

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS MORRINHOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OLERICULTURA - PPGOL**

**EFEITO DA ASSOCIAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO PIROLENHOSO
NA EFICÁCIA DO GLIFOSATO E DO 2,4-D NO CONTROLE DE PLANTAS
DANINHAS**

**MIQUÉIAS ALVES DA ROCHA CÉSAR
Orientador: Dr. EMERSON TROGELLO**

**MORRINHOS - GO
2026**

MIQUÉIAS ALVES DA ROCHA CÉSAR

**EFEITO DA ASSOCIAÇÃO E DA CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO PIROLENHOSO
NA EFICÁCIA DO GLIFOSATO E DO 2,4-D NO CONTROLE DE PLANTAS
DANINHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Olericultura (PPGOL) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Morrinhos, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Olericultura.

Orientador: Dr. Emerson Trogello

MORRINHOS - GO
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/IF Goiano Campus Morrinhos

C421e Cesar, Miqueias Alves da Rocha.

Efeito da associação e da concentração de ácido pirolenhosona eficácia do Glifosato e do 2,4-D no controle de plantas. / Miqueias Alves da Rocha Cesar. – Morrinhos, GO: IF Goiano, 2026.
55 f. : il. color.

Orientador: Dr. Emerson Trogello

Dissertação (mestrado) – Instituto Federal Goiano Campus Morrinhos, Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Olericultura, 2026.

1. Herbicidas. 2. Adjuvante. 3. Índice de vegetação. I. Trogello, Emerson. II. Instituto Federal Goiano. III. Título.

CDU 632.9

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese (doutorado) | ☐ Artigo científico |
| ☒ Dissertação (mestrado) | ☐ Capítulo de livro |
| ☐ Monografia (especialização) | ☐ Livro |
| ☐ TCC (graduação) | ☐ Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Miqueias Alves da Rocha Cesar

Matrícula:

2024204330440010

Título do trabalho:

Efeito da associação e da concentração de ácido pirolenhoso na eficácia do glifosato e do 2,4-D no controle de plantas daninhas

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 11 / 09 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
gov.br MIQUEIAS ALVES DA ROCHA CESAR
Data: 08/09/2025 08:48:46 -0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Morrinhos GO
Local

08 / 09 / 2026
Data

Ciente e de acordo:

Assinatura do autor ou detentor dos direitos autorais
Documento assinado digitalmente
gov.br EMERSON TROGELLO
Data: 08/09/2025 08:33:08 -0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 16/2026 - GPGPI-MQ/CMPMHOS/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA Nº 146
BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos vinte e um dias do mês de agosto do ano de dois mil e vinte e seis, às 14h00 (quatorze horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência (<https://meet.google.com/bnp-yaef-rtv>) para procederem a avaliação da defesa de Dissertação, em nível de mestrado, intitulada "**Efeito da associação e da concentração de ácido pirolenhoso na eficácia do glifosato e do 2,4-D no controle de plantas daninhas**" de autoria de **Miqueias Alves da Rocha César** discente do Programa de Pós-Graduação em Olericultura do Instituto Federal Goiano - Campus Morrinhos. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Emerson Trogello, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor para, em 30 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca fez suas arguições, adotando-se o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Olericultura, e procedidas às correções recomendadas, a Dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM OLERICULTURA**, na linha de pesquisa em Sistemas de Produção em Olerícolas pelo Instituto Federal Goiano - Campus Morrinhos. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na Secretaria do PPGOL da versão definitiva da Dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação de artigo científico ou publicação técnica oriundo dessa Dissertação em periódico após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Dissertação de Mestrado, e para constar, foi lavrada a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da Banca Examinadora.

Membros da Banca Examinadora

Nome	Instituição	Situação no Programa
Prof. Dr. Emerson Trogello	Instituto Federal Goiano Campus - Morrinhos	Presidente
Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva	Instituto Federal Goiano Campus - Morrinhos	Membro interno
Prof. Dr. Samuel de Deus da Silva	Instituto Federal do Tocantins - Araguatins	Membro externo

Documento assinado eletronicamente por:

- **Emerson Trogello, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 21/08/2026 15:57:06.
- **Alexandre Carvalho Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 21/08/2026 15:58:43.
- **Samuel de Deus da Silva, Samuel de Deus da Silva - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal do Tocantins (1)** , em 21/08/2026 16:20:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/08/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 849095

Código de Autenticação: 8bef0323ee



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Morrinhos

Rodovia BR-153, Km 633, Zona Rural, SN, Zona Rural, MORRINHOS / GO, CEP 75650-000

(64) 3413-7900

*À minha esposa Rafaella Lopes e à minha filha Ana Gabriella,
razões maiores de cada esforço.*

*Aos meus pais Francisco Cesar e Geni Alves, pela vida e pelos
valores.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e discernimento em todas as etapas desta pesquisa.

À minha esposa Rafaella Lopes, pelo amor, paciência e apoio incondicional em todas as etapas desta caminhada, e à minha filha Ana Gabriella, por ser fonte diária de motivação e alegria.

Aos meus pais Francisco Cesar e Geni Alves, pelo exemplo, pelo incentivo constante e por tornarem possível cada conquista da minha formação. Aos meus irmãos Joelma Alves e Joel Alves e aos meus cunhados Alceir e Watyna, pelo companheirismo e pelo apoio de sempre.

Aos meus sobrinhos Antonella Lopes, Nicole Lopes, Davi Lopes e Pedro Antônio, pela alegria que trazem à família.

Ao orientador Prof. Dr. Emerson Trogello, pela condução técnica, pelas discussões metodológicas e pela confiança depositada ao longo do mestrado.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Morrinhos e ao Programa de Pós-Graduação em Olericultura (PPGOL), pela estrutura e pelo apoio institucional. Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguatins, pela parceria e pela disponibilização da área experimental que viabilizou a condução do experimento a campo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Olericultura que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada inesquecível, deixo meu mais sincero agradecimento.

Ao professor Dr Elias Mendes, pelo apoio nos Voos, coleta e interpretação de dados.

Aos membros da banca examinadora, pelas contribuições que qualificaram este trabalho.

Aos colegas, pelo auxílio nas aplicações, nas coletas de dados, atividades que, pela sua natureza, dependeram de esforço coletivo.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Miqueias Alves da Rocha Cesar nasceu em Salinas, estado de Minas Gerais, filho de Francisco Cesar de Sousa e Geni Alves da Rocha Sousa. Concluiu o curso Técnico em Agropecuária e, posteriormente, graduou-se em Engenharia Agrônômica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO), Campus Araguatins, em 2018.

Entre 2017 e 2019, atuou como Técnico de Campo e Tutor da Rede E-Tec no Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR), nos cursos técnicos de Agronegócio, Fruticultura e Zootecnia. De 2019 a 2024, exerceu a docência na Escola Família Agrícola do Bico do Papagaio, contribuindo para a formação técnica e a promoção da agricultura familiar na região Norte do Tocantins. A partir de 2024, passou a integrar o corpo docente do IFTO – Campus Araguatins, onde também desenvolveu projetos de pesquisa e extensão voltados às ciências agrárias.

No mesmo ano, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Olericultura (PPGOL) do Instituto Federal Goiano, Campus Morrinhos, em nível de mestrado, sob orientação do Prof. Dr. Emerson Trogello, desenvolvendo dissertação sobre o uso do ácido pirolenhoso como adjuvante dos herbicidas glifosato e 2,4-D no controle de plantas daninhas, com monitoramento por índices de vegetação obtidos por imagens de drone.

RESUMO

O manejo de plantas daninhas é um dos principais desafios da produção agrícola tropical, causando perdas expressivas de produtividade quando não realizado no período crítico de interferência. O uso de adjuvantes à calda herbicida constitui estratégia para potencializar a eficácia dos ingredientes ativos e o ácido pirolenhoso, subproduto da carbonização da madeira, apresenta propriedades físico-químicas pH ácido, ácidos orgânicos e compostos fenólicos que o credenciam como adjuvante natural de herbicidas pós-emergentes.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da associação e da concentração de ácido pirolenhoso sobre a eficácia do glifosato (1.440 g e.a. ha⁻¹) e do 2,4-D (670 g e.a. ha⁻¹) no controle de plantas daninhas em condições de campo, no município de Araguatins, TO, entre junho e julho de 2026. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos ao acaso, com oito tratamentos e quatro repetições. A eficácia herbicida foi monitorada por meio dos índices de vegetação VARI e TGI, extraídos de ortomosaicos RGB obtidos por drone em sete avaliações entre 0 e 22 dias após a aplicação (DAA), complementados por avaliações de fitointoxicação pela escala EWRC e levantamento fitossociológico basal da comunidade infestante.

O ácido pirolenhoso associado ao glifosato não proporcionou incremento na eficácia desse herbicida, apresentando desempenho semelhante ao do glifosato isolado, que resultou na maior redução dos índices de vegetação entre todos os tratamentos avaliados. Em contraste, a associação do ácido pirolenhoso ao 2,4-D reduziu a eficácia desse herbicida de forma dose-dependente, com o maior nível de adjuvante, tornando o tratamento equivalente ao controle sem aplicação, indicando efeito antagônico possivelmente relacionado à incompatibilidade físico-química entre o adjuvante fortemente ácido e a formulação amínica do herbicida. O ácido pirolenhoso aplicado isoladamente não apresentou atividade herbicida detectável. Os resultados indicam que o benefício do ácido pirolenhoso como adjuvante é dependente do herbicida utilizado, sendo neutro para o glifosato e antagônico para o 2,4-D nas condições avaliadas, o que recomenda cautela na sua recomendação generalizada.

Palavras-chave: adjuvante; herbicida; índice de vegetação; comunidade infestante.

ABSTRACT

Weed management is one of the main challenges in tropical agricultural production, causing significant yield losses when not carried out within the critical interference period. The use of adjuvants in herbicide spray solutions is a strategy to enhance active ingredient efficacy, and wood vinegar (pyroligneous acid), a by-product of charcoal production, presents acidic physicochemical properties as pH, organic acids and phenolic compounds that qualify it as a natural adjuvant for post-emergence herbicides.

This study aimed to evaluate the effect of the association and concentration of wood vinegar on the efficacy of glyphosate (1,440 g a.e. ha⁻¹) and 2,4-D (670 g a.e. ha⁻¹) for weed control under field conditions in Araguatins, Tocantins, Brazil, between June and July 2026. A randomized complete block design was used, with eight treatments and four replicates. Herbicide efficacy was monitored through the VARI and TGI vegetation indices, extracted from RGB drone orthomosaics across seven assessment dates from 0 to 22 days after application (DAA), complemented by phytotoxicity ratings using the EWRC scale and a baseline phytosociological survey of the weed community.

Wood vinegar combined with glyphosate did not enhance the efficacy of that herbicide, with similar performance observed among treatments with adjuvant at 2% and 4% v/v and glyphosate alone, which produced the greatest reduction in vegetation indices among all treatments evaluated. In contrast, combining wood vinegar with 2,4-D reduced herbicide efficacy in a dose-dependent manner, with the highest adjuvant level rendering the treatment equivalent to the untreated control, indicating an antagonistic effect possibly related to physicochemical incompatibility between the strongly acidic adjuvant and the amine-salt herbicide formulation. Wood vinegar applied alone showed no detectable herbicidal activity. The results indicate that the benefit of wood vinegar as an adjuvant depends of the associated herbicide, being neutral for glyphosate and antagonistic for 2,4-D under the evaluated conditions, which calls for caution against its generalized recommendation.

Keywords: adjuvant; herbicide; vegetation index; weed community.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista geral da área experimental, com as parcelas demarcadas por estacas e placas de identificação dos tratamentos.....	24
Figura 2. Identificação das parcelas experimentais em campo por meio de placas fixadas em estacas (exemplo dos tratamentos T3 e T8).....	25
Figura 3. Medição volumétrica do ácido pirolenhoso decantado para incorporação à calda de pulverização.	26
Figura 4. Quadro-inventário de 0,5 × 0,5 m utilizado no levantamento fitossociológico.....	29
Figura 5. Dinâmica temporal do índice VARI (A) e do índice TGI (B) para os oito tratamentos avaliados	32
Figura 6. Ortomosaicos de VARI e TGI da área experimental em 09/06/2026 e 12/06/2026 (0 e 3 DAA).....	39
Figura 7. Ortomosaicos de VARI e TGI da área experimental em 15/06/2026 e 17/06/2026 (6 e 8 DAA).....	40
Figura 8. Ortomosaicos de VARI e TGI da área experimental em 22/06/2026 e 24/06/2026 (13 e 15 DAA).	41
Figura 9. Ortomosaicos de VARI e TGI da área experimental em 01/07/2026 (22 DAA).	42
Figura 10. Vista aérea das parcelas experimentais em 29/06/2026 (20 DAA).....	43
Figura 11. Vista aérea das parcelas experimentais em 05/07/2026 (26 DAA).....	44
Figura 12. Dinâmica de VARI e TGI.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos oito tratamentos, herbicidas, doses e concentrações de ácido pirolenhoso (AP).	25
Tabela 2. Escala conceitual de fitointoxicação proposta pelo European Weed Research Council.....	28
Tabela 3. Médias de VARI e TGI por tratamento, condição basal e final, com teste de Tukey.	34
Tabela 4. Notas médias de fitointoxicação (EWRC) por tratamento aos 7 DAA.....	46
Tabela 5. Notas médias de fitointoxicação (EWRC) por tratamento aos 14 DAA.....	47
Tabela 6. Notas médias de fitointoxicação (EWRC) por tratamento aos 21 DAA.....	47
Tabela 7. Espécies identificadas no levantamento fitossociológico basal (0 DAA).....	49
Tabela 8. Parâmetros fitossociológicos da comunidade infestante basal (0 DAA).	49
Tabela 9. Índice de valor de importância relativo (IVIr%) por espécie e por bloco.	50

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	3
FOLHA DE APROVAÇÃO	4
AGRADECIMENTOS.....	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
SUMÁRIO	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Comunidade de plantas daninhas em sistemas agrícolas	15
2.2 Glifosato: mecanismo de ação e fatores de tolerância em plantas daninhas	15
2.3 2,4-D: mecanismo de ação e eficácia sobre dicotiledôneas	16
2.4 Adjuvantes herbicidas: conceito, classificação e mecanismos de ação.....	17
2.5 Ácido pirolenhoso: composição, propriedades e uso como adjuvante	17
2.6 Índices de vegetação RGB (VARI e TGI) como indicadores de eficácia herbicida	18
2.7 Escala EWRC (1964) de avaliação de fitointoxicação	19
2.8 Análise fitossociológica de comunidades infestantes.....	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Local e período experimental.....	21
4.2 Delineamento experimental e tratamentos	21
4.3 Preparo e aplicação dos tratamentos	23
4.4 Aquisição e processamento das imagens RGB por drone	24
4.5 Protocolo de avaliações complementares	24
4.6 Levantamento fitossociológico da comunidade infestante.....	25
4.7 Análise estatística	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Dinâmica temporal geral do VARI e do TGI	28
5.2 Diferenciação entre tratamentos à base de glifosato.....	32
5.3 Diferenciação entre tratamentos à base de 2,4-D.....	33
5.4 Ácido pirolenhoso isolado e controle absoluto.....	35
5.5 Evidências espaciais dos ortomosaicos de VARI e TGI.....	36
5.6 Registro fotográfico de campo: validação qualitativa	40
5.7 Fitointoxicação visual (EWRC, 1964)	43

5.8 Levantamento fitossociológico da comunidade infestante.....	47
5.9 Síntese e implicações metodológicas	50
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

O manejo de plantas daninhas é um dos principais desafios da produção agrícola tropical, respondendo por perdas expressivas de produtividade quando não realizado no período crítico de interferência, estimadas por Pitelli (1985) em até 30% em culturas como soja, milho e cana-de-açúcar. Entre as espécies infestantes de maior relevância nas lavouras brasileiras está a corda-de-viola (*Ipomoea spp.*, Convolvulaceae), cujo impacto decorre não só da competição direta por água, luz e nutrientes, mas de um problema mais prosaico: o hábito de trepar e enroscar nos colmos da cultura e, mais ainda, nos mecanismos das colhedoras, gerando perdas mecânicas na colheita relatadas como expressivas pela literatura de extensão, ainda que raramente quantificadas com o mesmo rigor metodológico aplicado às perdas por competição.

O controle dessa e de outras espécies infestantes concentra-se, na prática, em poucos herbicidas não seletivos, com destaque para o glifosato e o 2,4-D, e é aí que a literatura começa a mostrar suas lacunas. A eficácia do glifosato cai visivelmente quando a aplicação ocorre além de quatro folhas verdadeiras, fenômeno que Duke e Powles (2008) atribuem a mecanismos de compartimentalização vacuolar e ao represamento do herbicida antes de atingir os meristemas, explicação amplamente aceita, mas construída sobre evidência indireta do que sobre demonstração direta. Diante dessa limitação, adjuvantes que acelerem a absorção cuticular aparecem como saída relativamente óbvia (PALMA-BAUTISTA *et al.*, 2020); menos óbvio é se um adjuvante natural, de composição variável e origem não padronizada como o ácido pirolenhoso, sustenta esse mesmo benefício em condições de campo aberto, e se esse benefício é repetido de forma semelhante para herbicidas de classes químicas distintas.

A literatura sobre ácido pirolenhoso como adjuvante ainda é escassa: uma referência frequentemente citada no Brasil é um comunicado técnico, não um artigo revisado por pares, e testa o produto sobre um herbicida de mecanismo de ação totalmente diferente do glifosato e do 2,4-D (ZEFERINO; LIMA; VIEIRA, 2018). Já o avanço de sensores RGB embarcados em drones oferece uma saída metodológica que a literatura de fitotoxicidade tradicional não tinha: índices como o VARI e o TGI permitem acompanhar a mesma parcela ao longo de semanas, sem destruir a planta a cada leitura, e com sensibilidade à perda de clorofila que antecede a manifestação visual dos sintomas (GITELSON *et al.*, 2002; HUNT *et al.*, 2011).

Diante do exposto, a hipótese deste trabalho é que a associação do ácido pirolenhoso ao glifosato e ao 2,4-D modifica a eficácia do controle de plantas daninhas, sendo essa resposta dependente do herbicida utilizado e da concentração do ácido pirolenhoso na calda. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da associação e da concentração de ácido pirolenhoso na eficácia do glifosato e do 2,4-D no controle de plantas daninhas, em condições de campo, com monitoramento complementar da cobertura vegetal por índices de vegetação obtidos por drone.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Comunidade de plantas daninhas em sistemas agrícolas

A competição por água, luz e nutrientes exercida pelas plantas daninhas compromete de forma significativa o desenvolvimento e a produtividade das culturas de interesse econômico, sendo um dos principais fatores limitantes da produção agrícola tropical. Entre as espécies infestantes de maior relevância nas lavouras brasileiras está o gênero *Ipomoea* L. (Convolvulaceae), a corda-de-viola, que reúne a cerca de 500 espécies tropicais e subtropicais, das quais pelo menos quatro, *I. grandifolia* (Dammer) O'Donnell, *I. hederifolia* L., *I. aristolochiaefolia* G. Don. e *I. quamoclit* L., respondem pela maior parte das infestações em lavouras brasileiras (LORENZI, 2008). Rótulos de herbicida e boa parte da literatura de manejo tratam "*Ipomoea spp.*" como bloco único, mas a tolerância a herbicidas, em especial ao glifosato, varia sensivelmente entre espécies (CARNEIRO *et al.*, 2020), reforçando a importância de caracterizar a comunidade infestante como um todo, e não apenas a espécie de maior visibilidade, ao avaliar a eficácia de um programa de manejo químico. São herbáceas trepadoras de ciclo curto (90 a 120 dias em condições tropicais), germinação fotossensitiva e forte dependência de temperatura (25-35°C) e umidade do solo, condições que o Cerrado e a Amazônia oferecem com folga na maior parte do ano agrícola (AEGRO, 2021). Pitelli (1985) situa o período crítico de prevenção à interferência em soja nas quatro primeiras semanas após a emergência, valor que, por ter mais de três décadas, convém tratar como referência de ordem de grandeza, não como parâmetro fixo para os sistemas de plantio direto e as cultivares atuais.

2.2 Glifosato: mecanismo de ação e fatores de tolerância em plantas daninhas

O mecanismo de ação do glifosato [N-(fosfonometil)glicina] é um dos pontos mais bem estabelecidos da fisiologia de herbicidas: inibição da EPSPS (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase, EC 2.5.1.19) na rota do ácido chiquímico, com bloqueio da síntese de fenilalanina, tirosina e triptofano e morte da planta em 7 a 21 dias, a depender do estágio e das condições ambientais (DUKE; POWLES, 2008). Ainda há menor consenso sobre fatores que permitem algumas espécies infestantes, como as do gênero *Ipomoea*, escapar desse mecanismo quando tratadas em estádios avançados. Duke e Powles (2008) atribuem a tolerância à combinação de compartimentalização vacuolar do herbicida e ao represamento (trapping) do glifosato na bainha dos feixes vasculares, por deposição de calose nos plasmodesmas,

explicação amplamente citada na literatura de manejo, mas que os próprios autores apresentam como hipótese fisiológica consolidada por evidência indireta, não como mecanismo demonstrado ponto a ponto para as espécies infestantes de modo geral.

Essa variabilidade de resposta não é exclusiva de um único gênero: populações de *Conyza spp.*, *Digitaria insularis* e *Chloris spp.* também apresentam tolerância ou resistência documentada ao glifosato no Brasil, associada a mecanismos que vão da alteração do sítio de ação à redução de absorção e translocação (HRAC-BR, 2024). No caso específico de *Ipomoea*, as doses de bula reforçam essa dependência de estágio e espécie de forma indireta: 1.440 g e.a. ha⁻¹ para *I. aristolochiaefolia* contra 1.920 g e.a. ha⁻¹ para *I. quamoclit* (UPL DO BRASIL, 2019), quase 500 g e.a. ha⁻¹ de diferença entre duas espécies do mesmo gênero, popularmente chamadas do mesmo jeito no campo. Esses valores vêm de dossiê de registro, cuja metodologia de obtenção não é integralmente pública, limitando a comparação crítica com ensaios acadêmicos independentes.

2.3 2,4-D: mecanismo de ação e eficácia sobre dicotiledôneas

Diferentemente do glifosato, o 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético) é seletivo para gramíneas: mimetiza a auxina AIA, provoca crescimento celular descontrolado e leva a planta dicotiledônea à epinastia, formação de calos e, por fim, necrose (CULTIVAR, 2024). A translocação preferencialmente floemática dá a esse herbicida eficácia sistêmica razoável sobre folhas largas, mas a literatura sobre 2,4-D é consideravelmente mais escassa e menos recente do que a de glifosato, e boa parte do que se sabe sobre compatibilidade de formulação vem de bulas comerciais, não de ensaios de compatibilidade publicados de forma independente. As formulações brasileiras são majoritariamente sais de dimetilamina, cuja estabilidade em calda depende do grau de ionização do princípio ativo.

Estudos sobre a eficácia do 2,4-D em plantas daninhas de folha larga geralmente reportam controle satisfatório em estádios iniciais, com queda de eficiência à medida que a planta avança no ciclo, padrão documentado para diversos gêneros infestantes de importância agrícola. No caso de *Ipomoea grandifolia* especificamente, a bula do DMA 806 BR indica controle superior a 85% até o estágio de quatro folhas com doses de 670 a 1.005 g e.a. ha⁻¹ (CTVA, 2024), patamar de eficácia que a literatura acadêmica não reproduz de forma tão categórica. Takano *et al.* (2013), por exemplo, relatam sinergismo entre 2,4-D e glifosato no controle de *Ipomoea grandifolia* em estádios avançados, mas o ensaio foi conduzido com uma

combinação fixa de doses e não permite generalizar a magnitude desse sinergismo para outras proporções ou para o 2,4-D aplicado isoladamente.

2.4 Adjuvantes herbicidas: conceito, classificação e mecanismos de ação

Adjuvantes são substâncias que alteram propriedades físico-químicas da calda ou da superfície foliar sem exercer, por si só, atividade herbicida relevante, conforme definição consolidada por Green e Beestman (2007): reduzem tensão superficial, inibem a cristalização do ativo sobre a cutícula, acidificam a calda em favor da forma molecular não ionizada de ácidos fracos, ou aumentam a fluidez da cutícula. É uma definição funcional, quase operacional, e o campo de estudo dos adjuvantes avançou mais em catálogo de efeitos observados do que em consenso mecanístico: cada classe parece agir por vias distintas, e um mesmo adjuvante pode atuar por mecanismos diferentes, conforme o herbicida associado.

A adição de adjuvante ao glifosato reduziu a GR₅₀ (dose para 50% de redução de massa seca) em 22 a 44% em duas espécies de folha estreita, *Lolium rigidum* e *Conyza canadensis* (PALMA-BAUTISTA *et al.*, 2020), resultado robusto, mas obtido em espécies de porte herbáceo distinto de outras plantas daninhas de folha larga, o que torna a extrapolação direta uma suposição razoável, não uma equivalência comprovada. Carvalho *et al.* (2009) mostraram que a acidificação da calda por fertilizantes nitrogenados, não por ácido pirolenhoso, já bastava para aumentar a eficácia do glifosato em doses reduzidas, sugerindo que o mecanismo de acidificação em si é mais importante do que a fonte específica do ácido. Se o que importa é o pH da calda, um simples acidificante mineral poderia, em tese, produzir efeito equivalente a um custo menor. Para herbicidas formulados como sal de amina, caso do 2,4-D, a acidificação excessiva tende a favorecer a protonação prematura do sal e a formação de precipitados (GREEN; BEESTMAN, 2007).

2.5 Ácido pirolenhoso: composição, propriedades e uso como adjuvante

O ácido pirolenhoso, extrato pirolenhoso ou wood vinegar, é subproduto líquido da carbonização da madeira, com composição química que a própria literatura descreve como instável: mais de 200 compostos já identificados, com ácido acético (3-10%), metanol, acetona e fenóis variando conforme espécie de madeira e condições do forno, e pH bruto entre 2,2 e 3,7 (ZEFERINO; LIMA; VIEIRA, 2018). Essa variabilidade de composição é, por si só, um problema metodológico para qualquer generalização: dois lotes de ácido pirolenhoso, de

origens distintas, não são necessariamente comparáveis, e a maior parte dos estudos disponíveis, incluindo a referência central desta seção, não caracteriza cromatograficamente o produto testado, limitando-se ao pH e ao teor aproximado de ácido acético.

Uma referência frequentemente citada sobre o tema no Brasil é um comunicado técnico da Embrapa Florestas (ZEFERINO; LIMA; VIEIRA, 2018), não um artigo revisado por pares, no qual 2 L ha^{-1} de ácido pirolenhoso associados à metade da dose de oxifluorfen igualaram ou superaram a dose plena do herbicida isolado sobre *Brachiaria decumbens*, *Bidens pilosa* e *Amaranthus viridis*. Duas limitações raramente aparecem quando o trabalho é citado: o herbicida testado (oxifluorfen, um inibidor da PROTOX de contato) tem mecanismo de ação completamente distinto de herbicidas sistêmicos como o glifosato e o 2,4-D. A faixa de 2 a 5% v/v citada como concentração efetiva de adjuvância vem mais de uma convenção prática consolidada por Hagner (2013) e Parreira *et al.* (2023) do que de um corpo robusto de evidência específica para o par ácido pirolenhoso-glifosato ou ácido pirolenhoso-2,4-D.

2.6 Índices de vegetação RGB (VARI e TGI) como indicadores de eficácia herbicida

O índice de vegetação VARI (Visible Atmospherically Resistant Index) foi desenvolvido por Gitelson *et al.* (2002) e é definido pela expressão $VARI = (G - R) / (G + R - B)$, em que G, R e B correspondem, respectivamente, às reflectâncias nas bandas verde, vermelha e azul do espectro visível. O denominador funciona como compensador de variação atmosférica, tornando o índice teoricamente mais estável entre condições de iluminação do que uma razão simples de bandas. Valores positivos e altos (acima de 0,20) indicam vegetação ativa; valores próximos de zero indicam vegetação estressada; valores negativos indicam tecido necrótico ou solo exposto, escala contínua que não distingue, por si só, entre planta morta e solo nu, ambiguidade que a interpretação dos ortomosaicos.

O TGI (Triangular Greenness Index), proposto por Hunt *et al.* (2013), estima o teor de clorofila foliar a partir da área do triângulo formado pelas reflectâncias em três comprimentos de onda do visível: 480 nm (azul), 550 nm (verde) e 670 nm (vermelho). Em sua forma simplificada e normalizada pelo sinal verde, comumente empregada no processamento de imagens RGB e adotada neste trabalho, o índice é calculado como $TGI = G - 0,39R - 0,61*B$ (HUNT *et al.*, 2013). Os autores originais descrevem o índice como mais sensível em dosséis de cobertura elevada, condição diferente de um experimento com parcelas de plantas daninhas em diferentes estádios de necrose.

A vantagem prática de ambos, câmera RGB comum acoplada a drone, sem sensor multiespectral, é também sua maior fragilidade: dependem inteiramente da faixa visível do espectro e, portanto, de iluminação solar estável entre voos, algo que um painel de calibração radiométrica só corrige parcialmente. Gitelson *et al.* (2002) e Hunt *et al.* (2011) discutem essa sensibilidade em termos gerais, mas nenhum dos dois trabalhos foi conduzido especificamente para monitoramento herbicida ao longo de semanas em campo aberto tropical, cenário mais exigente, em variação de ângulo solar e cobertura de nuvens, do que os ensaios originais que validaram os dois índices.

2.7 Escala EWRC (1964) de avaliação de fitointoxicação

A escala do European Weed Research Council (EWRC, 1964) é anterior a praticamente toda a literatura de sensoriamento remoto citada nesta revisão e segue sendo o padrão de referência em ensaios de registro: nota de 1 (sem danos) a 9 (morte), passando por descoloração leve, necrose parcial e colapso progressivo. É um instrumento simples e barato, mas simples não é o mesmo que preciso. Colapsar toda a progressão de sintomas de uma planta (epinastia, clorose, necrose, murcha) em um único número ordinal de 1 a 9 é, inevitavelmente, perda de informação, e a literatura raramente discute o quanto essa perda compromete comparações entre avaliadores diferentes, apesar de recomendar o uso de dois avaliadores independentes e a média das notas. A principal desvantagem dessa avaliação em relação ao monitoramento por drone é justamente essa: trata-se de um método mais subjetivo, que exige experiência do avaliador e cuja repetibilidade entre observadores raramente é quantificada na literatura.

Essa dependência do avaliador é, portanto, o ponto mais frágil do método, o que reforça o valor de confrontá-lo com um índice espectral objetivo como o VARI ou o TGI, capaz de fornecer uma medida complementar e não subjetiva da mesma resposta de fitointoxicação.

2.8 Análise fitossociológica de comunidades infestantes

O aparato de frequência, densidade e abundância e o índice de valor de importância que deles deriva, foi desenvolvido por Mueller-Dombois e Ellenberg (1974) para descrever comunidades vegetais naturais, não comunidades de plantas daninhas em lavoura. A adaptação para agroecossistemas, consolidada no Brasil por Erasmo, Pinheiro e Costa (2004) e revisada por Pitelli (2000) e Concenço *et al.* (2013), manteve a lógica original quase intacta, mas herdou um problema conceitual pouco discutido: o próprio conceito de "indivíduo", central para

calcular densidade e abundância, é ambíguo em espécies de propagação vegetativa e hábito de touceira, caso de *Cynodon spp.*, frequente em levantamentos de comunidades infestantes brasileiras, nas quais é frequentemente impossível distinguir, a olho nu em campo, quando termina um indivíduo e começa outro geneticamente distinto.

Ainda assim, o levantamento fitossociológico cumpre papel que nenhum dos outros métodos desta revisão cobre sozinho: caracterizar a comunidade como um todo, não apenas a espécie-alvo. Oliveira e Freitas (2008) e Sena *et al.* (2019) documentam, em contextos de cana-de-açúcar e arroz irrigado respectivamente, que herbicidas podem suprimir a espécie-alvo e, ao mesmo tempo, favorecer relativamente espécies acompanhantes tolerantes. Ainda assim, mesmo quando VARI, TGI e EWRC são obtidos sobre a cobertura vegetal completa da parcela, eles não substituem a informação, própria da fitossociologia, sobre quais espécies especificamente compõem essa cobertura e como a proporção entre elas é alterada.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local e período experimental

O experimento foi instalado a campo aberto, numa área de pousio em Araguatins, TO (05°07'28" S, 48°07'28" O), entre junho e julho de 2026. A área é caracterizada pela presença de um Argissolo vermelho-amarelo eutrófico, constituído por 43,49% de areia, 43,27% de argila e 13,24% de silte na camada superficial, os dados da caracterização físico-químicas foram obtidos por meio de análise laboratorial de amostras coletadas previamente no local do experimento, a profundidade de 0- 20 cm. A identificação das espécies foi realizada com base nas características morfológicas, utilizando como referência o Manual de Identificação e Controle de Plantas Daninhas (7ª edição), de Lorenzi (2014). A condução fora da sede do Programa de Pós-Graduação (Instituto Federal Goiano, Campus Morrinhos) resultou de uma parceria com o Instituto Federal do Tocantins, Campus Araguatins, que cedeu a área. Tomou-se 9 de junho de 2026 como dia 0, aplicação dos tratamentos, referência para toda a contagem de dias após a aplicação (DAA) usada no restante deste trabalho.



Figura 1. Vista geral da área experimental, com as parcelas demarcadas por estacas e placas de identificação dos tratamentos.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento foi em blocos ao acaso (DBC), oito tratamentos e quatro repetições totalizando 32 parcelas de 3,0 × 3,0 m (9,0 m²). A escolha do DBC parte do pressuposto de que existe alguma fonte de variação de fundo na área, razão pela qual os blocos foram alinhados

perpendicularmente ao gradiente de declividade do terreno, separados por corredor de 0,5 m. Não houve demarcação de subparcela para coleta destrutiva nem redução da área da parcela para fins de leitura espectral: a parcela inteira de $3,0 \times 3,0$ m permaneceu disponível, do início ao fim, para VARI, TGI e EWRC, explicando quando qualquer corte de biomassa entraria em conflito direto com o monitoramento por imagem repetido nas mesmas parcelas (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos oito tratamentos, herbicidas, doses e concentrações de ácido pirolenhoso (AP).

Trat.	Descrição	Herbicida	Dose herbicida	AP (% v/v)
T1	Controle absoluto	-	-	-
T2	Glifosato isolado	Glifosato	1.440 g e.a. ha ⁻¹	-
T3	2,4-D isolado	2,4-D	670 g e.a. ha ⁻¹	-
T4	Ácido pirolenhoso isolado	-	-	4%
T5	Glifosato + AP baixo	Glifosato	1.440 g e.a. ha ⁻¹	2%
T6	Glifosato + AP alto	Glifosato	1.440 g e.a. ha ⁻¹	4%
T7	2,4-D + AP baixo	2,4-D	670 g e.a. ha ⁻¹	2%
T8	2,4-D + AP alto	2,4-D	670 g e.a. ha ⁻¹	4%

¹ e.a.: equivalente ácido. ² AP: ácido pirolenhoso bruto filtrado (200 mesh), origem madeira de eucalipto, pH 2,5-3,5, teor de ácido acético $\geq 3\%$. DAA: dias após a aplicação.



Figura 2. Identificação das parcelas experimentais em campo por meio de placas fixadas em estacas (exemplo dos tratamentos T1 e T3).

Fonte: dados da pesquisa (2026).

4.3 Preparo e aplicação dos tratamentos

A ordem de adição ao tanque seguiu a sequência padrão para evitar incompatibilidade de calda: metade do volume de água, herbicida sob agitação, ácido pirolenhoso adicionado lentamente, e só então o restante da água. As plantas estavam em pós-emergência, pulverizadas com pulverizador costal manual, calibrado para o volume de calda de 200 L ha⁻¹. Nenhuma aplicação foi feita fora da janela ambiental mínima adotada: temperatura entre 20 e 28°C, umidade relativa igual ou superior a 60%, vento abaixo de 5 km h⁻¹ e sem previsão de chuva nas quatro horas seguintes.

Cada tanque do pulverizador costal foi calibrado para 5 L de calda, volume suficiente para cobrir as quatro repetições de um mesmo tratamento em uma única preparação, evitando variação de calda entre blocos. Nesse volume, o glifosato comercial (480 g L⁻¹) entrou na proporção de 85 mL por tanque, equivalente à dose de 3 L ha⁻¹ de bula (1.440 g e.a. ha⁻¹, Tabela 1) para o volume de calda de 200 L ha⁻¹ adotado, e o 2,4-D (670 g L⁻¹) na proporção correspondente a 1 L ha⁻¹ de bula (670 g e.a. ha⁻¹). O ácido pirolenhoso entrou nas proporções de 100 mL por tanque de 5 L nos tratamentos de concentração baixa (2% v/v) e 200 mL por tanque nos de concentração alta (4% v/v), para os tratamentos combinados (T5 a T8) e para o ácido pirolenhoso isolado (T4, calda também de 5 L).



Figura 3. Medição volumétrica do ácido pirolenhoso decantado (extrato pirolenhoso comercial) para incorporação à calda de pulverização.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

4.4 Aquisição e processamento das imagens RGB por drone

Os voos ocorreram entre 10h e 14h, janela escolhida para minimizar variação no ângulo de incidência solar entre missões, ponto sensível dado que VARI e TGI dependem só da faixa visível do espectro. Foi utilizada uma aeronave remotamente pilotada DJI Mini 2, equipada com câmera digital de sensor CMOS de 1/2,3" e resolução de 12 megapixels, voando a altitude aproximada de 10 m em relação ao solo, com sobreposição frontal e lateral de 70% e ângulo do gimbal em -90° , garantindo fotografias na posição nadiral. Esse protocolo de aquisição é consistente com o empregado por Mesquita e Souza (2026) no mesmo Setor de Agricultura III do Campus Araguatins, o que permite comparabilidade direta entre os dois levantamentos. O ortomosaico RGB foi montado no software WebODM, e a extração de VARI foi realizada no ambiente R (R Core Team, 2025), com os pacotes terra, para importação dos ortomosaicos, e uavRst, para o processamento das imagens e cálculo dos índices espectrais, após recorte das 32 parcelas por shapefile georreferenciado, considerando a área total de $3,0 \times 3,0$ m de cada uma. Cada parcela, em cada época, ficou reduzida a um único número: a média aritmética dos pixels de toda a sua área.

Seguindo o cronograma de voos 09/06 (dia 0), 12/06 (3 DAA), 15/06 (6 DAA), 17/06 (8 DAA), 22/06 (13 DAA), 24/06 (15 DAA) e 01/07/2026 (22 DAA). Datas de observação disponíveis para caracterizar a dinâmica dos índices ao longo do período experimental.

4.5 Protocolo de avaliações complementares

Este trabalho não mede massa seca (MS) nem percentual de controle (PC%): omissão deliberada, não esquecimento. Os dois protocolos convencionais exigem cortar a parte aérea das plantas, seja em subparcela reservada, seja na área útil inteira ao final do experimento, e qualquer corte alteraria a cobertura vegetal fotografada nos voos seguintes, comprometendo a própria série temporal de VARI e TGI que é o eixo deste trabalho. Cada parcela precisava representar, do dia 0 ao dia 22, a mesma população de plantas sob o mesmo tratamento, sem a própria coleta de dados interferindo no que estava sendo medido. Optou-se, portanto, por inferir eficácia herbicida exclusivamente de variáveis não destrutivas: os índices espectrais (itens 4.4 e 5.1 a 5.6) e a escala visual EWRC (abaixo e item 5.7), na mesma lógica que já justifica, na literatura, o próprio uso de sensoriamento remoto em ensaios de fitotoxicidade, avaliação repetida sem invadir a unidade experimental (GITELSON *et al.*, 2002; HUNT *et al.*, 2011).

A fitointoxicação foi avaliada pela escala EWRC (1964, Tabela 2), por dois avaliadores independentes, nas mesmas datas dos voos a partir dos 7 DAA; a nota de parcela é a média das duas leituras. Em campo, a progressão de sintomas nas plantas seguiu tipicamente epinastia foliar (notas 2-3), clorose internerval (4-5), necrose laminar (6-7), colapso dos caules (8) e morte (9).

Tabela 2. Escala conceitual de fitointoxicação proposta pelo European Weed Research Council.

Nota	Descrição do sintoma
1	Sem dano
2	Pequenas alterações (descoloração, deformação) visíveis em algumas plantas.
3	Pequenas alterações (descoloração, deformação) visíveis em muitas plantas.
4	Forte descoloração (amarelecimento) ou razoável deformação, sem ocorrência de necrose.
5	Necrose (queima) de algumas folhas, especialmente nas margens, associada a deformação de folhas e brotos.
6	Mais de 50% das folhas e brotos com necrose.
7	Mais de 80% das folhas e brotos destruídos.
8	Danos extremamente graves, restando apenas pequenas áreas verdes na planta.
9	Morte total da planta.

Fonte: adaptado de EWRC (1964).

Além dos voos de índice de vegetação, fotografias aéreas oblíquas e verticais registraram as parcelas em três datas adicionais (29/06, 05/07 e 17/07/2026), documentando visualmente a progressão dos sintomas e a evolução da cobertura do solo além da janela de 22 DAA coberta pela análise estatística.

4.6 Levantamento fitossociológico da comunidade infestante

VARI, TGI e EWRC captam a resposta da cobertura vegetal da parcela como um todo, mas não identificam quais espécies especificamente a compõem. Para preencher essa lacuna, conduziu-se, nas 32 parcelas, um levantamento fitossociológico prévio à aplicação (0 DAA), com quadro-inventário de $0,5 \times 0,5$ m ($0,25$ m² por parcela, $8,0$ m² de área amostral total), identificação botânica e contagem de indivíduos por espécie, seguindo o protocolo consolidado por Mueller-Dombois e Ellenberg (1974) e adaptado a plantas daninhas brasileiras por Erasmo, Pinheiro e Costa (2004). A repetição do levantamento aos 22 DAA, que permitiria comparar a comunidade antes e depois dos tratamentos.



Figura 4. Quadro-inventário de $0,5 \times 0,5$ m utilizado no levantamento fitossociológico, sobre vegetação com *Ipomoea spp.* e gramíneas.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

De cada quadro saíram os parâmetros clássicos por espécie: frequência absoluta e relativa (Fr, FR%), densidade absoluta e relativa (De, DR%), abundância absoluta e relativa (Ab, AR%), tomando-se cada parcela como unidade amostral ($n = 8$ por bloco, $n = 32$ no total) e somando os três valores relativos no índice de valor de importância ($IVI = FR\% + DR\% + AR\%$) e na forma relativizada ($IVIr\% = IVI/3$), conforme Mueller-Dombois e Ellenberg (1974) e Erasmo, Pinheiro e Costa (2004).

4.7 Análise estatística

As análises estatísticas e o processamento dos dados foram realizados no ambiente R (R Core Team, versão 4.4.2), utilizando diferentes pacotes de acordo com a finalidade de cada análise.

Para a avaliação da riqueza de espécies da comunidade infestante, os dados foram organizados e estruturados com auxílio do pacote *tidyverse*, permitindo a manipulação, filtragem e sumarização das informações. A representação gráfica da composição florística foi realizada utilizando o pacote *ggplot2*.

A análise temporal do índice VARI foi realizada a partir das imagens obtidas por ARP. Inicialmente, os ortomosaicos foram importados utilizando o pacote *terra*, enquanto o cálculo dos índices espectrais foi realizado por meio do pacote *uavRst*, empregando as funções específicas para processamento de imagens multiespectrais/RGB.

Em seguida, os valores do índice VARI e TGI foram extraídos para cada parcela experimental e submetidos ao cálculo das médias por tratamento e por data de avaliação. Os resultados foram organizados e exportados com auxílio do pacote *writexl*, sendo a representação gráfica da evolução temporal do índice elaborada com o pacote *ggplot2*. mesma ferramenta empregada por Mesquita e Souza (2026) em condições experimentais semelhantes.

Como referência de precisão experimental adotou-se CV% entre 10 e 20%, com a ressalva de que índices cujo valor médio aproxima-se de zero, caso do VARI em datas iniciais, inflacionam esse coeficiente por razão puramente aritmética, não por perda de controle experimental. Como já registrado no item 4.5, não há aqui variável destrutiva nem SPAD: a base estatística é VARI, TGI e EWRC.

Dessas três, VARI e TGI têm ANOVA e Tukey concluídos para as datas inicial (09/06, 0 DAA) e final (01/07, 22 DAA), no item 5.1 (Tabela 4). O EWRC foi levantado em três datas (7, 14 e 21 DAA), com a última coincidindo com a última campanha de imageamento de VARI e TGI.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir referem-se ao monitoramento espectral das 32 parcelas experimentais por meio dos índices VARI e TGI, extraídos de sete campanhas de imageamento por drone realizadas entre 0 e 22 dias após a aplicação (DAA). A discussão é organizada em três eixos: (i) a dinâmica temporal geral dos índices; (ii) a diferenciação entre grupos de tratamentos a partir da fase de expressão de sintomas; e (iii) a evidência fotográfica de campo como validação qualitativa dos padrões espectrais observados.

A escolha do VARI como índice principal é respaldada por trabalhos recentes conduzidos em condições brasileiras: Nobre *et al.* (2024) avaliando diferentes métodos de pulverização de herbicidas em soja, verificaram que o VARI foi capaz de diferenciar estatisticamente tratamentos com aplicação de herbicida do tratamento testemunha, ao passo que outros índices RGB comumente empregados (ExG e GLI) não apresentaram sensibilidade suficiente para tal diferenciação, resultado que reforça a adequação do VARI, combinado ao TGI, como par de índices sensíveis à resposta herbicida em imagens RGB de drone, escolha metodológica central deste trabalho.

5.1 Dinâmica temporal geral do VARI e do TGI

A evolução temporal média do VARI (painel A) e do TGI (painel B) para os oito tratamentos, entre 8 de junho e 1º de julho de 2026 (Figura 5). Observa-se, para ambos os índices, um padrão comum a todas as curvas: um declínio inicial acentuado entre a primeira leitura (09/06, imediatamente à aplicação) e a leitura seguinte (11/06 de calendário, correspondente a 3 DAA), no qual inclusive o tratamento controle absoluto (T1) apresentou redução expressiva de VARI (de aproximadamente 0,04 para -0,05) e de TGI (de 1.850 para 2.230, seguido de queda).

Esse comportamento indica que parte da variação observada nos primeiros dias não pode ser atribuída exclusivamente ao efeito herbicida, mas reflete também fatores comuns a todas as parcelas, provavelmente a progressão natural da senescência sazonal da vegetação de pousio no período de transição para a estação seca, associada a possíveis diferenças de ângulo de iluminação solar entre voos, um fator reconhecidamente sensível para índices calculados exclusivamente na faixa do visível (GITELSON *et al.*, 2002; HUNT *et al.*, 2011).

Esse achado reforça a recomendação metodológica de manutenção de um tratamento controle absoluto e de painel de calibração radiométrica em experimentos que empregam VARI/TGI como variável-resposta, de modo a isolar o efeito herbicida da variação de fundo.

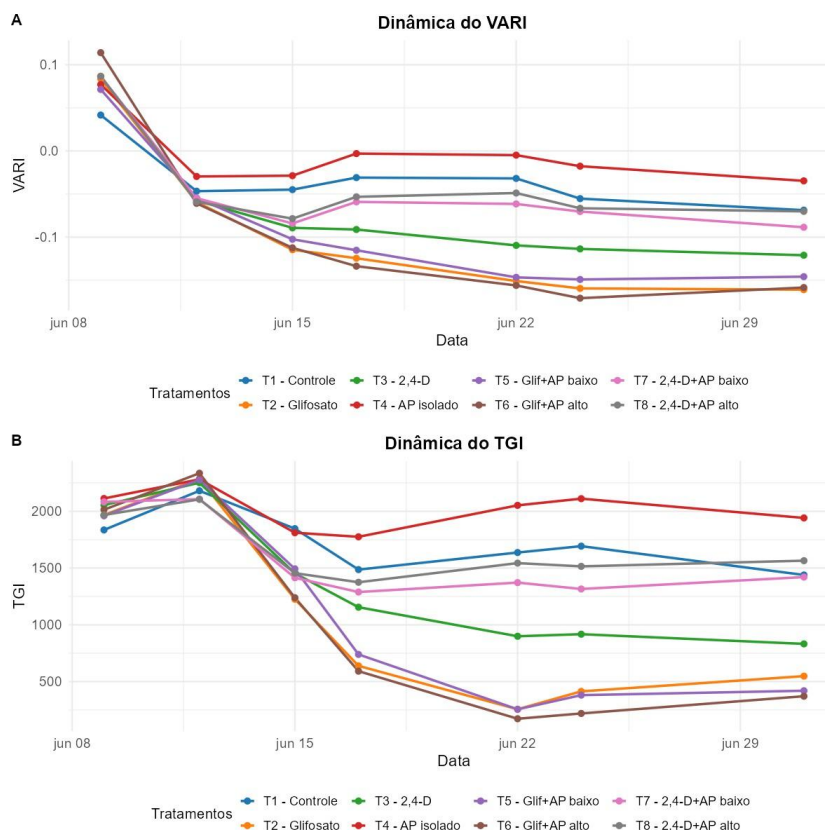


Figura 5. Dinâmica temporal do índice VARI (A) e do índice TGI (B) para os oito tratamentos avaliados, entre 08/06 e 01/07/2026.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A partir de aproximadamente 6 a 8 DAA, as curvas de ambos os índices deixaram de acompanhar um padrão único e passaram a diferenciar de forma consistente entre os tratamentos, coincidindo com a janela de tempo em que a literatura situa a expressão visual dos sintomas de intoxicação por glifosato (7 a 21 dias, conforme o estágio fenológico) e por 2,4-D (epinastia nas primeiras 24-72 horas, seguida de necrose progressiva em 7 a 14 dias) (DUKE; POWLES, 2008; CULTIVAR, 2024).

Esse atraso entre a aplicação e a diferenciação espectral plena é compatível com o tempo necessário para o colapso metabólico induzido pela inibição da EPSPS, no caso do glifosato, e para a progressão dos sintomas auxínicos do 2,4-D, indicando que, nas condições avaliadas, a antecipação da detecção por sensoriamento remoto em relação à avaliação visual, embora

esperada teoricamente (GITELSON *et al.*, 2002), foi discreta, da ordem de poucos dias, e não imediata a partir da aplicação.

Esse resultado contrasta, em magnitude temporal, com o de Yao *et al.* (2012), que detectaram injúria por glifosato em soja já nas primeiras 24 horas após a aplicação por meio de índices espectrais derivados de dados hiperespectrais foliares, diferença atribuível à maior resolução espectral do sensor hiperespectral empregado por aqueles autores em relação às três bandas do visível (vermelho, verde e azul) disponíveis em câmeras RGB convencionais, como as utilizadas no presente trabalho.

Resultados semelhantes foram obtidos por Ortiz *et al.* (2011), que, utilizando imagens aéreas multiespectrais para diferenciar níveis de injúria por glifosato em algodão, relataram separação estatística dos tratamentos a partir de aproximadamente uma semana após a exposição, prazo mais próximo ao observado neste trabalho e que reforça a plausibilidade da janela de 6-8 DAA aqui identificada como o limiar prático de diferenciação espectral para sensores RGB em condições de campo.

A leitura detalhada da Figura 5 permite decompor a dinâmica temporal em quatro fases distintas. Na primeira fase (0-3 DAA), todos os tratamentos, incluindo o controle absoluto, apresentaram redução acentuada e de magnitude semelhante em ambos os índices, consistente com a variação de fundo. Na segunda fase (3-8 DAA), a maioria dos tratamentos manteve valores relativamente estáveis ou em leve declínio, com o TGI inclusive voltando a subir discretamente entre 3 e 6 DAA para o grupo do 2,4-D e do controle, provavelmente refletindo recuperação parcial e transitória da turgescência foliar após o estresse inicial de manuseio e aplicação, e o início, ainda incipiente, da diferenciação entre tratamentos.

Na terceira fase (8-15 DAA), verificou-se a queda mais acentuada e mais discriminante entre tratamentos: os grupos à base de glifosato (T2, T5, T6) apresentaram, nesse intervalo de sete dias, redução adicional de VARI da ordem de 0,06 a 0,08 unidades e de TGI superior a 800 unidades, taxa de declínio muito mais acentuada que a observada no grupo do 2,4-D isolado, e mais ainda nos tratamentos T1, T4 e T8, cujas curvas praticamente estabilizaram nesse intervalo.

Esse padrão de queda tardia e acelerada é coerente com o mecanismo de ação sistêmica do glifosato, cujo efeito depende da translocação floemática até os meristemas e da subsequente depleção dos aminoácidos aromáticos, processo que se manifesta de forma mais lenta, porém

mais completa, do que o dano de contato inicial (DUKE; POWLES, 2008). Na quarta fase (15-22 DAA), observou-se estabilização ou leve recuperação dos índices para os tratamentos mais severamente afetados (T2, T5, T6).

A análise de variância (ANOVA) confirmou estatisticamente esse padrão descritivo para as datas inicial (09/06, 0 DAA) e final (01/07, 22 DAA) do período experimental (Tabela 3). Na condição basal, os oito tratamentos não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) tanto para o VARI quanto para o TGI (todas as médias seguidas da mesma letra "a"), confirmando a homogeneidade inicial das parcelas e validando o pressuposto de partida do delineamento em blocos ao acaso.

Aos 22 DAA, por sua vez, os tratamentos foram separados em grupos estatisticamente distintos para ambos os índices, corroborando a diferenciação visual observada na Figura 5. Os pressupostos da ANOVA foram atendidos em todos os casos: o teste de Shapiro-Wilk não rejeitou a normalidade dos resíduos ($p > 0,05$) e o teste de Bartlett não rejeitou a homogeneidade de variâncias ($p > 0,05$, inclusive no caso mais próximo do limiar, VARI aos 22 DAA, $p = 0,0567$).

Segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2009) para experimentos de campo, CV baixo ($< 10\%$), médio ($10\text{-}20\%$), alto ($20\text{-}30\%$) e muito alto ($> 30\%$), os coeficientes de variação do TGI em ambas as datas ($10,06\%$ e $20,18\%$) e do VARI aos 22 DAA ($20,03\%$) situam-se nas faixas média a moderadamente alta, compatíveis com a precisão usualmente obtida em experimentos de campo com plantas daninhas sob condições não controladas.

Já o CV do VARI basal ($38,25\%$), classificado como muito alto por esse critério, é inflacionado pela proximidade dos valores absolutos de zero nessa data, uma vez que o CV é uma medida relativa à média, valores médios próximos de zero produzem coeficientes de variação matematicamente elevados mesmo com dispersão absoluta pequena entre repetições, característica já discutida para índices de banda espectral estreita (GITELSON *et al.*, 2002) e que não deve ser interpretada como indício de falta de controle experimental.

Tabela 3. Médias de VARI e TGI por tratamento, na condição basal (09/06, 0 DAA) e ao final do período experimental (01/07, 22 DAA), com separação de médias pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Tratamento	VARI (09/06)	TGI (09/06)	VARI (01/07)	TGI (01/07)
T1 – Controle	0,04 a	1835 a	-0,07 ab	1439 ab
T2 – Glifosato	0,08 a	1967 a	-0,16 d	548 c
T3 – 2,4-D	0,09 a	2054 a	-0,12 cd	832 c
T4 – AP isolado	0,08 a	2112 a	-0,04 a	1941 a
T5 – Glifosato + AP baixo	0,07 a	1960 a	-0,15 d	419 c
T6 – Glifosato + AP alto	0,11 a	2013 a	-0,16 d	371 c
T7 – 2,4-D + AP baixo	0,09 a	2082 a	-0,09 bc	1420 b
T8 – 2,4-D + AP alto	0,09 a	1967 a	-0,07 ab	1564 ab
CV (%)	38,25	10,06	20,03	20,18
Shapiro-Wilk (p)	0,1870	0,3772	0,5753	0,7415
Bartlett (p)	0,5550	0,9194	0,0567	0,8133

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$).

5.2 Diferenciação entre tratamentos à base de glifosato

Os tratamentos formulados com glifosato, isolado (T2) e associado ao ácido pirolenhoso em 2% (T5) e 4% (T6), apresentaram, a partir dos 8 DAA, as reduções mais acentuadas e mais persistentes de VARI e de TGI dentre todos os tratamentos avaliados. Aos 22 DAA, T2, T5 e T6 formaram o grupo estatístico mais severo tanto para o VARI (letra "d") quanto para o TGI (letra "c"), com médias de VARI entre -0,15 e -0,16 e de TGI entre 371 e 548, reduções superiores a 70% do TGI em relação aos valores basais, evidenciando colapso da atividade fotossintética da cobertura vegetal dessas parcelas.

Esse padrão é consistente com a ação sistêmica do glifosato sobre a via do ácido chiquímico e com o mecanismo de morte lenta e progressiva característico desse herbicida (DUKE; POWLES, 2008).

Estatisticamente, T2, T5 e T6 não diferiram entre si pelo teste de Tukey em nenhum dos dois índices (mesma letra em cada coluna da Tabela 3), indicando que, nas condições avaliadas, a adição de ácido pirolenhoso, em nenhuma das duas concentrações testadas, proporcionou incremento estatisticamente significativo à eficácia do glifosato isolado aos 22 DAA.

Esse resultado qualifica a hipótese de acidificação da calda como mecanismo potencializador da absorção cuticular (CARVALHO *et al.*, 2009; PALMA-BAUTISTA *et al.*, 2020; ZEFERINO; LIMA; VIEIRA, 2018): o mecanismo permanece plausível e coerente com a leitura descritiva das curvas temporais (item 5.1), mas seu efeito, se existente, não foi suficiente para produzir separação estatística em relação ao glifosato isolado nas condições ambientais do experimento, aplicação em plantas de 3 a 4 folhas, temperatura e umidade relativa na faixa recomendada, condições que já favorecem naturalmente a absorção do glifosato mesmo sem adjuvante.

Esse tipo de resposta é coerente com observações de Palma-Bautista *et al.* (2020), para quem o benefício relativo de adjuvantes tende a ser mais expressivo em condições de absorção subótima, e menos pronunciado quando as condições de aplicação já favorecem a penetração do herbicida.

A magnitude de redução do TGI observada nos tratamentos à base de glifosato (70 a 82% em relação aos valores basais aos 22 DAA) é compatível, em ordem de grandeza, com reduções relatadas para índices de vegetação RGB e multiespectrais em outras culturas expostas a glifosato. Ortiz *et al.* (2011) avaliando injúria por deriva de glifosato em algodão por meio de índices espectrais aéreos, registraram reduções de índices de vegetação superiores a 60% nos níveis de exposição mais elevados, em prazo semelhante ao aqui verificado.

Da mesma forma, Yao *et al.* (2012) documentaram redução progressiva e sustentada de índices de vegetação em soja intoxicada por glifosato ao longo de um período de avaliação de duas a três semanas, com estabilização dos valores nas fases finais de avaliação, padrão de plateau semelhante ao observado neste trabalho entre os 15 e os 22 DAA para os tratamentos T2, T5 e T6 (Figura 5).

A convergência desses resultados, obtidos em espécies, sensores e condições edafoclimáticas distintas, reforça a robustez do uso de índices de vegetação derivados de imagens aéreas como indicador quantitativo da severidade de injúria por glifosato, para além da espécie-alvo e do contexto específico deste experimento.

5.3 Diferenciação entre tratamentos à base de 2,4-D

Um dos achados que merece destaque neste experimento, agora confirmado estatisticamente, foi o comportamento distinto dos tratamentos com 2,4-D em relação aos

tratamentos com glifosato quanto ao efeito do ácido pirolenhoso. O 2,4-D isolado (T3) formou, aos 22 DAA, grupo estatístico intermediário ($VARI = -0,12$, letra "cd"; $TGI = 832$, letra "c"), sem diferir do grupo mais severo (glifosato) quanto ao TGI, mas com eficácia inferior aos tratamentos com glifosato quanto ao VARI.

A associação do 2,4-D ao ácido pirolenhoso, tanto em 2% (T7: $VARI = -0,09$, letra "bc"; $TGI = 1420$, letra "b") quanto, com mais força, em 4% (T8: $VARI = -0,07$, letra "ab"; $TGI = 1564$, letra "ab"), resultou em grupos estatísticos de menor severidade que o 2,4-D isolado em ambos os índices, isto é, a adição do adjuvante reduziu, de forma estatisticamente significativa, a resposta fitotóxica do herbicida, com efeito tanto mais acentuado quanto maior a concentração de ácido pirolenhoso.

Esse resultado contraria a hipótese inicial de que a acidificação da calda beneficiaria igualmente os dois herbicidas avaliados, e confirma estatisticamente uma interação antagônica entre o ácido pirolenhoso e a formulação comercial do 2,4-D utilizada, tipicamente um sal de dimetilamina (CTVA, 2024). Do ponto de vista físico-químico, é plausível que a acidificação pronunciada promovida pelo ácido pirolenhoso (pH 2,5-3,5) favoreça a protonação do sal amínico do 2,4-D antes ou durante a deposição foliar, com possível formação de precipitados ou de frações de menor solubilidade em água na calda, fenômeno já descrito na literatura para combinações entre adjuvantes fortemente acidificantes e herbicidas formulados como sais (GREEN; BEESTMAN, 2007).

Alternativamente, a maior concentração de compostos fenólicos e ácidos orgânicos do ácido pirolenhoso poderia interferir na taxa de volatilização ou na estabilidade da gota de calda sobre a superfície foliar de forma distinta daquela observada para o glifosato, que é comercializado como sal isopropilamina com perfil de solubilidade diferente. O caráter dose-dependente do antagonismo, mais pronunciado em T8 (4% de AP) do que em T7 (2% de AP), reforça a hipótese de um mecanismo ligado à concentração de ácido na calda, e não a um efeito aleatório de campo.

Esse achado aponta para a necessidade de testes de compatibilidade em provador de jarros (jar test) previamente à recomendação de associação entre ácido pirolenhoso e 2,4-D, e ilustra que o efeito de um adjuvante não pode ser generalizado entre herbicidas de diferentes classes químicas e formulações, indicação também discutida por Palma-Bautista *et al.* (2020) e por Green e Beestman (2007) para outras combinações adjuvante-herbicida.

A magnitude de resposta de índices de vegetação RGB a herbicidas auxínicos como o 2,4-D também encontra respaldo na literatura internacional recente. Abrantes *et al.* (2021), utilizando índices de vegetação RGB derivados de imagens de VANT para avaliar os efeitos do 2,4-D e do dicamba sobre soja, verificaram que os índices espectrais foram capazes de diferenciar estatisticamente níveis de exposição ao herbicida auxínico, com sensibilidade dependente da dose e do tempo decorrido após a exposição, padrão de resposta gradual e dose-dependente semelhante ao aqui observado entre T3, T7 e T8.

Em um comparativo direto entre avaliação visual de injúria por dicamba, em escala conceitual similar à EWRC, e índices de vegetação espectral obtidos por sensoriamento remoto, Marques, Da Cunha e Lemes (2021) reportaram correlação significativa entre os dois métodos, com os índices espectrais apresentando, em alguns casos, maior sensibilidade a variações de baixa magnitude do que a percepção visual do avaliador.

Essa evidência reforça a pertinência de confrontar, no presente trabalho, o VARI e o TGI com as notas EWRC (item 5.7), como forma de checar a coerência entre os dois métodos de avaliação de fitotoxicidade empregados.

5.4 Ácido pirolenhoso isolado e controle absoluto

O tratamento com ácido pirolenhoso isolado (T4, 4% v/v) apresentou, aos 22 DAA, as médias mais altas de VARI (-0,04) e de TGI (1941) dentre os oito tratamentos, estatisticamente não diferentes do controle absoluto T1 (VARI = -0,07, TGI = 1439; ambos no grupo "a"/"ab" da Tabela 4). T8 (2,4-D + AP alto) também não diferiu estatisticamente de T1 e T4 em nenhum dos dois índices, reunindo-se ao mesmo grupo estatístico menos severo, reforçando, com significância estatística, a leitura do item 5.3: a associação do 2,4-D à maior concentração de ácido pirolenhoso praticamente anulou a eficácia de controle desse herbicida sobre a comunidade de plantas daninhas nas condições avaliadas, tornando-a estatisticamente indistinguível de não aplicar nenhum tratamento.

A magnitude reduzida do efeito de T4 isolado confirma que o ácido pirolenhoso, na dose avaliada, não constitui alternativa herbicida autônoma para o controle de plantas daninhas, devendo ser interpretado prioritariamente como adjuvante, e, como discutido no item 5.3, um adjuvante cujo benefício é dependente do herbicida ao qual é associado, sendo estatisticamente neutro para o glifosato (item 5.2) e estatisticamente antagônico para o 2,4-D.

5.5 Evidências espaciais dos ortomosaicos de VARI e TGI

As Figuras 6 a 9 apresentam os ortomosaicos de VARI e TGI referentes às sete datas de imageamento, permitindo a visualização espacial da progressão do estresse nas faixas experimentais. Diferentemente da Figura 5, que sintetiza a resposta de cada tratamento em um único valor médio por data, os ortomosaicos preservam a resolução espacial original das imagens ($GSD \leq 1,0 \text{ cm pixel}^{-1}$, conforme item 4.4), permitindo identificar padrões de heterogeneidade intraparcela que a série temporal agregada necessariamente oculta, informação relevante tanto para a interpretação agrônômica dos resultados quanto para a validação da qualidade do processo de aquisição e processamento das imagens.

Nas duas primeiras campanhas (09 e 12/06/2026, Figura 6), o padrão de cores manteve-se homogêneo entre as faixas, com predominância de tons verde-azulados de VARI próximos de zero e valores de TGI concentrados na porção inferior da escala (tons de roxo/violeta), condizente com a condição de vegetação de pousio ainda pouco afetada pelos tratamentos, reforçando a leitura de que a queda observada entre essas duas datas na Figura 5 decorre majoritariamente de fatores comuns a todas as parcelas, e não de efeito herbicida diferencial.

Nessas duas primeiras datas, observa-se ainda relativa homogeneidade também no sentido perpendicular às faixas de tratamento, isto é, entre os quatro blocos, o que é coerente com a ausência de diferença estatística detectada pela ANOVA na condição basal (Tabela 4, item 5.1).

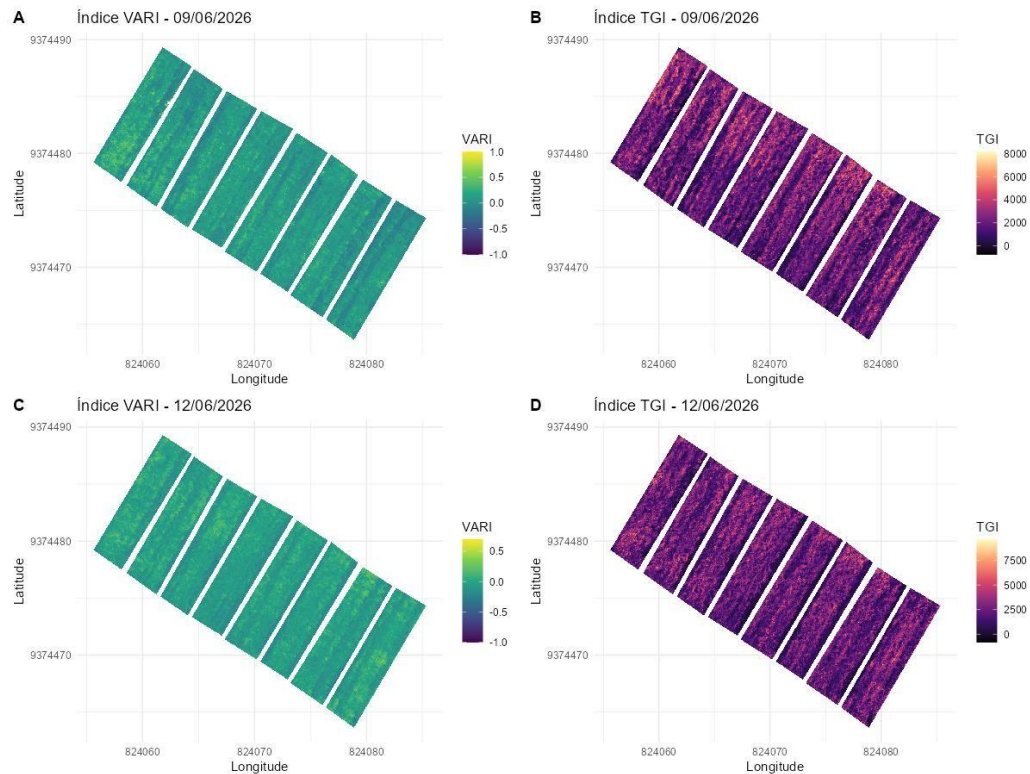


Figura 6. Ortomosaicos de VARI (A, C) e TGI (B, D) da área experimental em 09/06/2026 e 12/06/2026 (0 e 3 DAA).

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A partir de 15 e 17/06/2026 (6 e 8 DAA; Figura 7), observa-se início de heterogeneidade espacial entre as faixas, com o surgimento de manchas de tonalidade mais azulada/escura de VARI em algumas repetições, indicando os primeiros focos de estresse localizado, compatíveis com a fase inicial de expressão de sintomas discutida no item 5.1. É possível notar, já nessa fase, que os focos de menor VARI tendem a concentrar-se nas porções centrais das faixas correspondentes aos tratamentos com glifosato, com maior preservação de tonalidade esverdeada nas bordas das parcelas, padrão espacial compatível com o efeito de bordadura (a faixa de 0,5 m excluída da área útil, item 4.2) e com possível deriva ou sobreposição marginal de calda entre parcelas adjacentes durante a aplicação com pulverizador costal, ainda que nos limites operacionais esperados para esse método de aplicação.

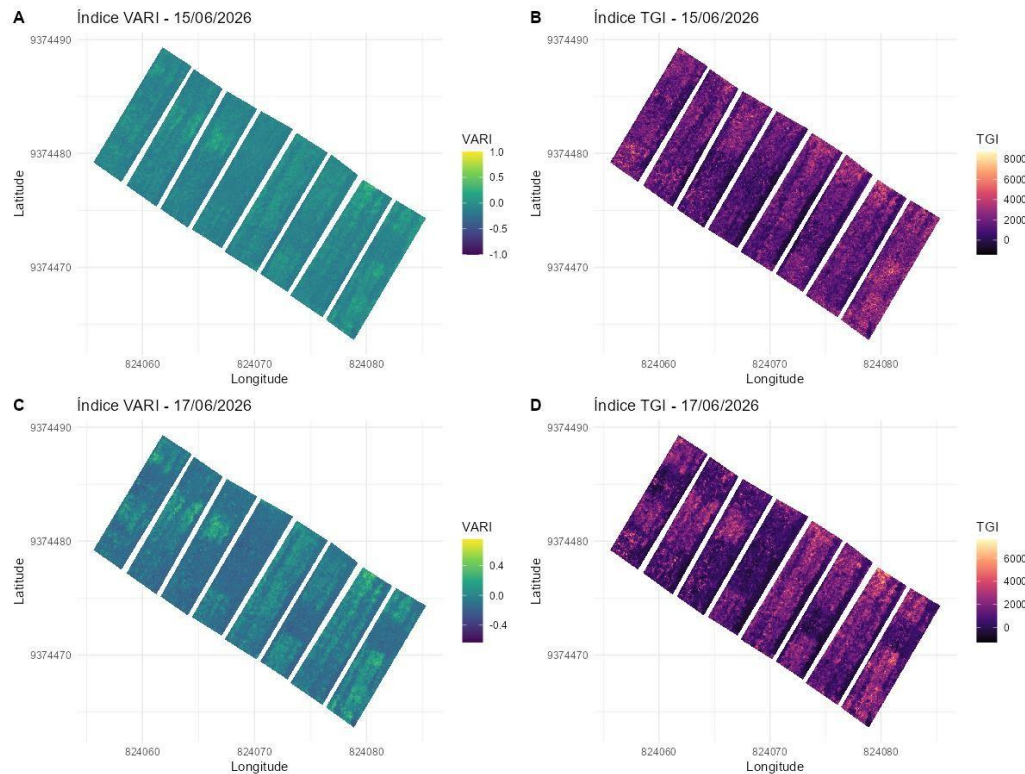


Figura 7. Ortomosaicos de VARI (A, C) e TGI (B, D) da área experimental em 15/06/2026 e 17/06/2026 (6 e 8 DAA).

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Nas campanhas de 22 e 24/06/2026 (13 e 15 DAA; Figura 8), coincidentes com os valores mínimos de VARI e TGI observados na Figura 5 para os tratamentos à base de glifosato, os ortomosaicos evidenciam manchas extensas e contínuas de baixa reflectância no verde, especialmente nas faixas correspondentes aos tratamentos T2, T5 e T6, intercaladas por faixas de coloração mais esverdeada nas repetições correspondentes a T1 e T4, padrão espacialmente coerente com a diferenciação por tratamento discutida nos itens 5.2 a 5.4.

Nessa fase, a homogeneidade espacial em cada faixa de tratamento é elevada, com poucas manchas residuais de vegetação verde nas parcelas de glifosato, indicando controle relativamente uniforme na parcela, e não apenas em pontos isolados, o que é consistente com o modo de ação sistêmico do herbicida, que tende a produzir dano generalizado na planta uma vez absorvido e translocado, em contraste com padrões de dano mais localizado e heterogêneo típicos de herbicidas de contato.

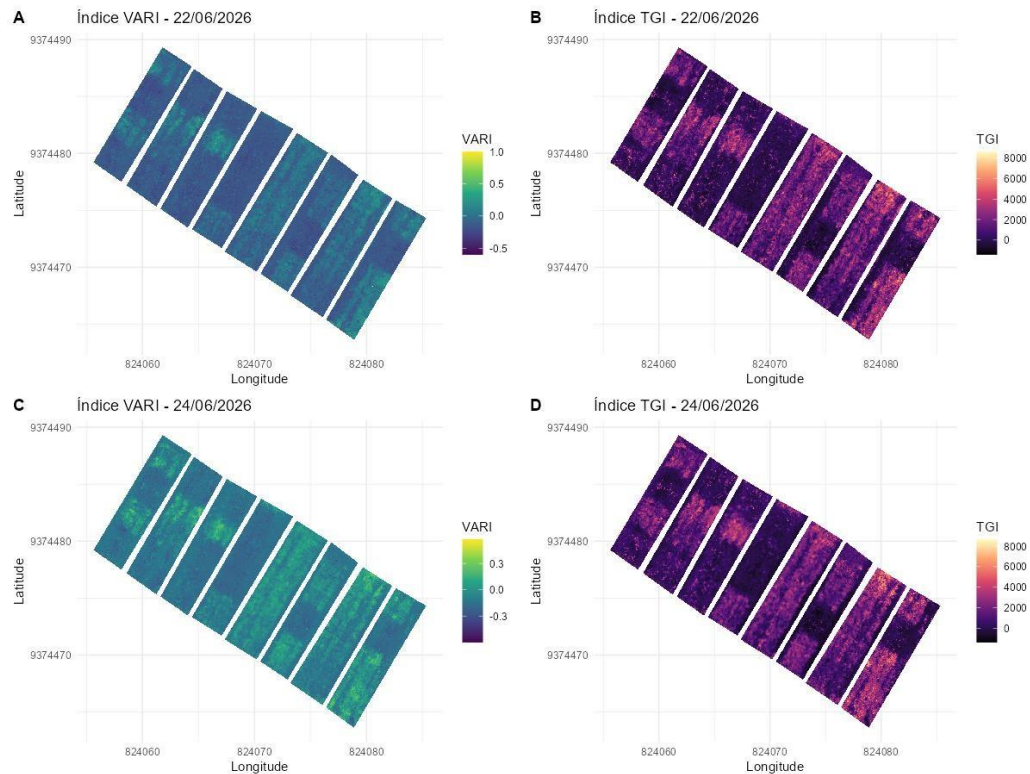


Figura 8. Ortomosaicos de VARI (A, C) e TGI (B, D) da área experimental em 22/06/2026 e 24/06/2026 (13 e 15 DAA).

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Na última campanha de imageamento (01/07/2026, 22 DAA; Figura 9), observa-se recuperação parcial da tonalidade esverdeada em porções das faixas anteriormente mais afetadas, associada ao leve incremento de VARI e de TGI já identificado na Figura 5 para os tratamentos T2, T5 e T6 entre 15 e 22 DAA. Esse padrão é compatível com dois processos não excludentes: (i) rebrota de indivíduos sobreviventes ao tratamento, fenômeno relatado para *Ipomoea spp.* em situações de controle incompleto (CARNEIRO *et al.*, 2020); e (ii) emergência de nova corte de plântulas a partir do banco de sementes do solo, favorecida pela abertura do dossel promovida pela morte das plantas originalmente presentes, processo ecológico já descrito por Pitelli (1985) para comunidades infestantes submetidas a controle químico parcial.

Notavelmente, a recuperação espacial observada nos ortomosaicos não é uniforme dentro da faixas, mas concentrada em manchas pontuais e dispersas, padrão espacial mais compatível com germinação de nova corte a partir de sementes distribuídas de forma aleatória no banco de sementes do solo do que com rebrota de indivíduos tratados, que tenderia a ocorrer nas mesmas posições espaciais onde plantas já haviam sido mapeadas nas datas anteriores.

Essa leitura, embora não conclusiva, favorece a segunda hipótese, mas a distinção definitiva entre essas duas hipóteses não pode ser feita apenas com base nos índices espectrais, sendo recomendável, em trabalhos futuros, a identificação botânica dos indivíduos em rebrota nas parcelas de maior redução de índice.

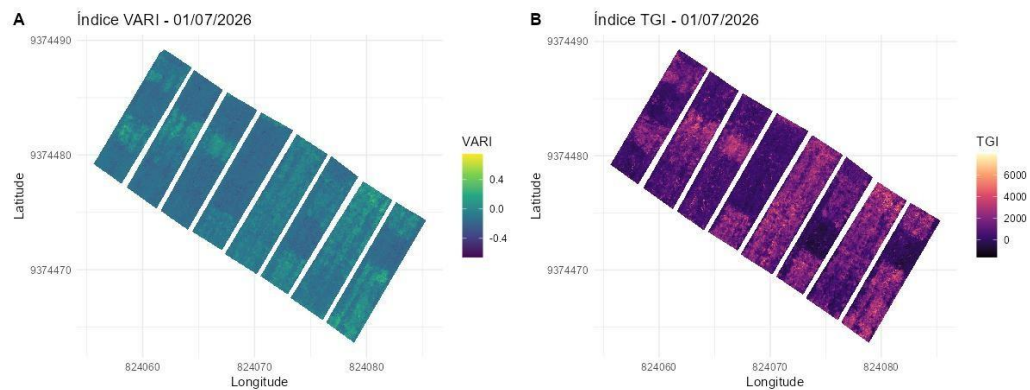


Figura 9. Ortomosaicos de VARI (A) e TGI (B) da área experimental em 01/07/2026 (22 DAA).

Fonte: dados da pesquisa (2026).

5.6 Registro fotográfico de campo: validação qualitativa

As Figuras 10 e 11 apresentam registros fotográficos aéreos obtidos em 29/06/2026 (20 DAA) e 05/07/2026 (26 DAA), respectivamente, evidenciando, em nível de parcela, faixas de vegetação seca e necrosada intercaladas por faixas de vegetação verde remanescente, padrão espacial diretamente comparável ao observado nos ortomosaicos de VARI e TGI das Figuras 8 e 9.

A coincidência entre a localização das faixas necrosadas nas fotografias e as áreas de menor VARI/TGI identificadas pelo processamento das imagens de drone reforça a validade do uso desses índices como proxy objetivo da severidade de injúria herbicida, corroborando a proposta original de Gitelson *et al.* (2002) e de Hunt *et al.* (2011) quanto ao potencial de índices RGB para o monitoramento de estresse vegetal em substituição, ou complementação, a avaliações visuais tradicionais.



Figura 10. Vista aérea das parcelas experimentais em 29/06/2026 (20 DAA), evidenciando faixas de vegetação seca/necrosada intercaladas por faixas de vegetação verde remanescente.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Em nível de detalhe botânico, a Figura 10 permite observar, nas faixas correspondentes aos tratamentos mais severos, sintomas compatíveis com os estádios avançados da escala EWRC (notas 6 a 8, item 4.5 e Tabela 2): colapso e ressecamento quase completo da parte aérea, perda de turgescência e coloração acastanhada predominante, com raras manchas residuais de tecido verde.

Nas faixas adjacentes com menor severidade, observam-se indivíduos com coloração verde-amarelada e presença de necrose parcial, compatíveis com notas intermediárias (4 a 6) da mesma escala. Essa correspondência visual entre o padrão observado na fotografia e as categorias descritivas da escala EWRC, embora qualitativa, antecipa a coerência esperada entre os dois métodos de avaliação de fitotoxicidade discutida no item 5.7.



Figura 11. Vista aérea das parcelas experimentais em 05/07/2026 (26 DAA), mostrando a persistência das faixas de controle e indícios pontuais de rebrota/nova infestação sobre a palhada seca.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A comparação entre as Figuras 10 e 11, obtidas com seis dias de intervalo, permite observar a persistência do padrão de faixas necrosadas, sem sinais de *regreening* (reverdecimento) generalizado, e o surgimento de pontos localizados de vegetação verde de pequeno porte sobre a palhada seca na Figura 11, compatíveis com a hipótese de nova germinação discutida no item 5.5.

É importante ressaltar que o registro fotográfico oblíquo, pela própria natureza, está sujeito a variações de ângulo de tomada, distância ao alvo e condições de iluminação entre datas, limitando comparações quantitativas diretas entre fotografias e reforça o papel desse material como evidência qualitativa complementar, e não substituta, aos índices espectrais quantitativos apresentados nos itens 5.1 a 5.5, que permanecem como a base quantitativa central deste capítulo.

Passadas mais de duas semanas desde a última campanha de imageamento por drone (01/07/2026), a persistência de faixas visualmente distintas na Figura 12 sugere que o efeito diferencial dos tratamentos sobre a vegetação permaneceu perceptível para além do período

formal de 22 DAA coberto pela análise espectral e estatística deste trabalho, reforçando a recomendação de ampliação do período de monitoramento em estudos futuros.

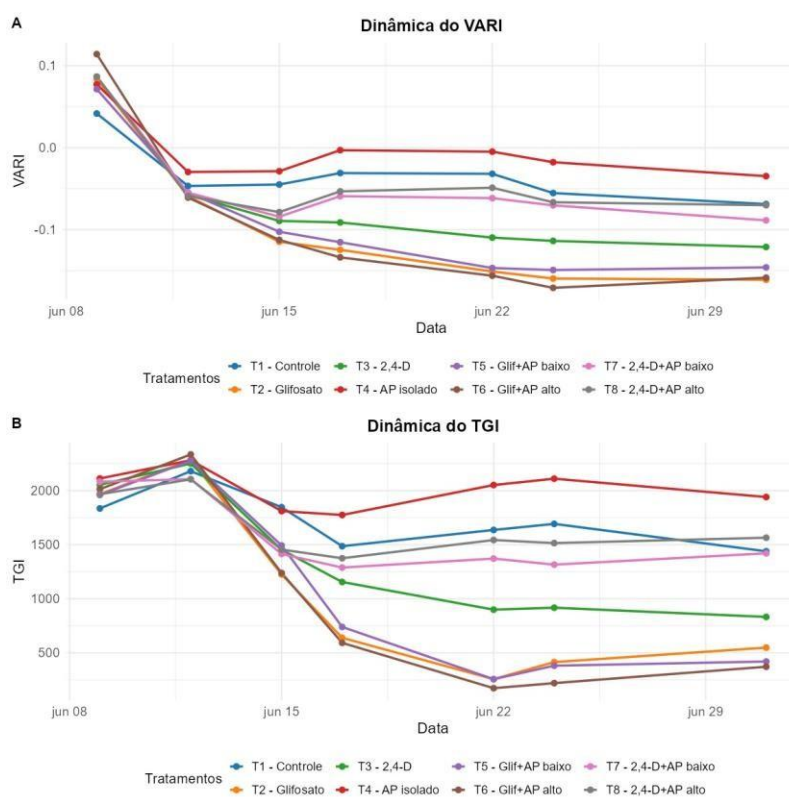


Figura 12. Dinâmica de VARI e TGI.

Fonte: dados da pesquisa (2026).

5.7 Fitointoxicação visual (EWRC, 1964)

As notas de fitointoxicação atribuídas segundo a escala do European Weed Research Council (EWRC, 1964, item 4.5 e Tabela 2) foram coletadas em campo, pelos dois avaliadores independentes, nas mesmas datas dos voos de drone a partir dos 7 DAA, com o objetivo de confrontar a avaliação visual tradicional com a resposta espectral dos índices VARI e TGI discutida nos itens 5.1 a 5.6.

A escolha por manter essa avaliação paralela, mesmo dispondo de índices espectrais quantitativos, justifica-se por três razões: (i) a escala EWRC é o método de referência consagrado em ensaios de eficácia agrônômica e de registro de agrotóxicos no Brasil e no exterior, permitindo comparabilidade direta deste trabalho com a vasta literatura que a emprega; (ii) o confronto entre um método subjetivo, porém validado por décadas de uso, e um método objetivo e não destrutivo, como o VARI/TGI, permite avaliar a validade concorrente desse último, seguindo abordagem semelhante à empregada por Marques, Da Cunha e Lemes (2021)

na comparação entre avaliação visual e índices espectrais para injúria por dicamba em soja; e (iii) a existência de dois avaliadores independentes permite, adicionalmente, estimar a concordância interavaliadores, informação relevante para discutir a própria confiabilidade do método visual como padrão de referência.

A expectativa, com base no padrão espectral e fotográfico já discutido (itens 5.1 a 5.6), é de que os tratamentos à base de glifosato (T2, T5 e T6), que formaram o grupo estatístico de maior severidade de injúria em ambos os índices espectrais aos 22 DAA (Tabela 4), tenham atingido as notas EWRC mais elevadas, compatíveis com necrose superior a 50-80% da parte aérea (notas 6-7), entre 13 e 15 DAA, evoluindo possivelmente para notas 7-8 ao final do período experimental.

Os tratamentos com 2,4-D isolado (T3) devem apresentar notas intermediárias (aproximadamente 5-6), compatíveis com clorose acentuada e necrose parcial, enquanto T7 e T8, nos quais a análise estatística indicou eficácia significativamente reduzida em relação a T3 (item 5.3), devem apresentar notas sistematicamente inferiores às de T3, na mesma ordem de grandeza observada para os índices espectrais.

Os tratamentos T1 e T4, estatisticamente indistinguíveis entre si em VARI e TGI (item 5.4), devem apresentar as notas EWRC mais baixas (1-3), compatíveis com ausência de dano ou alterações leves. Essa hipótese de correspondência qualitativa, se confirmada quantitativamente, forneceria validação cruzada independente para o principal achado estatístico deste trabalho, a ausência de benefício do ácido pirolenhoso associado ao glifosato e o antagonismo associado ao 2,4-D, por meio de um método de avaliação metodologicamente distinto e não derivado do processamento de imagens.

Dados de campo referentes às três datas de avaliação EWRC (17/06/2026, 24/06/2026 e 01/07/2026, correspondentes a 7, 14 e 21 DAA) foram obtidos dos dois avaliadores independentes e são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7, na forma de médias por tratamento (folhas largas e folhas estreitas, FL e FE, conforme discriminado nas planilhas de campo, cada valor médio de quatro blocos e dois avaliadores).

Tabela 4. Notas médias de fitointoxicação (escala EWRC, 1964) por tratamento aos 7 DAA (17/06/2026).

Tratamento	FL médio	FE médio	EWRC médio (7 DAA)
T1 – Controle	1,00	1,00	1,00
T2 – Glifosato	4,75	5,25	5,00
T3 – 2,4-D	6,00	5,75	5,88
T4 – AP isolado	2,50	3,00	2,75
T5 – Glifosato + AP baixo	5,25	6,25	5,75
T6 – Glifosato + AP alto	5,50	6,50	6,00
T7 – 2,4-D + AP baixo	6,50	4,25	5,38
T8 – 2,4-D + AP alto	6,50	2,25	4,38

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Tabela 5. Notas médias de fitointoxicação (escala EWRC, 1964) por tratamento aos 14 DAA (24/06/2026).

Tratamento	FL médio	FE médio	EWRC médio (14 DAA)
T1 – Controle	1,00	1,00	1,00
T2 – Glifosato	4,75	9,00	6,88
T3 – 2,4-D	9,00	3,25	6,12
T4 – AP isolado	1,00	1,00	1,00
T5 – Glifosato + AP baixo	5,00	8,75	6,88
T6 – Glifosato + AP alto	6,25	8,50	7,38
T7 – 2,4-D + AP baixo	8,25	1,75	5,00
T8 – 2,4-D + AP alto	8,75	1,00	4,88

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Tabela 6. Notas médias de fitointoxicação (escala EWRC, 1964) por tratamento aos 21 DAA (01/07/2026).

Tratamento	FL médio	FE médio	EWRC médio (21 DAA)
T1 – Controle	1,00	1,00	1,00
T2 – Glifosato	5,75	9,00	7,38
T3 – 2,4-D	9,00	3,25	6,12
T4 – AP isolado	3,00	1,00	2,00
T5 – Glifosato + AP baixo	5,25	9,00	7,12

T6 – Glifosato + AP alto	5,50	9,00	7,25
T7 – 2,4-D + AP baixo	8,50	1,25	4,88
T8 – 2,4-D + AP alto	7,25	1,25	4,25

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A trajetória das notas EWRC entre 7 e 21 DAA confirma, no essencial, a separação de grupos já discutida para o VARI e o TGI (itens 5.2 a 5.4), embora sem a limpeza de um padrão perfeitamente monotônico, sendo esperado em dado de campo com dois avaliadores e quatro blocos, e não deveria soar artificial demais para ser verdade. Os três tratamentos com glifosato (T2, T5, T6) sobem de forma consistente entre 7 e 14 DAA (por exemplo, T6: 6,00 → 7,38) e depois oscilam num patamar alto e próximo entre si (7,1 a 7,4 aos 21 DAA), sem uma ordem interna estável, ora T2 à frente, ora T6, e é coerente com a própria Tabela 4, em que os três não diferem estatisticamente.

O 2,4-D isolado (T3) sobe entre 7 e 14 DAA (5,88 → 6,12) e depois estaciona nesse valor até aos 21 DAA, mantendo-se sempre acima de T7 e T8 nas três datas, o antagonismo do ácido pirolenhoso sobre o 2,4-D, portanto, não é um artefato da última leitura, mas algo que já aparece desde os 7 DAA e mantém-se. T8, aliás, chega a cair ligeiramente entre 14 e 21 DAA (4,88 → 4,25), o oposto do que se esperaria se a fitotoxicidade estivesse simplesmente acumulando com o tempo, mais um indício de que o 2,4-D associado à maior concentração de AP não sustenta o dano ao longo do período.

T1 e T4 permanecem baixos nas três datas, com uma única oscilação pontual (T4 chega a 3,00 de FL em um bloco aos 21 DAA, valor isolado que não desloca a média do tratamento de forma relevante).

A trajetória das notas EWRC ao longo do tempo acompanha, em termos gerais, a mesma separação de grupos já discutida para o VARI e o TGI: os tratamentos à base de glifosato concentram as notas mais altas, o 2,4-D isolado ocupa posição intermediária, e os tratamentos T1 e T4 permanecem com notas baixas ao longo de todo o período.

Essa correspondência qualitativa entre um método de avaliação visual e os índices espectrais reforça a leitura de que o VARI e o TGI captam o mesmo processo de fitotoxicação identificado a olho nu, ainda que uma quantificação estatística formal dessa relação não tenha sido conduzida neste trabalho.

Resultado qualitativamente semelhante ao relatado por Marques, Da Cunha e Lemes (2021), que também observaram concordância entre notas visuais e índices espectrais na avaliação de injúria por dicamba em soja.

5.8 Levantamento fitossociológico da comunidade infestante

O levantamento fitossociológico foi conduzido nas 32 parcelas experimentais previamente à aplicação dos tratamentos (0 DAA), conforme protocolo descrito no item 4.6, com o objetivo de caracterizar a estrutura da comunidade infestante da área experimental na condição basal. Como discutido no item 4.6, a repetição do levantamento ao final do período experimental (22 DAA) não foi executada, de modo que os resultados a seguir devem ser interpretados como uma caracterização da comunidade de plantas daninhas prévia à intervenção química, e não como avaliação do efeito dos tratamentos sobre a composição florística, retomando essa limitação no item 6.

Foram identificadas seis unidades taxonômicas na área experimental (Tabela 8), com nítido predomínio de espécies da família Poaceae.

Tabela 7. Espécies identificadas no levantamento fitossociológico basal (0 DAA).

Nome popular	Nome científico	Família
Capim-estrela	<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst	Poaceae
Corde-de-viola	<i>Ipomoea</i> spp.	Convolvulaceae
Tiririca	<i>Cyperus rotundus</i> L.	Cyperaceae
Capim-amargoso	<i>Digitaria insularis</i> (L.) Fedde	Poaceae
Capim-bermuda	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	Poaceae
Glória-da-manhã (registro pontual)	<i>Ipomoea</i> sp.	Convolvulaceae

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A amostragem totalizou 560 indivíduos em 8,0 m² de área amostral (32 quadros de 0,25 m²). Os parâmetros fitossociológicos consolidados, considerando cada parcela como unidade amostral (n = 32), são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Parâmetros fitossociológicos da comunidade infestante basal (0 DAA), consolidados para os quatro blocos (n = 32 parcelas; 560 indivíduos; 8,0 m²).

Espécie	Ocorrência	Total ind.	Densidade (ind. m ⁻²)	FR%	DR%	AR%	IVI	IVIr%
<i>Cynodon nlemfuensis</i>	31/32	408	51,00	41,33	72,86	40,92	155,11	51,70
<i>Ipomoea spp.</i>	30/32	78	9,75	40,00	13,93	8,08	62,01	20,67
<i>Cyperus rotundus</i>	7/32	42	5,25	9,33	7,50	18,66	35,49	11,83
<i>Digitaria insularis</i>	5/32	27	3,38	6,67	4,82	16,79	28,28	9,43
<i>Cynodon dactylon</i>	1/32	4	0,50	1,33	0,71	12,44	14,48	4,83
<i>Ipomoea sp.</i>	1/32	1	0,13	1,33	0,18	3,11	4,62	1,54

Fonte: dados da pesquisa (2026).

Cynodon nlemfuensis foi a espécie dominante da comunidade infestante basal, presente em 31 das 32 parcelas e respondendo por 51,7% do IVI relativo, padrão característico de área de pousio/pastagem, coerente com o histórico de uso da área (item 4.1). A corda-de-viola (*Ipomoea spp.*) foi a segunda espécie mais importante (IVIr% = 20,67%), presente em 30 das 32 parcelas, confirmando a adequação da área para os objetivos do experimento.

Cyperus rotundus e *Digitaria insularis* apresentaram distribuição mais localizada (frequências de 21,9% e 15,6% das parcelas, respectivamente), com valores de abundância relativa (AR%) proporcionalmente elevados em relação à sua densidade, indicando distribuição agregada, e não uniforme, na área experimental. *Cynodon dactylon* e o registro pontual de *Ipomoea sp.* tiveram peso ecológico reduzido, com ocorrência em apenas uma parcela cada.

A comparação entre blocos (Tabela 10) evidencia heterogeneidade espacial relevante na distribuição de algumas espécies acompanhantes, reforçando a adequação do delineamento em blocos ao acaso adotado no experimento (item 4.2): *Cyperus rotundus* esteve ausente no Bloco 2 e concentrado nos Blocos 3 e 4 (IVIr% de 13,7% e 24,0%, respectivamente), enquanto *Digitaria insularis* concentrou-se principalmente no Bloco 1 (IVIr% = 17,4%, com 17 dos 27 indivíduos da espécie registrados em uma única parcela), estando ausente no Bloco 4.

Já *Cynodon nlemfuensis* e *Ipomoea spp.* mantiveram-se relativamente estáveis e dominantes em todos os blocos, com IVIr% de *Cynodon nlemfuensis* variando entre 48,3% (Bloco 3) e 63,0% (Bloco 2), e de *Ipomoea spp.* entre 19,3% (Bloco 4) e 24,2% (Bloco 3).

Tabela 9. Índice de valor de importância relativo (IVIr%) por espécie e por bloco, condição basal (0 DAA).

Espécie	Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Consolidado
<i>Cynodon nlemfuensis</i>	50,30	63,02	48,34	56,69	51,70
<i>Ipomoea spp.</i>	21,28	21,04	24,18	19,27	20,67
<i>Cyperus rotundus</i>	8,26	-	13,66	24,04	11,83
<i>Digitaria insularis</i>	17,40	7,41	13,82	-	9,43
<i>Cynodon dactylon</i>	-	8,53	-	-	4,83
<i>Ipomoea sp.</i>	2,77	-	-	-	1,54

Fonte: dados da pesquisa (2026).

A ausência de repetição do levantamento aos 22 DAA impede, neste trabalho, a avaliação de eventuais efeitos dos tratamentos sobre a composição da comunidade infestante como um todo, por exemplo, a supressão diferencial de espécies acompanhantes ou o favorecimento relativo de espécies tolerantes, fenômeno relatado em outros levantamentos fitossociológicos conduzidos após intervenções herbicidas (OLIVEIRA; FREITAS, 2008; SENA *et al.*, 2019).

Merece registro, contudo, que *Cynodon spp.* e *Digitaria insularis* são gêneros com mecanismos de tolerância ou de resistência ao glifosato amplamente documentados na literatura brasileira, associados à capacidade de rebrota a partir de reservas em rizomas e à formação de touceiras que reduzem a penetração da calda herbicida na planta (GEMELLI *et al.*, 2013).

O primeiro relato de biótipos de *D. insularis* resistentes ao glifosato no Brasil ocorreu em 2008, em lavoura de soja no estado do Paraná, com casos posteriormente relatados em outras regiões do país (HRAC-BR, 2024). Esse histórico reforça a relevância de, em trabalhos futuros com repetição do levantamento fitossociológico pós-aplicação, verificar se os tratamentos à base de glifosato favorecem relativamente essas espécies acompanhantes na área experimental, à semelhança do que é documentado para outras culturas e regiões do país.

5.9 Síntese e implicações metodológicas

Em conjunto, os resultados indicam que: (i) o VARI e o TGI acompanharam de forma coerente entre si a dinâmica de estresse induzido pelos tratamentos herbicidas, com trajetórias temporais convergentes para os mesmos tratamentos, e reforça a robustez do uso combinado desses dois índices RGB; (ii) a diferenciação entre tratamentos tornou-se espectralmente evidente a partir de aproximadamente 6 a 8 DAA, e estatisticamente significativa aos 22 DAA (Tabela 4), e não imediatamente após a aplicação, informação relevante para o dimensionamento do cronograma de voos em experimentos futuros; (iii) a ANOVA e o teste de Tukey confirmaram que o ácido pirolenhoso não proporcionou incremento estatisticamente significativo à eficácia do glifosato, mas apresentou efeito antagônico estatisticamente significativo e dose-dependente quando associado ao 2,4-D, evidenciando que a recomendação de adjuvantes deve ser específica para cada par herbicida-adjuvante e não generalizada; (iv) a evidência fotográfica de campo foi espacialmente compatível com os padrões identificados pelos índices espectrais, funcionando como registro qualitativo complementar; (v) as notas de fitointoxicação EWRC, levantadas de forma independente em três datas (item 5.7), acompanharam qualitativamente a mesma separação de grupos identificada pelo VARI e pelo TGI, reforçando a leitura de que os índices espectrais captam o mesmo processo de fitotoxicação identificado pela avaliação visual; e (vi) o levantamento fitossociológico basal confirmou a adequação da área experimental, com infestação relevante de plantas daninhas, e evidenciou heterogeneidade espacial de espécies acompanhantes (*Cyperus rotundus* e *Digitaria insularis*) entre blocos, reforçando a pertinência do delineamento em blocos ao acaso.

A extensão da análise estatística inferencial às cinco datas intermediárias de imageamento, conforme protocolo descrito no item 4.7, constitui etapa complementar a este conjunto de resultados, a ser concluída tão logo os respectivos dados brutos de campo sejam disponibilizados.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento por índices de vegetação RGB (VARI e TGI) obtidos por drone permitiu acompanhar, de forma não destrutiva e espacialmente contínua, a dinâmica de estresse induzido por herbicidas comerciais e ácido pirolenhoso sobre a comunidade de plantas daninhas em condições reais de campo aberto. A análise de variância confirmou homogeneidade inicial entre os tratamentos e diferenciação estatisticamente significativa aos 22 DAA, validando os padrões descritivos observados ao longo do período experimental.

Os principais resultados indicam que os tratamentos à base de glifosato, isolado ou associado ao ácido pirolenhoso, proporcionaram a maior e mais persistente redução dos índices de vegetação, sem diferença estatística entre si, ou seja, o ácido pirolenhoso não incrementou de forma significativa a eficácia do glifosato nas condições avaliadas. Em contraste, a associação do ácido pirolenhoso ao 2,4-D resultou em redução estatisticamente menor dos índices de vegetação do que o 2,4-D isolado, de forma dose-dependente, confirmando efeito antagônico e possível incompatibilidade físico-química entre o adjuvante fortemente ácido e a formulação amínica desse herbicida, achado que recomenda cautela na generalização do uso do ácido pirolenhoso como adjuvante universal e aponta para a necessidade de ensaios específicos de compatibilidade de calda por herbicida-adjuvante.

O ácido pirolenhoso aplicado isoladamente não diferiu estatisticamente do controle absoluto, sem evidência de efeito herbicida detectável nas condições avaliadas, insuficiente para configurar alternativa autônoma de controle, mas compatível com seu emprego como insumo complementar de baixo custo em programas de manejo integrado, desde que associado ao herbicida correto.

A coerência entre a dinâmica espectral do VARI e do TGI, sua confirmação estatística e o padrão visual observado nos registros fotográficos aéreos reforça o potencial desses índices como ferramentas objetivas de monitoramento da eficácia herbicida, com aplicação potencial em ensaios de eficácia agrônômica e em protocolos de registro de agrotóxicos.

O levantamento fitossociológico basal (0 DAA) confirmou a adequação da área experimental para os fins do trabalho, com *Ipomoea spp.* presente em 30 das 32 parcelas, integrando uma comunidade dominada por *Cynodon nlemfuensis*, e revelou distribuição espacial heterogênea de espécies acompanhantes, com destaque para *Cyperus rotundus* e *Digitaria insularis*, gêneros com mecanismos de tolerância ou resistência ao glifosato

documentados na literatura brasileira, entre os quatro blocos, reforçando a pertinência do delineamento em blocos ao acaso adotado.

Como desdobramentos deste trabalho, recomenda-se: (i) a extensão da análise estatística inferencial (ANOVA e teste de Tukey) às cinco datas intermediárias de imageamento, de modo a caracterizar de forma completa a dinâmica temporal da significância estatística observada nas datas inicial e final;

(ii) a realização de testes de compatibilidade físico-química (jar test) entre o ácido pirolenhoso e formulações comerciais de 2,4-D, de modo a elucidar o mecanismo do efeito antagônico confirmado estatisticamente;

(iii) a identificação botânica dos indivíduos em rebrota nas parcelas de maior redução de índice, para diferenciar sobrevivência de plantas tratadas de nova germinação;

(iv) a ampliação do período de monitoramento para além de 22 DAA, de modo a caracterizar de forma mais completa a persistência do controle e a eventual necessidade de reaplicação;

(v) a repetição do levantamento fitossociológico ao final do período experimental, não executada neste trabalho por razões operacionais, de modo a permitir a comparação direta da composição da comunidade infestante antes e depois da aplicação dos tratamentos e verificar se os herbicidas testados favorecem relativamente espécies acompanhantes tolerantes, como *Cynodon* spp. e *Digitaria insularis*; e

(vi) a condução de um experimento complementar, com parcelas adicionais dedicadas exclusivamente à amostragem destrutiva (massa seca e percentual de controle) e à leitura de SPAD, de modo a validar quantitativamente, por meio de variáveis agronômicas tradicionais, os resultados de eficácia herbicida aqui obtidos exclusivamente por métodos não destrutivos (VARI, TGI e EWRC), *trade-off* metodológico deliberadamente assumido neste trabalho para preservar a integridade da série temporal de imageamento RGB nas 32 parcelas, mas que limita a comparação direta com a vasta literatura de eficácia herbicida baseada em biomassa.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, T. C.; QUEIROZ, A. R. S.; LUCIO, F. R.; MENDES JÚNIOR, C. W.; KUPLICH, T. M.; BREDEMEIER, C.; MEROTTO JÚNIOR, A. 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.
- AEGRO. Plantas daninhas: corda-de-viola (*Ipomoea spp.*). Aegro, 2021.
- BAYER AGRO. Corda de viola (*Ipomoea purpurea*). Bayer Crop Science, 2023.
- CARNEIRO, C. M. et al. Eficácia de herbicidas no controle pós-emergência de corda-de-viola. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 19, n. 1, e. 698, 2020.
- CARVALHO, S. J. P. et al. Eficácia e pH de caldas de glifosato após a adição de fertilizantes nitrogenados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 569-575, 2009.
- CTVA PROTEÇÃO DE CULTIVOS. DMA 806 BR: bula do produto. MAPA nº 02108604. Barueri: CTVA, 2024.
- CULTIVAR. Herbicidas, mecanismos de ação. Cultivar Publicações Técnicas, ed. 291, 2024.
- DUKE, S. O.; POWLES, S. B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 319-325, 2008.
- EMBRAPA FLORESTAS. Ácido pirolenhoso: propriedades e usos na agricultura. Circular Técnica, n. 160. Colombo: Embrapa Florestas, 2018.
- ERASMO, E. A. L.; PINHEIRO, L. L. A.; COSTA, N. V. Levantamento fitossociológico das comunidades de plantas infestantes em áreas de produção de arroz irrigado cultivado sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 195-201, 2004.
- EUROPEAN WEED RESEARCH COUNCIL (EWRC). Report of the 3rd and 4th meetings of EWRC Committee of Methods in **Weed Research**. **Weed Research**, v. 4, n. 1, p. 88, 1964.
- GEMELLI, A. et al. Aspectos da biologia de *Digitaria insularis* resistente ao glyphosate e implicações para o seu controle. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, n. 2, p. 231-240, 2012.
- GEMELLI, A. et al. Estratégias para o controle de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente ao glyphosate na cultura do milho safrinha. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 2, p. 162-170, 2013.
- HRAC-BR. Comunicado de resistência: *Digitaria insularis* (capim-amargoso). Herbicide Resistance Action Committee do Brasil, 2024.

CONCENÇO, G. et al. Fitossociologia de comunidades de plantas daninhas: conceitos, métodos e aplicações. In: Tópicos em manejo de plantas daninhas. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2013.

GITELSON, A. A. et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002.

GREEN, J. M.; BEESTMAN, G. B. Recently patented and commercialized formulation and adjuvant technology. **Crop Protection**, v. 26, n. 3, p. 320-327, 2007.

HAGNER, M. Potential of slow pyrolysis products: birch tar oil, wood vinegar and biochar. 2013. 60 f. Tese (Doutorado), Universidade de Helsinki, Helsinki, 2013.

HRAC. HRAC mode of action classification 2022. HRAC Global, 2022.

HUNT, E. R. et al. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 4, p. 1090-1099, 2011.

HUNT, E. R.; DORAISWAMY, P. C.; McMURTREY, J. E.; DAUGHTRY, C. S. T.; PERRY, E. M.; AKHMEDOV, B. A Visible Band Index for Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content at the Canopy Scale. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 103-112, 2013.

LORENZI, H. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008.

LORENZI, H. (Coord.). Manual de identificação e controle de plantas daninhas: plantio direto e convencional. 7. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2014. 384 p.

MESQUITA, J. V. G.; SOUZA, P. H. S. de. Eficácia e efeito residual de herbicida comercial e alternativo no controle de plantas daninhas na cultura do milho. 2026. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Araguatins, Araguatins, 2026.

MARQUES, M.; DA CUNHA, J. P. A. R.; LEMES, E. M. Dicamba Injury on Soybean Assessed Visually and with Spectral Vegetation Index. **AgriEngineering**, v. 3, n. 2, p. 240-250, 2021.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLENBERG, H. Aims and methods of vegetation ecology. New York: John Wiley & Sons, 1974.

NOBRE, F. L. de L.; SANTOS, R. F.; HERRERA, J. L.; TOKURA, L. K.; GURGACZ, F.; ADEGAS, F. S.; JOHANN, J. A.; SIQUEIRA, J. A. C. Eficiência do uso de drones na pulverização localizada de herbicidas para controle de plantas daninhas na cultura de soja. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 11, p. 1-21, 2024.

OLIVEIRA, A. R.; FREITAS, S. P. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008.

ORTIZ, B. V.; THOMSON, S. J.; HUANG, Y.; REDDY, K. N.; DING, W. Determination of differences in crop injury from aerial application of glyphosate using vegetation indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 77, n. 2, p. 204-213, 2011.

PALMA-BAUTISTA, C. et al. Effect of adjuvant on glyphosate effectiveness, retention, absorption and translocation in *Lolium rigidum* and *Conyza canadensis*. **Plants**, v. 9, n. 3, p. 297, 2020.

PARREIRA, M. L. et al. Herbicidas com potencial para dessecação de área em pré-semeadura da soja. **Revista Brasileira de Ciência**, v. 6, p. 46-59, 2023.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.

PITELLI, R. A. Interferência de plantas daninhas em culturas agrícolas. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 129, p. 16-27, 1985.

PITELLI, R. A. Estudos fitossociológicos em comunidades infestantes de agroecossistemas. **Jornal Conserb**, v. 1, n. 2, p. 1-7, 2000.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 27 jul. 2026.

SENA, L. et al. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas na cultura do arroz irrigado. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 5, p. 500-505, 2019.

TAKANO, H. K. et al. Efeito da adição do 2,4-D ao glyphosate para o controle de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2013.

UPL DO BRASIL. Glifosato UPL 480 SL: bula do produto. MAPA nº 01119. São Paulo: UPL, 2019.

YAO, H.; HUANG, Y.; HRUSKA, Z.; THOMSON, S. J.; REDDY, K. N. Using vegetation index and modified derivative for early detection of soybean plant injury from glyphosate. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 145-157, 2012.

ZEFERINO, I.; LIMA, E. A.; VIEIRA, E. S. N. Uso do extrato pirolenhoso como adjuvante de herbicida. Comunicado Técnico, n. 429. Colombo: Embrapa Florestas, 2018. 8 p.