphones, aliado a índices de vegetação e técnicas de inteligência artificial, representa uma abordagem inovadora e acessível para a avaliação do controle de plantas daninhas em sistemas agrícolas. Essa combinação tecnológica permite superar limitações da avaliação visual tradicional da eficácia de controle pelos herbicidas, ao oferecer uma alternativa automatizada, precisa e de baixo custo.

Uma das ferramentas de inteligência artificial que pode ser usada na avaliação de controle de plantas daninhas é o algoritmo *Random Forest* (RF), pertencente à classe dos métodos de aprendizado de máquina baseados em árvores de decisão (Breiman, 2001). O RF se destaca por sua capacidade de construir múltiplas árvores de decisão a partir de subconjuntos aleatórios de dados e variáveis, o que lhe confere alta tolerância a colinearidades e desempenho em conjuntos de dados complexos e de grande dimensão (Belgiu; Drăgut, 2016). O RF tem sido aplicado com sucesso em diferentes ramos das ciências agrárias, como na previsão de produtividade agrícola (Dhillon *et al.*, 2023), estimativa do teor de umidade de plantas (Impollonia *et al.*, 2022) e integração de dados de sensoriamento remoto com métricas de paisagem para o monitoramento de padrões de cultivo (Banerjee *et al.*, 2025).

A elaboração de modelos capazes de estimar a eficiência de controle de *Commelina benghalensis* pelos herbicidas dicamba e 2,4-D, utilizando índices de vegetação como variáveis de entrada obtidas a partir de imagens de smartphone com sensores RGB, apresenta potencial para uso em avaliações de campo, sendo alternativa mais prática e eficiente em comparação aos métodos tradicionais de avaliação. Logo, o objetivo foi avaliar a eficiência do uso da visão computacional e *Random Forest* na avaliação de controle de *Commelina benghalensis* pelos herbicidas dicamba e 2,4-D em diferentes condições de luminosidade, com uso de imagens de smartphone com sensores RGB.

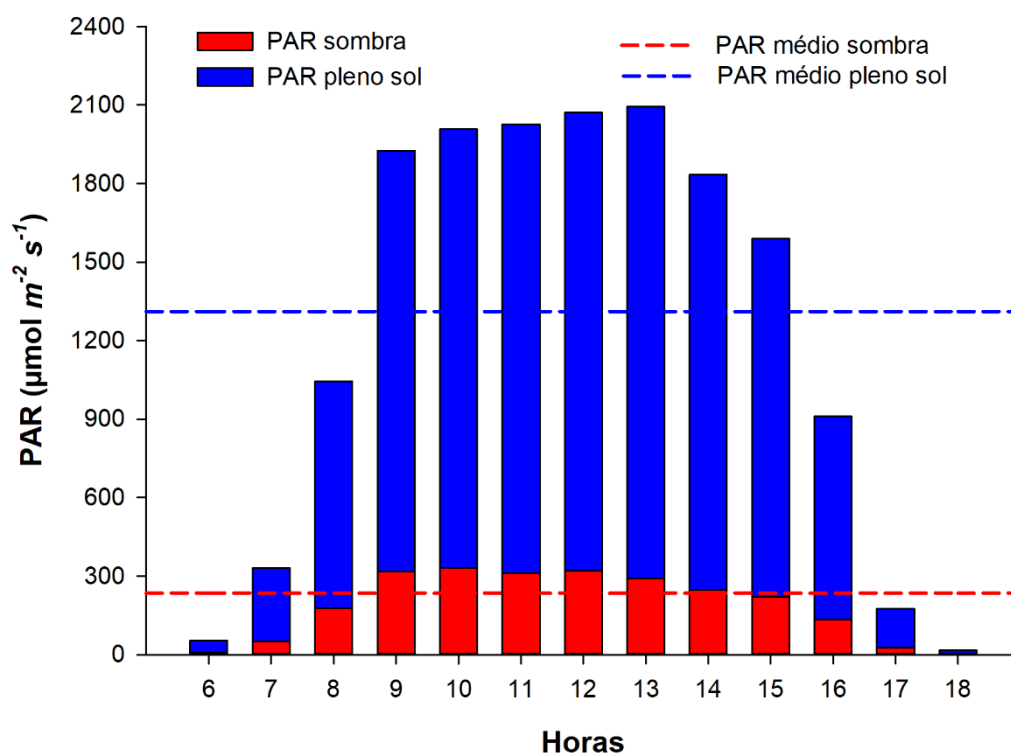
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Instalação do experimento e materiais utilizados

Foram conduzidos dois experimentos de controle químico de *Commelina benghalensis* que diferiram quanto aos herbicidas e as doses utilizadas. Os experimentos foram conduzidos no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (16°40'58.10"S, 43°50'19.03"W). Segundo a classificação de Köppen, Montes Claros - MG apresenta clima do tipo Aw, caracterizado por uma estação seca no inverno e chuvas concentradas no verão (Martins *et al.*, 2018).

As mudas de *C. benghalensis* foram colhidas a campo e transplantadas em vasos de 8 litros contendo solo com as seguintes características físicas e químicas: pH em água – 6,1; P mehlich – 363,6 mg dm<sup>-3</sup>; K – 550,3 mg dm<sup>-3</sup>; Ca – 8,54 cmolc dm<sup>-3</sup>; Mg – 1,96 cmolc dm<sup>-3</sup>; areia - 22 dag kg<sup>-1</sup>; silte - 37 dag kg<sup>-1</sup>; argila - 41 dag kg<sup>-1</sup>; saturação por bases - 89,85 % e teor de matéria orgânica – 3,30 dag kg<sup>-1</sup>. As unidades experimentais foram compostas por vasos contendo uma planta. As plantas foram cultivadas em duas condições ambientais: pleno sol e 82,00% ± 0,41 % de sombreamento. O sombreamento foi obtido por meio de tela sombrite 80% de polipropileno cor preta fixada em suportes de madeira a dois metros de altura, fechando as laterais.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) nos ambientes de cultivo foram medidas utilizando o aparelho ceptômetro AccuPar LP-80 (Decagon devices, Pullman USA). As medições foram realizadas a cada uma hora no período das 06:00 às 18:00 horas por sete dias aleatórios, ao longo do experimento (Figura 1). A porcentagem de interceptação de luz da tela sombrite corresponde ao nível de sombreamento produzido. Esse valor foi calculado para cada horário comparando a intensidade de luz a pleno sol com a registrada sob a tela sombrite (Figura 1). O sombreamento de 82,00% foi o nível médio obtido nos diferentes horários avaliados e ± 0,41% foi o erro padrão associado à média. A umidade do solo foi controlada por meio de irrigações diárias, sendo mantida entre 80 a 100% da capacidade de campo.



**Figura 1.** Variação da disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) nos ambientes de cultivo e a porcentagem de interceptação de luz promovida pelo sombrite entre 06:00 e 18:00 horas.

### **Delineamento experimental e tratamentos**

Ambos os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos casualizados com 5 repetições em esquema fatorial 2 x 6. O primeiro fator comum em ambos os experimentos foi constituído pelos ambientes de cultivo pleno sol e sombreado com 82,00% de interceptação luminosa. O segundo fator no primeiro experimento, foi composto pelas doses 0, 120, 240, 360, 480 e 720 g ha<sup>-1</sup> de equivalente ácido de dicamba (XTENDICAM<sup>®</sup>, 480 g e. a. L<sup>-1</sup> de dicamba) e no segundo experimento, pelas doses 0, 168, 335, 503, 670, 1.005 g ha<sup>-1</sup> de equivalente ácido de 2,4-D (AMINOL<sup>®</sup> 806, 670 g e. a. L<sup>-1</sup>). As parcelas experimentais foram constituídas por vasos de 8 litros contendo uma planta.

As doses de dicamba e 2,4-D foram aplicadas aos 30 dias após o transplante das mudas de *C. benghalensis* com pulverizador costal equipado com ponta modelo TTI 110-

02 (Teejet, Wheaton, USA) e válvula reguladora de pressão constante a 200 KPa (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), com o volume de 112 L ha<sup>-1</sup> de calda.

### **Avaliações de controle e obtenção das imagens com smartphone**

Aos 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25 e 28 dias após a aplicação dos herbicidas (DAH), foram feitas avaliações visuais de controle das plantas pelos herbicidas, por três avaliadores treinados utilizando uma escala de notas de 0 a 100%, onde 0 é a inexistência de injúrias causadas pelos herbicidas e 100 a morte da planta, conforme a metodologia proposta por ALAM (1974) (Tabela 1). A nota atribuída a cada parcela foi obtida através da média aritmética simples das três notas de controle, uma de cada avaliador, para cada época de avaliação.

Tabela 1 - Escala de notas utilizada na avaliação de controle de plantas daninhas por herbicidas (Alam, 1974).

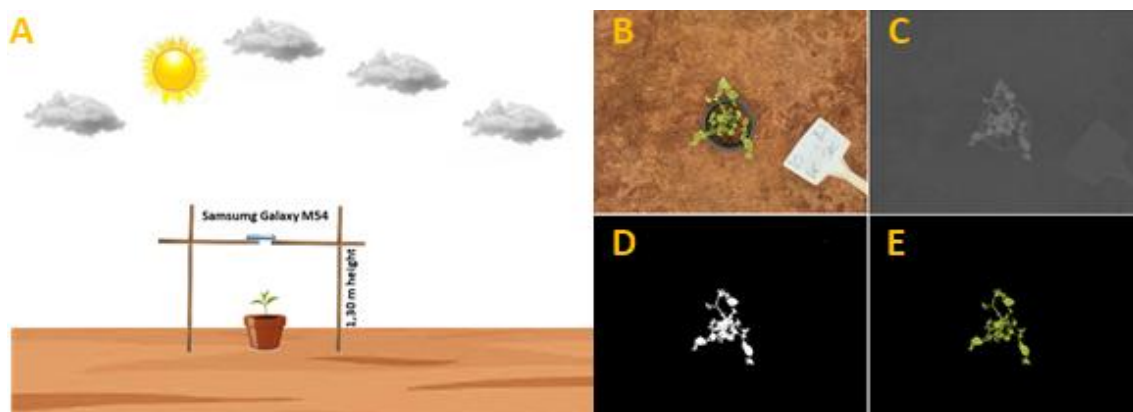
| <b>Controle (%)</b> | <b>Nota e Classificação</b> |
|---------------------|-----------------------------|
| 0 - 40              | 1 – Nenhum/pobre            |
| 41 - 60             | 2 - Regular                 |
| 61 - 70             | 3 - Suficiente              |
| 71 - 80             | 4 - Bom                     |
| 81 - 90             | 5 - Muito bom               |
| 91 - 100            | 6 - Excelente               |

Em cada época de avaliação do controle foram obtidas imagens de cada unidade experimental, totalizando 480 imagens para cada herbicida. Para obtenção de imagens foi utilizada uma câmera de um smartphone Samsung Galaxy M54 modelo (SM-M546B/DS 256 GB) através da lente principal com sensor de 108 MP (OIS). As imagens foram capturadas utilizando um suporte de madeira projetado para sustentar o *smartphone*, garantindo a estabilidade da câmera durante a captura e a padronização da distância (Figura 2A), no período das 11 às 12 horas.

O suporte foi fixado no chão em pleno sol e todas as unidades experimentais foram movidas para captura das fotos. A altura de captura das imagens foi de 1,30 m, buscando manter a posição da câmera em 90° em relação ao solo. O smartphone foi configurado para a obtenção das imagens na resolução de 12000 x 9000 pixels, capturando as imagens no modo automático, ativando o foco automático de detecção de fase (Autofocos PDAF).

## Análise de imagens

A análise de imagens foi realizada utilizando o pacote ExpImage (Azevedo, 2022) no software R. Para cada pixel da imagem (Figura 2B), foram obtidos os valores das bandas de vermelho (r), verde (g) e azul (b), a partir dos quais foi calculado o índice g/rgb (Figura 2C). Esse índice foi escolhido por permitir uma eficiente distinção entre o foreground (planta) e o background (solo, vaso, placa de identificação, etc.). A segmentação da imagem foi realizada considerando como foreground os pixels com índice g/rgb superior ao limiar de 0,4, enquanto os demais foram classificados como background (Figura 2D). O índice e o limiar foram estabelecidos com o método da tentativa e erro. Em seguida, foi calculada a porcentagem de pixels correspondentes ao foreground para cada imagem. Além disso, foram estimadas as médias de 25 índices (Tabela 1) considerando apenas os pixels do foreground (Figura 2E) em cada uma das imagens. Desta forma, foi obtida uma tabela de 960 linhas (2 luminosidades x 6 doses x 5 repetições x 8 avaliações x 2 herbicidas) e 27 colunas (25 índices, porcentagem de pixels correspondente a planta e nota média dada pelos avaliadores).



**Figura 2.** (A) Representação esquemática da captura das fotos de *Commelina benghalensis* submetidas a aplicação de 2,4-D e dicamba, (B) Imagens de uma planta de *C. benghalensis* considerando as bandas rgb, (C) após o uso do índice “r/rgb”, (D) após a segmentação, (E) e após a extração do background.

**Tabela 1.** Índices estimados em imagens obtidas por *smartphone* na avaliação do controle de *Commelina benghalensis* com dicamba e 2,4-D.

| Índices  | Estimador                         |
|--|-----------------------------------|
| <i>r</i>   | Banda do vermelho                 |
| <i>g</i>   | Banda do verde                    |
| <i>b</i>   | Banda do azul                     |
| <i>rg</i> (mean of red and green)                      | $(r+g)/2$                         |
| <i>rb</i> (mean of red and blue)                       | $(r+b)/2$                         |
| <i>gb</i> (mean of green and blue)                     | $(g+b)/2$                         |
| <i>rgb</i> (mean of red, green and blue))              | $(r+g+b)/3$                       |
| <i>r/g</i> (red/green ratio)                           | $r/g$                             |
| <i>r/b</i> (red/blue ratio)                            | $r/b$                             |
| <i>g/r</i> (green/red ratio)                           | $g/r$                             |
| <i>g/b</i> (green/blue ratio)                          | $g/b$                             |
| <i>b/r</i> (blue/red ratio)                            | $b/r$                             |
| <i>b/g</i> (blue/green ratio)                          | $b/g$                             |
| <i>S</i>   | $((r+g+b)-3b)/(r+g+b)$            |
| <i>BI</i> (Brightness Index)                           | $\text{sqrt}((r^2+g^2+b^2)/3)$    |
| <i>BIM</i>   | $\text{sqrt}((2r+2g+2b)/3)$       |
| <i>SCI</i> (Soil Color Index)                          | $(r-g)/(r+g)$                     |
| <i>GLI</i> (Green Leaf Index)                          | $(2g-r-b)/(2g+r+b)$               |
| <i>HI</i> (Hue Index)                                  | $(2r-g-b)/(g-b)$                  |
| <i>NGRDI</i> (Normalized Green Red Difference Index)   | $(g-r)/(g+r)$                     |
| <i>SI</i> (Spectral Slope Saturation Index)            | $(r-b)/(r+b)$                     |
| <i>VARI</i> (Visible Atmospherically Resistant Index)  | $(g-r)/(g+r-b)$                   |
| <i>HUE</i> (Overall Hue Index)                         | $\text{atan}(2(b-g-r)/30.5(g-r))$ |
| <i>MPRI</i> (Modified Photochemical Reflectance Index) | $(g-r)/(g+r)$                     |
| <i>ExG</i> (Excess Green)                              | $(2*g-r-b)$                       |

## Análise dos dados

Inicialmente, foi elaborado um gráfico de linhas para visualizar os valores médios das notas visuais em função dos diferentes níveis de sombreamento e dos herbicidas utilizados. Para representar os valores médios dos índices e a porcentagem de pixels correspondentes ao foreground (Perc), foi construído um gráfico de frio utilizando o pacote `corrplot` (Fey *et al.*, 2021) no software R (R Core Team, 2025).

Para avaliar a associação entre as notas visuais, os índices e a Perc, foram estimados o coeficiente de correlação de Pearson e o coeficiente de determinação, considerando o ajuste de uma regressão polinomial de primeiro grau. Esses coeficientes foram apresentados em um gráfico de barras, elaborado com o auxílio do pacote `ggplot2` (Wickham, 2016).

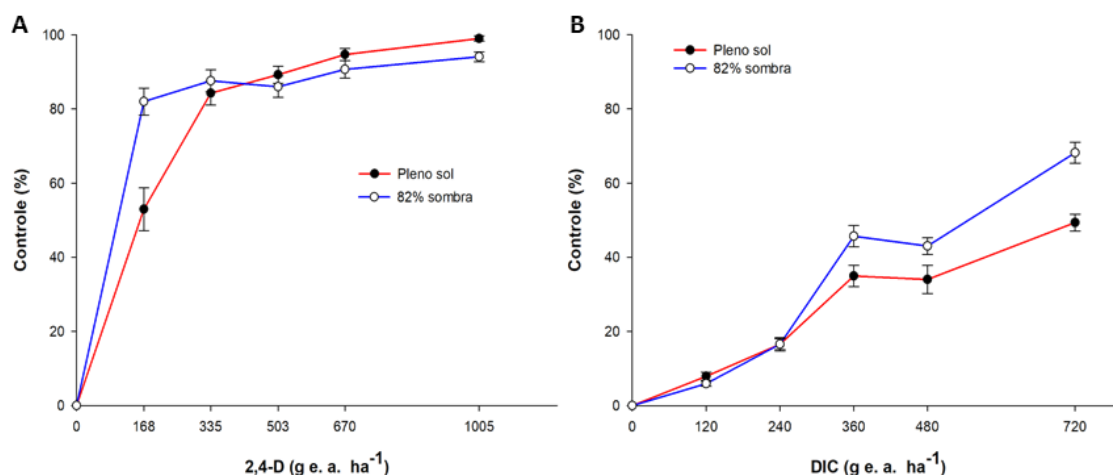
Para o ajuste de modelos pelo *Random Forest* foram realizadas três análises, uma apenas com os dados do experimento utilizando o herbicida 2,4-D, outra apenas com os dados do experimento utilizando o herbicida dicamba e uma terceira análise considerando os dados dos dois experimentos simultaneamente. Em cada análise, os dados foram normalizados para variar entre 0 e 1. Posteriormente foram divididos em amostras de treinamento e validação utilizando o pacote `RSNNS` (Bergmeir; Benítez, 2012), com 70% dos dados destinados ao treinamento e 30% à validação separados aleatoriamente. Como variáveis de entrada (independentes), foram consideradas 26 variáveis (25 índices estimados e a Perc), enquanto a variável de saída (dependente) foi a nota visual.

A predição das notas visuais foi realizada por meio do algoritmo *Random forest* implementada no pacote `randomForest` (Camadini *et al.*, 2024). Para minimizar os efeitos da aleatoriedade inerentes ao processo iterativo do ajuste do modelo e, ao mesmo tempo, melhorar sua precisão, robustez e capacidade de generalização, foi aplicado o método ensemble, ajustando-se cada modelo 1.000 vezes. A nota estimada para cada imagem foi dada pela média dos valores preditos destes 1000 ajustes.

A eficiência dos modelos ajustados foi avaliada por meio da regressão linear entre as notas visuais observadas e as estimadas, sendo calculados o coeficiente de determinação e o erro quadrático médio. Os resultados foram apresentados em gráficos de regressão gerados com o pacote `ggplot2`. Esse mesmo pacote foi utilizado para representar, por meio de um gráfico de barras, a importância relativa média de cada variável estudada, acompanhada dos intervalos de confiança de 95%.

## RESULTADOS

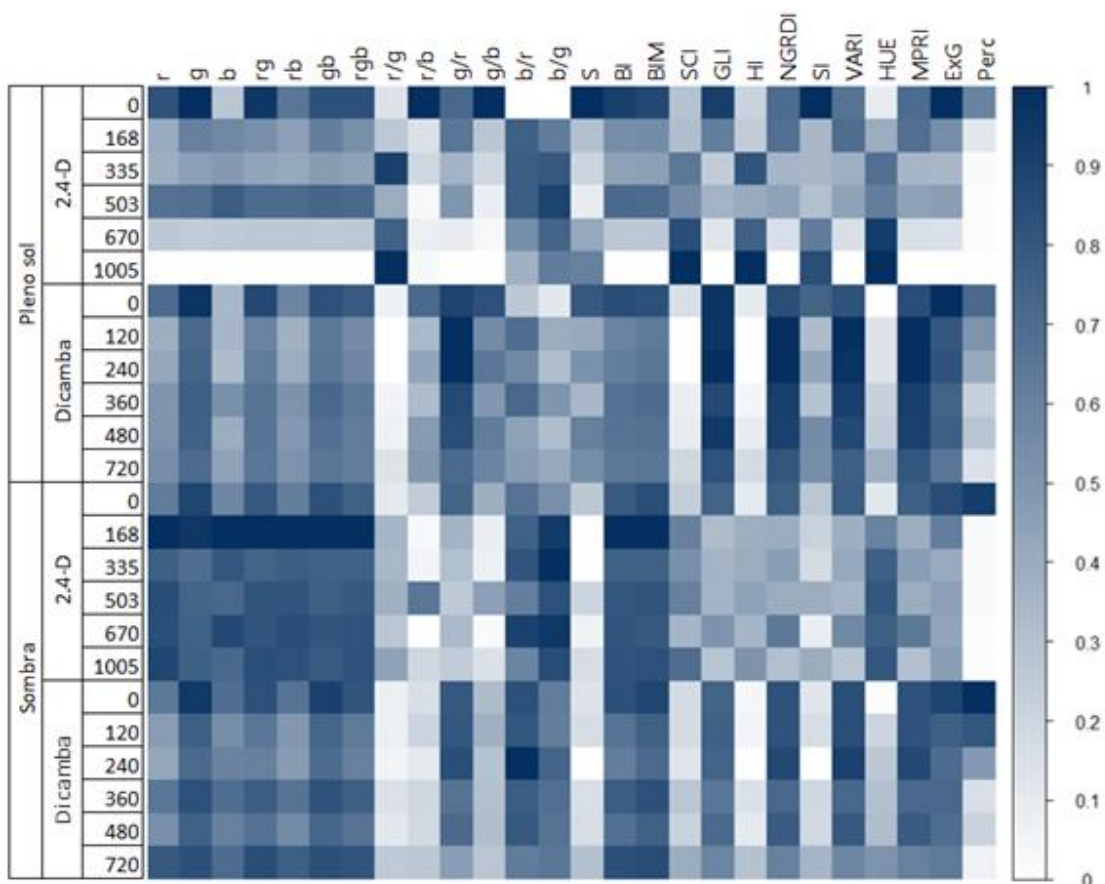
As plantas de *Commelina benghalensis* apresentaram controle crescente em função do aumento das doses de 2,4-D e dicamba, com comportamentos distintos entre os ambientes de cultivo (Figura 3). O controle das plantas com a aplicação de 2,4-D, em pleno sol, foi regular (<60%) até a dose de 168 g e. a. ha<sup>-1</sup>. As doses intermediárias (335 e 503g e.a. ha<sup>-1</sup>) apresentaram controle muito bom (81 a 90%). Já as duas maiores doses apresentaram controle excelente (>91%), com destaque para a maior dose que atingiu 100% de controle de *C. benghalensis* com a aplicação do 2,4-D (Figura 3A). No ambiente com sombreamento, o controle foi muito bom (81 a 90%) até a dose de 670g e.a. ha<sup>-1</sup> e excelente (>91%), para a dose de 1.005 g e.a. ha<sup>-1</sup> de 2,4-D (Figura 3A). O controle de *C. benghalensis* pelo dicamba foi nenhum ou regular (<50%) para todas as doses em ambos os ambientes, com exceção da maior dose (720 g e.a. ha<sup>-1</sup>) em sombreamento que apresentou controle suficiente (61 a 70%).



**Figura 3.** Notas de controle das plantas de *Commelina benghalensis* após a aplicação de diferentes doses de 2,4-D (A) e dicamba (B), atribuídas conforme metodologia da (Alam, 1974). Barras verticais = erro padrão da média.

No mapa de frio são apresentadas as variações entre os valores de bandas e índices espectrais calculados, em função dos diferentes herbicidas, doses aplicadas e condições de luminosidade (Figura 4). A condição de luminosidade influenciou na maior parte do contraste visual. Em pleno sol, as bandas espectrais r e g e os índices espectrais rg, rb, gb, rgb, r/b, g/r, NGRDI, VARI, MPRI e ExG apresentaram maiores estimativas para as menores doses de 2,4-D e dicamba, com redução gradativa à medida que as doses

aumentaram. Nos ambientes sombreados, os índices espectrais tenderam a reduzir e distribuir de forma mais homogênea em função do aumento das doses dos herbicidas, embora com menor amplitude de variação comparado ao pleno sol. Entretanto, os índices GLI, NGRDI e ExG, demonstraram maior contraste entre os diferentes ambientes, evidenciando o impacto das condições de luminosidade nas estimativas desses índices para a diferença espectral.

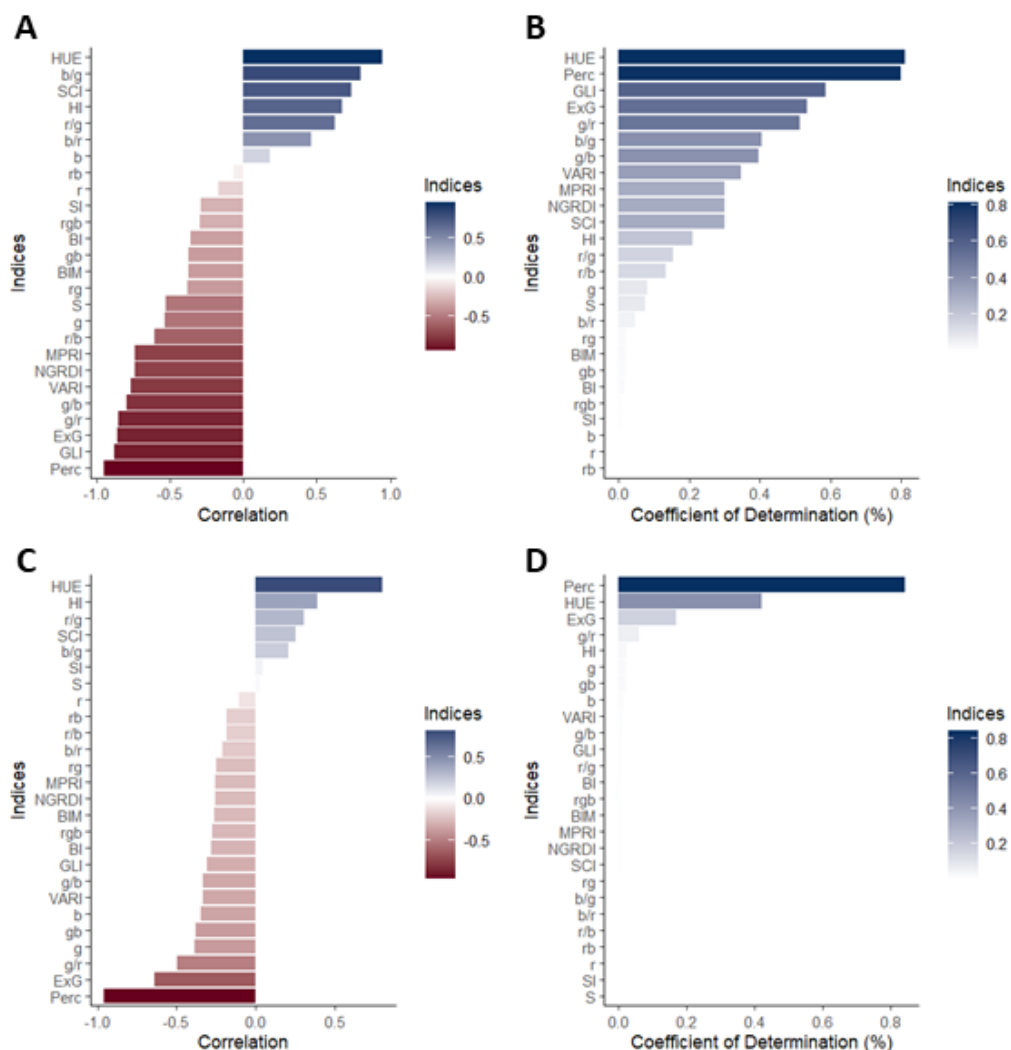


**Figura 4.** Representação dos valores médios de 25 índices e da porcentagem de pixels correspondente ao foreground (Perc) por meio de um mapa de frio no estudo do controle de *Commelina benghalensis* com 2,4-D e dicamba em diferentes condições ambientais.

A correlação de Pearson entre cada índice de vegetação e as notas visuais de controle foi apresentado na Figura 5. Na aplicação do 2,4-D para o controle de *C. benghalensis*, os índices MPRI, NGRDI, VARI, g/b, g/r, ExG e GLI (Figura 5A) apresentaram correlação acima de 0,70, inversamente proporcional com as notas de controle (Figura 5A) e coeficientes de determinação entre 30 e 60% (Figura 5B). Os índices HUE, b/g, SCI e HI apresentaram correlação diretamente proporcional, com valores acima de 0,60 com as notas de controle (Figura 5A) e coeficientes de

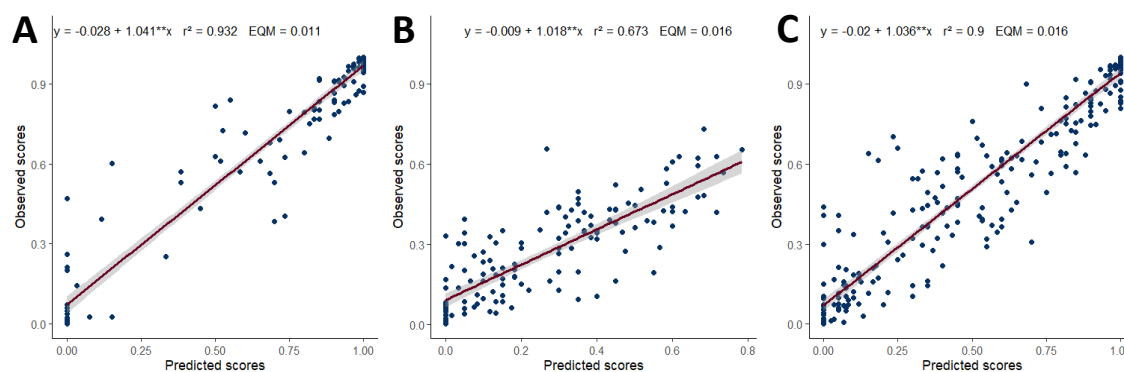
determinação entre 30 e 80% (Figura 5B), com destaque para o índice HUE que apresentou valor de correlação acima de 0,95 e coeficiente de determinação de 81%.

No estudo com o herbicida dicamba no controle de *C. benghalensis*, os índices rb, r/b, b/r, rg, MPRI, NGRDI, BIM, rgb, BI, GLI, VARI, g/b, g/r e ExG, apresentaram correlação negativa (abaixo de 0,50) (Figura 5C) e coeficientes de determinação abaixo de 15% (Figura 5D). Apenas o índice ExG que apresentou moderada correlação negativa (0,50 a 0,70). Os índices HUE, HI, r/g, SCI, b/g tiveram correlação abaixo de 0,40, diretamente proporcional com as notas de controle (Figura 5C) e coeficientes de determinação abaixo de 42% (Figura 5D), com exceção do índice HUE que teve forte correlação (acima de 0,80).



**Figura 5.** Correlação e coeficiente de determinação entre os índices de vegetação obtidos e as notas visuais atribuídas às plantas de *C. benghalensis* após a aplicação de 2,4-D e dicamba. A e B – estudo com a aplicação de 2,4-D e C e D com aplicação de dicamba.

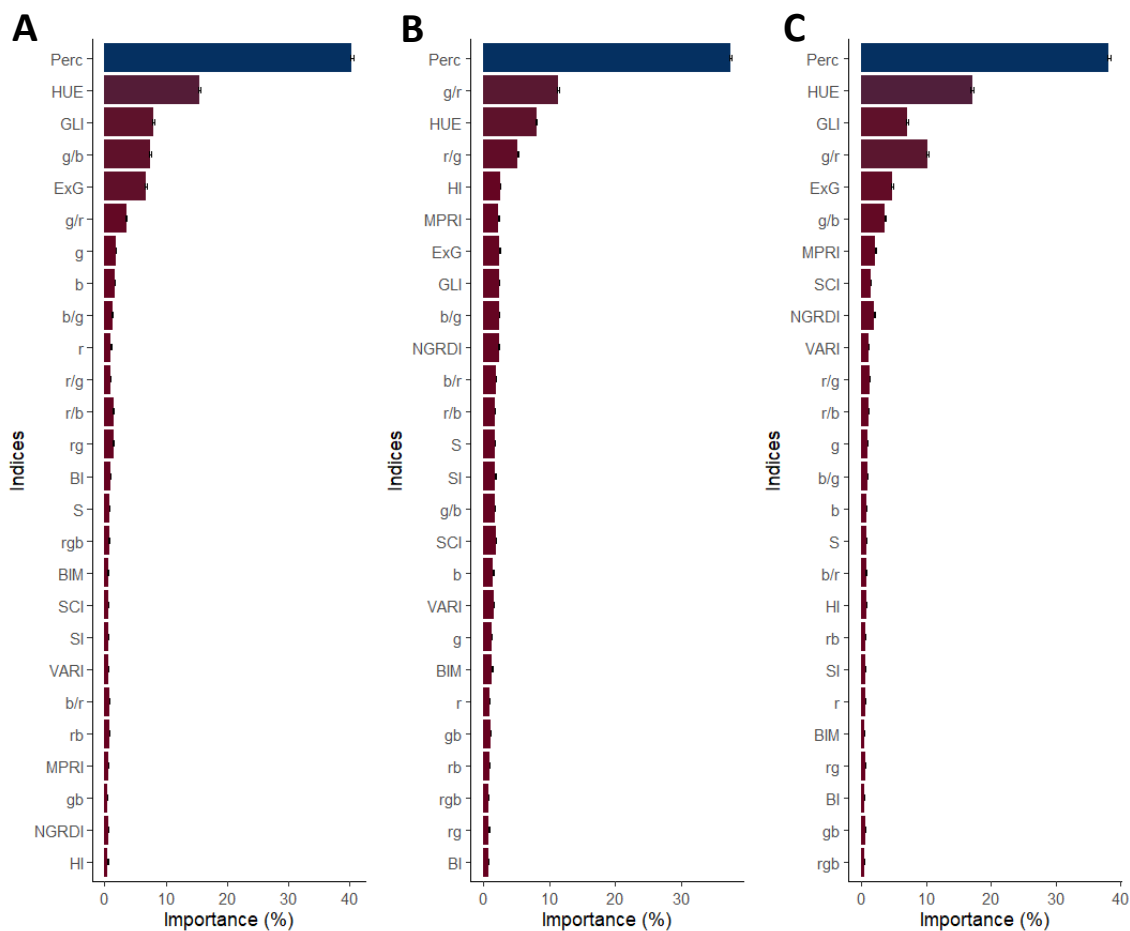
A eficiência do RF para estimação do controle de *C. benghalensis* associado as imagens e aos índices de vegetação ajustados, foi verificada a partir do ajuste de regressão linear entre os valores observados e preditos, equações, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro quadrático médio (EQM) (Figura 6). A amostra de validação das imagens associadas ao 2,4-D (Figura 6A) apresentou modelo com bom ajuste, com  $R^2$  de 93,2% e EQM de 0,011, indicando a alta capacidade do modelo em explicar as variações da variável dependente e a precisão nas previsões feitas a partir dos índices de vegetação e a Perc. Na amostra de validação das imagens associadas ao dicamba (Figura 6B), a acurácia do modelo foi inferior em relação ao 2,4-D, com  $R^2 = 67,3\%$  e EQM = 0,016, apontando menor eficiência do RF em estimar o controle nesta condição. Na validação considerando as imagens associadas aos dois herbicidas simultaneamente (Figura 6C), o modelo apresentou desempenho satisfatório com  $R^2 = 90,0\%$  e EQM = 0,016, indicando boa capacidade de generalizar o modelo na predição de notas de controle para diferentes condições.



**Figura 6.** (A) Eficiência da metodologia *Random Forest* verificada pelo ajuste de regressão linear entre as notas observadas e preditas para as amostras de validação considerando as imagens associadas ao uso de 2,4-D, (B) dicamba, (C) e ambas simultaneamente.

A importância relativa de cada um dos índices de vegetação estimados utilizados no ajuste de modelos de RF para estimação da porcentagem de controle de *C. benghalensis* pelos herbicidas 2,4-D e dicamba é apresentada na figura 7. Os modelos RF concentram sua capacidade preditiva em um pequeno conjunto de índices espectrais (HUE, g/r e GLI), sendo que a Perc possui maior relevância entre todas as variáveis, alcançando valores próximos a 40% de importância relativa em todas as condições

experimentadas, indicando que esta variável é o principal preditor para os modelos ajustados.



**Figura 7.** (A) Representação da importância relativa de cada uma das variáveis explicativas no ajuste de modelos de *Random Forest* para predição de notas de controle de *C. benghalensis* após a aplicação de 2,4-D, (B) dicamba e (C) ambos simultaneamente.

## DISCUSSÃO

A aplicação de algoritmo RF na análise de imagens do tipo RGB capturadas por smartphones, utilizando índices de vegetação como parâmetros de entrada, permitiu a construção de modelos eficazes para estimar o controle de *C. benghalensis* pelos herbicidas 2,4-D e dicamba. Este estudo apresenta uma abordagem inovadora ao empregar imagens obtidas por câmera RGB de smartphone para avaliar a ação de dicamba e 2,4-D em *Commelina benghalensis*. Embora existam pesquisas que abordam o uso de RF em imagens para identificação de espécies de plantas daninhas (Mkhize *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2018), mapeamento de áreas infestadas (Panduangnat *et al.*, 2024; Anderegg *et al.*, 2023) e acompanhamento de práticas de manejo (Caras *et al.*, 2024), os trabalhos

com foco na análise da eficácia de herbicidas por meio de imagens obtidas via smartphone são escassos.

O mapa de frio com os valores médios de 25 índices e da porcentagem de pixels correspondente ao foreground das plantas de *C. benghalensis* (Figura 4) mostra que a variação na intensidade luminosa é um fator crítico na resposta espectral da vegetação quando associada à aplicação de dicamba e 2,4-D. A maior intensidade de cor nas menores doses de 2,4-D e dicamba, com redução gradativa conforme o aumento das doses para as bandas r e g e índices derivados (rg, rb, gb, rgb, r/b, g/r, NGRDI, VARI, MPRI e ExG) observadas em pleno sol, se deve ao fato do elevado fluxo de fótons fotossinteticamente ativos incidente nesse ambiente que induz a um maior acúmulo de pigmentos fotoprotetores pelas plantas nesse ambiente (Shao *et al.*, 2025). O acúmulo desses pigmentos altera as propriedades ópticas foliares o qual aumenta a reflectância foliar nas bandas do espectro visível, resultando em sinais espectrais mais intensos quando comparados a ambientes de baixa luminosidade (Lichtenthaler; Babani; Langsdorf, 2007; Zhang *et al.*, 2020). Quando a luz atinge a folha, parte da luz é absorvida e a outra refletida. A reflectância depende das propriedades da superfície da folha e principalmente da presença de pigmentos fotossintéticos, como a clorofila e carotenóides (Sims; Gamon, 2002; Jacquemoud; Baret, 1990). A absorção e a reflectância de luz pela clorofila e pelos carotenóides estão diretamente relacionadas às bandas RGB. Enquanto as moléculas de clorofila apresentam máxima absorção nas faixas do vermelho e do azul do espectro eletromagnético, refletindo predominantemente a radiação verde, os carotenoides exibem maior absorção na região do azul e refletem comprimentos de onda correspondentes às tonalidades amarela e alaranjada (Falcioni *et al.*, 2023). Com o aumento das doses de 2,4-D e dicamba, os sintomas provocados por esses herbicidas como a desorganização dos tecidos, epinastia de folhas e caules, encarquilhamento das folhas e posteriormente clorose e necrose dos tecidos, tende a ser mais severos (Niu *et al.*, 2023). Esse aumento gradativo da quantidade de tecidos cloróticos e necróticos ocasiona a redução na intensidade de reflectância. A degradação da clorofila afeta diretamente as propriedades ópticas das folhas, alterando a reflectância nas bandas do espectro visível e conseqüentemente, os valores dos índices de vegetação derivados de imagens RGB (Kior; Sukhov; Sukhova, 2021).

Em ambientes sombreados, os índices espectrais apresentaram valores mais baixos e uma distribuição mais homogênea à medida que as doses dos herbicidas aumentaram, refletindo uma menor sensibilidade espectral sob baixa irradiância. A redução da radiação

fotossinteticamente ativa em ambientes sombreados modifica o comportamento espectral das folhas em decorrência de ajustes fisiológicos e bioquímicos pelas plantas. Nessas condições, as plantas reduzem a síntese de pigmentos fotoprotetores, como os carotenoides, que desempenham papel importante na dissipação do excesso de energia luminosa e no aumento do contraste espectral sob alta irradiância (Bou-torrent *et al.*, 2015; Gitelson *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2022). Além disso, folhas sombreadas apresentam maior teor relativo de clorofila distribuída em tecidos delgados favorecendo maior absorção da luz visível (Dörken; Lepetit, 2018; Zhang *et al.*, 2022). Essas alterações bioquímicas e anatômicas levam a uma menor variabilidade na forma como a luz é refletida o que reduz o contraste espectral entre tecidos sadios e injuriados, proporcionando maior uniformidade espectral nesse ambiente (Gausman, 1984; Castro; Sanchez-Azofeifa, 2008). Por outro lado, os índices GLI, NGRDI e ExG mostraram maior contraste entre os ambientes de pleno sol e sombra onde as plantas foram cultivadas, destacando sua sensibilidade às variações de luminosidade e à degradação de pigmentos fotossintéticos e sua utilidade na diferenciação espectral em diferentes condições ambientais.

A análise das correlações entre índices de vegetação RGB e as notas visuais de controle (Figura 5) evidencia diferenças entre o desempenho espectral perante a aplicação das doses de 2,4-D e dicamba. Para o 2,4-D, foi observado que índices como MPRI, NGRDI, VARI, g/b, g/r, ExG e GLI exibiram forte correlação negativa com as notas de controle. A aplicação de 2,4-D promove desorganização dos tecidos meristemáticos, epinastia, acúmulo de etileno e alterações profundas na fotossíntese que leva a redução e perda da integridade dos tecidos fotossintéticos (Pazmiño; Romero-Puertas; Sandalio, 2012; Rubert *et al.*, 2024). Essas alterações resultam na queda nos valores desses índices que são diretamente relacionados à intensidade do verde (Abrantes *et al.*, 2021; Lussem *et al.*, 2018). Sendo assim, à medida que os danos causados pelo herbicida aumentam, o valor desses índices tende a diminuir. Em contrapartida, índices como HUE, b/g, SCI, HI e r/g apresentaram forte correlação positiva, demonstrando sensibilidade as mudanças da coloração verde da planta para tons amarelados e marrons. Dentre esses índices, o HUE se destacou com correlação acima de 0,95 e coeficiente de determinação de 81%, o que indica robustez na sua utilização para detectar as injúrias progressivas induzidas pelo 2,4-D. Para o dicamba, a maioria dos índices como rb, r/b, b/r, rg, MPRI, NGRDI, BIM, rgb, BI, GLI, g/b, VARI, g/r apresentou correlação fraca (abaixo de 0,50) e coeficientes de determinação inferiores a 15%, indicando a baixa sensibilidade dessas bandas às

alterações visuais promovidas por este herbicida. Esse resultado corrobora com publicações que relatam que o dicamba, embora também seja um herbicida auxínico, pode provocar injúrias menos severas, com redução de degradação da clorofila e predominância de epinastia, curvatura e deformações morfológicas (Solomon; Bradley, 2014; Grossmann, 2010). Esses tipos de injúrias não têm influência direta na distribuição espectral captada pelas bandas RGB, que são influenciadas pelas variações pigmentares (Kior *et al.*, 2024) o que explica os coeficientes de determinação abaixo de 15%. Entre os índices positivamente correlacionados (HUE, HI, r/g, SCI e b/g), também foi observado fraca relação, exceto novamente para o HUE, que alcançou correlação acima de 0,80, sendo o indicador mais consistente para ambos os herbicidas. A maior capacidade do HUE em capturar injúrias mesmo em menores intensidades é relatada em estudos que demonstram seu caráter robusto frente a variações de luminosidade e sua sensibilidade a pequenas alterações nos pigmentos (Hassanein; Lari; El-Sheimy, 2018; Mizuno *et al.*, 2025), corroborando com os resultados do presente estudo.

A aplicação do algoritmo RF para estimar o controle de *C. benghalensis* com base em índices de vegetação e imagens obtidas de smartphone mostrou desempenho variável entre os herbicidas avaliados (Figura 6). A análise do ajuste por meio de regressão linear entre valores observados e preditos mostrou que as imagens associadas ao herbicida 2,4-D permitiram um modelo eficiente, com  $R^2 = 93,2\%$  e  $EQM = 0,011$  (Figura 6A), evidenciando sua alta capacidade preditiva e robustez frente à variabilidade espectral induzida pelo herbicida e a luminosidade. Esse resultado sugere que o efeito do 2,4-D gera alterações pigmentares e estruturais na planta que são facilmente capturadas pelos índices espectrais, corroborando com estudos que indicam a eficácia de algoritmos baseados em aprendizado de máquina para detecção de estresse vegetal e danos por herbicidas (Niu *et al.*, 2023; Chu *et al.*, 2022). Em contrapartida, a acurácia reduzida quando utilizado o dicamba com  $R^2 = 67,3\%$  e  $EQM = 0,016$  (Figura 6B) está associada à baixa eficácia do herbicida, cujo controle foi inferior a 70%. Essa limitação resultou em menor variabilidade entre as imagens analisadas, o que contribuiu para as menores estimativas de  $R^2$  e  $EQM$  (Figura 5C e D). Por outro lado, a validação conjunta do dicamba e 2,4-D que apresentou  $R^2 = 90\%$ ;  $EQM = 0,016$  (Figura 6C) reforça a capacidade do *Random Forest* em generalizar padrões espectrais em condições experimentais adversas, embora a precisão tenha sido menor do que no cenário do 2,4-D isolado. Isso indica que mesmo em diferentes cenários, o algoritmo demonstra capacidade em capturar relações consistentes entre os índices espectrais e a porcentagem de controle

das plantas. A literatura demonstra que modelos baseados em *Random Forest* tendem a manter alto desempenho mesmo em situações de variância ambiental, devido à sua estrutura baseada em múltiplas árvores de decisão independentes, que utilizam amostragem aleatória de dados. Essa estrutura de aprendizado reduz a variância e o risco de *overfitting*, permitindo que o modelo mantenha alta precisão preditiva mesmo quando aplicado a ambientes distintos (Belgiu; Drăguț, 2016; Cutler et al., 2007; Jhajharia e Mathur, 2023).

A análise de importância relativa dos índices de vegetação utilizados no ajuste dos modelos de *Random Forest* para a estimação da porcentagem de controle de *C. benghalensis* pelos herbicidas 2,4-D e dicamba (Figura 7) mostrou que a capacidade preditiva dos modelos estar concentrada principalmente na variável Perc que possui aproximadamente 40% de importância relativa em todas as condições testadas. Esse resultado indica que o Perc foi o principal preditor dos modelos ajustados, exercendo papel determinante na estimativa da resposta das plantas ao controle pelos herbicidas. Além do Perc, os índices HUE, g/r e GLI também demonstraram ser importantes para o desempenho preditivo dos modelos. Em contrapartida, índices que apresentaram baixa importância estatística contribuíram menos para a acurácia preditiva, podendo ser descartados em análises futuras. Essa seleção é essencial para otimizar o processo de modelagem, reduzindo o número de variáveis redundantes e aumentando a eficiência computacional, sem comprometer a precisão do modelo (Belgiu; Drăguț, 2016; Saini, 2023).

Os resultados do presente estudo confirmam a efetividade e precisão do algoritmo *Random Forest* na avaliação da eficiência de controle de *Commelina benghalensis* tratada com os herbicidas 2,4-D e dicamba, utilizando índices de vegetação como variáveis de entrada. O modelo demonstrou capacidade em identificar as relações entre os índices espectrais e a porcentagem de controle, destacando o potencial do aprendizado de máquina na análise de injúrias das plantas causadas pelo dicamba e 2,4-D. Além disso, o uso de imagens RGB obtidas por smartphones representa um avanço significativo em termos de praticidade, baixo custo e aplicabilidade em condições reais de campo uma vez que permite a captura rápida de imagens em diferentes condições de iluminação, facilitando a obtenção de dados espectrais de forma acessível e padronizada. Enquanto que às câmeras multiespectrais acopladas em drones ou sensores instalados em tratores exigem maior investimento financeiro, calibração complexa e infraestrutura especializada (Herzig et al., 2021).

## CONCLUSÃO

A utilização do algoritmo *Random Forest* quando associado a índices de vegetação permite criar modelos capazes de estimar com alta precisão ( $R^2 = 93,2\%$ ) a eficiência de controle de *C. benghalensis* pelo 2,4-D. Apesar da redução de acurácia no cenário envolvendo dicamba ( $R^2 = 67,3\%$ ), o modelo apresenta desempenho satisfatório quando os dois herbicidas são considerados simultaneamente ( $R^2 = 90,0\%$ ), indicando boa capacidade de generalização.

Os índices de vegetação HUE, GLI, g/r, g/b, ExG e a variável Perc são os mais importantes para identificar alterações espectrais causadas por 2,4-D e dicamba em *C. benghalensis*. Assim, esses indicadores se destacam como as melhores opções para avaliar a eficácia de controle e sintomas em plantas daninhas expostas a esses herbicidas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, A. M. 2022. ExpImage: ferramenta para análise de imagens em experimentos. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/ExpImage/index.html> [ExpImage: a tool for image analysis in experiments]. Disponível em: <https://cran.rproject.org/web/packages/ExpImage/index.html>
- ABRANTES, T. C. et al. Assessing the effects of dicamba and 2, 4 Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4D) on soybean through vegetation indices derived from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based RGB imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 7, p. 2740-2758, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1832283>
- AHUJA, M. et al. Glyphosate: a review on its widespread prevalence and occurrence across various systems. **Environmental Science: Advances**, v. 3, n. 7, p. 1030-1038, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D4VA00085D>
- ALAM - Asociación Latinoamericana de Malezas. Recomendaciones sobre unificación de los sistemas de evaluación en ensayos de control de malezas. **ALAM**, Bogotá, v. 1, n. 1, p. 35-38, 1974.
- ANDEREGG, J. et al. On-farm evaluation of UAV-based aerial imagery for season-long weed monitoring under contrasting management and pedoclimatic conditions in wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 204, p. 107558, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107558>
- ASAD, M. H.; BAIS, A. Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network. **Information Processing in**

**Agriculture**, v. 7, n. 4, p. 535-545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.002>

BANERJEE, S. et al. Integrating Remote Sensing, Landscape Metrics, and Random Forest Algorithm to Analyze Crop Patterns, Factors, Diversity, and Fragmentation in a Kharif Agricultural Landscape. **Land**, v. 14, n. 6, p. 1203, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land14061203>

BELGIU, M.; DRĂGUȚ, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 114, p. 24-31, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

BERGMEIR, C. N.; BENÍTEZ, J. M. Neural networks in R using the Stuttgart Neural Network Simulator: RSNNS. **Journal of Statistical Software**, v. 46, n. 7, p. 1–26, 2012. Pacote RSNNS versão publicada em CRAN em 30 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18637/jss.v046.i07>

BOU-TORRENT, J. et al. Regulation of carotenoid biosynthesis by shade relies on specific subsets of antagonistic transcription factors and cofactors. **Plant physiology**, v. 169, n. 3, p. 1584-1594, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1104/pp.15.00552>

BREIMAN, L. Random forests. **Machine learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

CAMADINI, L. et al. Randomness control and reproducibility study of random forest algorithm in R and Python. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.12184>

CARAS, T. et al. Monitoring the effects of weed management strategies on tree canopy structure and growth using UAV-LiDAR in a young almond orchard. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 216, p. 108467, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108467>

CASTRO, K. L.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Alterações nas propriedades espectrais, conteúdo de clorofila e estrutura interna do mesófilo de folhas senescentes de *Populus balsamifera* e *Populus tremuloides*. **Sensors**, v. 8, n. 1, p. 51-69, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s8010051>

CHU, H. et al. Imagens hiperespectrais com redes neurais convolucionais rasas (SCNN) predizem o estresse precoce por herbicidas em cultivares de trigo. **Journal of Hazardous Materials**, v. 421, p. 126706, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126706>

COSTA, A. G. F. et al. Interferência de *Commelina benghalensis* no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* no inverno e no verão. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 590-606, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509825556>

CUTLER, D. R. et al. Random forests for classification in ecology. **Ecology**, v. 88, n. 11, p. 2783-2792, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>

DARAMOLA, O. S. et al. Implications of planting date on Benghal dayflower (*Commelina benghalensis* L.) and sicklepod (*Senna obtusifolia* L.) management in peanut. **Weed Technology**, v. 38, p. e66, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2024.50>

DHILLON, M. S. et al. Integrating random forest and crop modeling improves the crop yield prediction of winter wheat and oil seed rape. **Frontiers in Remote Sensing**, v. 3, p. 1010978, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.1010978>

DÖRKEN, V. M.; LEPETIT, B. Morpho-anatomical and physiological differences between sun and shade leaves in *Abies alba* Mill.(Pinaceae, Coniferales): a combined approach. **Plant, cell & environment**, v. 41, n. 7, p. 1683-1697, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.13213>

FALCIONI, R. et al. A novel method for estimating chlorophyll and carotenoid concentrations in leaves: A two hyperspectral sensor approach. **Sensors**, v. 23, n. 8, p. 3843, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23083843>

FELLMANN, S. et al. Reproducibility, reliability, and regulatory relevance of plant visual injury assessments. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 20, n. 4, p. 915-923, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4855>

FEY, Vidal et al. Biocpr – A tool for correlation plots. *Data*, v. 6, n. 9, p. 97, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/data6090097>

Frans, R.W., 1972. Measuring plants response. In: WILKINSON, R.E. (Ed.). *Research methods in weed science*. Puerto Rico: Weed Science Society, 28–41.

GAO, J. et al. Recognising weeds in a maize crop using a random forest machine-learning algorithm and near-infrared snapshot mosaic hyperspectral imagery. **Biosystems engineering**, v. 170, p. 39-50, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.006>

GAUSMAN, H. W. Avaliação dos fatores que causam diferenças de refletância entre folhas expostas ao sol e à sombra. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**, v. 15, n. 2, p. 177-181, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(84\)90045-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(84)90045-2)

GHIMIRE, B.; CHANG, Y.; KIM, S. Evaluation of pre-emergence and post-emergence herbicides for weed management in. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 92, n. 5, p. 1439, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.023076>

GITELSON, A. A. et al. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272-281, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)0750272ACCIPL2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2)

GÓMEZ-ZAMANILLO, L. et al. Damage assessment of soybean and redroot amaranth plants in greenhouse through biomass estimation and deep learning-based symptom classification. **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100243, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100243>

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 66, n. 2, p. 113-120, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.1860>

HASSANEIN, M.; LARI, Z.; EL-SHEIMY, N. A new vegetation segmentation approach for cropped fields based on threshold detection from hue histograms. **Sensors**, v. 18, n. 4, p. 1253, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18041253>

HENRY, J. L. et al. Persistence of dicamba residue in harvested soybeans. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, v. 7, n. 3, p. e20564, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agg2.20564>

HERZIG, P. et al. Evaluation of RGB and multispectral unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for high-throughput phenotyping and yield prediction in barley breeding. **Remote Sensing**, v. 13, n. 14, p. 2670, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs13142670>

HORVATH, D. P. et al. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. **Trends in Plant Science**, v. 28, n. 5, p. 567-582, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.12.014>

IMPOLLONIA, Giorgio et al. Moisture content estimation and senescence phenotyping of novel *Miscanthus hybrids* combining UAV-based remote sensing and machine learning. **GCB Bioenergy**, v. 14, p. 639–656, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12930>

JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. **Remote sensing of environment**, v. 34, n. 2, p. 75-91, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90100-Z](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90100-Z)

JHAJHARIA, K.; MATHUR, P. Prediction of crop yield using satellite vegetation indices combined with machine learning approaches. **Advances in Space Research**, v. 72, n. 9, p. 3998-4007, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.006>

KIOR, A. et al. RGB imaging as a tool for remote sensing of characteristics of terrestrial plants: A review. **Plants**, v. 13, n. 9, p. 1262, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants13091262>

KIOR, A.; SUKHOV, V.; SUKHOVA, E. Application of reflectance indices for remote sensing of plants and revealing actions of stressors. In: **Photonics**. MDPI, 2021. p. 582. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/photonics8120582>

LICHTENTHALER, H. K; BABANI, F.; LANGSDORF, G. Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in sun and shade leaves of trees. **Photosynthesis Research**, v. 93, n. 1, p. 235-244, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11120-007-9174-0>

LUSSEM, U. et al. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 1215-1219, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-1215-2018>

MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual (1981–2010) e projeções futuras (2011–2100). **Revista Brasileira de Climatologia**, Itajubá, v. 1, Dossiê Climatologia de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>

MIZUNO, Y. et al. Assessment of the Applicability of Hue from In Situ Spectral Measurements to Remote Sensing of Plant Phenology. **Remote Sensing**, v. 17, n. 16, p. 2767, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17162767>

MKHIZE, Y. et al. Mapping weed infestation in maize fields using Sentinel-2 data. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 134, p. 103571, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103571>

MOAZZAM, S. Imran et al. Towards automated weed detection through two-stage semantic segmentation of tobacco and weed pixels in aerial Imagery. **Smart Agricultural Technology**, v. 4, p. 100142, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100142>

MONQUERO, P. A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, v. 22, p. 445-451, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582004000300015>

NIU, Z. et al. Advanced plant phenotyping technologies for enhanced detection and mode of action analysis of herbicide damage management. **Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1166, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17071166>

NIU, Z. et al. Early detection of dicamba and 2, 4-D herbicide drifting injuries on soybean with a new spatial-spectral algorithm based on LeafSpec, an accurate touch-based hyperspectral leaf scanner. **Remote Sensing**, v. 15, n. 24, p. 5771, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15245771>

OLIVEIRA, V. A. V. et al. The light intensity in the cultivation environment and the impact of glyphosate on plants of the Urochloa genus. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 59, n. 8, p. 540-549, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2024.2381934>

PANDUANGNAT, L. et al. Time-efficient low-resolution RGB aerial imaging for precision mapping of weed types in site-specific herbicide application. **Crop Protection**, v. 184, p. 106805, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106805>

PARVEN, Aney. et al. Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 1181-1202, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y>

PAZMIÑO, D. M.; ROMERO-PUERTAS, M. C.; SANDALIO, L. M. Insights into the toxicity mechanism of and cell response to the herbicide 2, 4-D in plants. **Plant signaling & behavior**, v. 7, n. 3, p. 425-427, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4161/psb.19124>

RAJA, R. et al. Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control. **Biosystems Engineering**, v. 228, p. 31-48, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.02.006>

RUBERT, J. et al. The influence of 2, 4-D and dicamba on the physiology of olive seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 59, p. e03233, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2024.v59.03233>

SAINI, R. Integrating vegetation indices and spectral features for vegetation mapping from multispectral satellite imagery using AdaBoost and random forest machine learning classifiers. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 17, n. 1, p. 57-74, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.1.57>

SANCHEZ, P. R.; ZHANG, H. Evaluation of a cnn-based modular precision sprayer in broadcast-seeded field. **Sensors**, v. 22, n. 24, p. 9723, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s2224972>

SHAO, B. et al. Acclimation to high light intensity increases leaf photosynthetic capacity and NPQ kinetics, but barely affects photosynthetic induction rate. **Environmental and Experimental Botany**, p. 106213, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106213>

SILVA, J. A. O. S. et al. Deep learning for weed detection and segmentation in agricultural crops using images captured by an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 16, n. 23, p. 4394, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16234394>

SILVA, J. R.; MENDES, K. F.; KARAM, D. Effect of chemical weed control in the soybean and maize production system in the floristic community in the Cerrado regions of central Minas Gerais state. **Advances in Weed Science**, v. 42, p. e020240054, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land14061203>

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote sensing of environment**, v. 81, n. 2-3, p. 337-354, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)

Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD). Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas. Londrina: SBCPD, 1995. 42 p.

SOLOMON, C. B.; BRADLEY, K. W. Influence of application timings and sublethal rates of synthetic auxin herbicides on soybean. **Weed Technology**, v. 28, n. 3, p. 454-464, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00145.1>

SUN, T. et al. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. **Molecular Horticulture**, v. 2, n. 1, p. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43897-022-00023-2>

TEIXEIRA, M. F. F. et al. Interferência de plantas daninhas na qualidade e produtividade do grão-de-bico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 69-75, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.32404/rean.v4i2.1598>

UPADHYAY, A. et al. Development and evaluation of a machine vision and deep learning-based smart sprayer system for site-specific weed management in row crops: An edge computing approach. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101331, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101331>

WANG, S et al. Weed density extraction based on few-shot learning through UAV remote sensing RGB and multispectral images in ecological irrigation area. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 735230, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.735230>

WICKHAM, H. ggplot2: elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggplot2>

YANG, L. et al. Real-time classification of invasive plant seeds based on improved YOLOv5 with attention mechanism. **Diversity**, v. 14, n. 4, p. 254, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/d14040254>

ZHANG, Y. et al. Exploring the optical properties of leaf photosynthetic and photo-protective pigments in vivo based on the separation of spectral overlapping. **Remote Sensing**, v. 12, n. 21, p. 3615, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12213615>

ZHANG, Y. et al. Leaf anatomy, photosynthesis, and chloroplast ultrastructure of *Heptacodium miconioides* seedlings reveal adaptation to light environment. **Environmental and Experimental Botany**, v. 195, p. 104780, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104780>

## 5 Considerações finais

Este estudo demonstra que *E. heterophylla* apresenta elevada plasticidade morfoanatômica, fisiológica e bioquímica em resposta à luminosidade, o que modula diretamente sua sensibilidade aos herbicidas auxínicos 2,4-D e dicamba. O sombreamento reduziu a deposição de cera epicuticular, alterou a organização anatômica foliar e limitou a capacidade fotoquímica, favorecendo maior penetração e ação dos herbicidas e resultando em níveis superiores de controle e maior redução da biomassa em comparação às plantas cultivadas em pleno sol.

Em termos de manejo de *E. heterophylla*, o 2,4-D apresentou maior eficiência em ambiente sombreado, permitindo alcançar controle excelente (>91%) com uma menor dose aplicada, enquanto o dicamba mostrou menor eficácia, com controle satisfatório apenas em sombreamento e na maior dose avaliada. As alterações fisiológicas e metabólicas, associadas à mobilização de reservas de carboidratos e ao comprometimento do aparato fotossintético, juntamente com a redução dos espaços intercelulares, explicam o aumento do estresse e a maior suscetibilidade das plantas sob baixa irradiância. Esses resultados evidenciam que a disponibilidade de luz é um fator determinante na eficácia do controle químico de *E. heterophylla*, devendo ser considerada na definição de doses e estratégias de manejo, visando maior eficiência de controle, redução do uso de herbicidas e maior sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Outro ponto a se destacar deste estudo é o uso de imagens RGB obtidas por smartphone, associado a índices de vegetação e ao algoritmo Random Forest, que se mostra uma abordagem eficiente, prática e de baixo custo para estimar o controle de *Commelina benghalensis* pelo 2,4-D e dicamba. O método é superior às avaliações visuais tradicionais, pois reduz a subjetividade e aumenta a precisão e a reprodutibilidade das estimativas de controle. O 2,4-D apresentou maior eficiência de controle e melhor resposta espectral, resultando em modelos altamente precisos, enquanto o dicamba teve menor acurácia. A porcentagem de pixels da planta (Perc) e índices como HUE, GLI e g/r são os principais preditores do controle. Assim, a metodologia proposta apresenta elevado potencial para aplicações em campo, contribuindo para o aprimoramento das avaliações de controle e para o avanço de práticas de manejo de plantas daninhas mais eficientes e sustentáveis.