

HELEN MAILA GABE WOIAND

**CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E
GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE
Eleusine indica E *Borreria spinosa***

Botucatu

2026

HELEN MAILA GABE WOIAND

**CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E
GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE
Eleusine indica E *Borreria spinosa***

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

Orientador: Caio Antonio Carbonari

Coorientador(a): Fernanda Satie Ikeda

Botucatu

2026

W847c Woiland, Helen Maila Gabe
Caracterização fisiológica da interação entre mesotrione e
glufosinate de amônio no controle de Eleusine indica e Borreria
spinosa / Helen Maila Gabe Woiland. -- Botucatu, 2026
107 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Caio Antonio Carbonari
Coorientadora: Fernanda Satie Ikeda

1. Borreria spinosa. 2. Eleusine indica. 3. glufosinate de
amônio. 4. interação. 5. mesotrione. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E GLUFOSINATO DE AMÔNIO NO CONTROLE DE Eleusine indica E Borreria spinosa

AUTORA: HELEN MAILA GABE WOIAND

ORIENTADOR: CAIO ANTONIO CARBONARI

COORIENTADORA: FERNANDA SATIE IKEDA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia (Agricultura),
pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI (Participação Presencial)
Diretoria / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Pesquisador Dr. GILMAR JOSÉ PICOLI JÚNIOR (Participação Presencial)
Departamento de Ciências Regulatórias / Bayer Crop Science do Brasil

Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI (Participação Presencial)
Departamento de Proteção Vegetal / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA

Botucatu, 14 de julho de 2026.

Aos meus queridos pais e irmão,

Edson, Clair e Emerson,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelas oportunidades, bençãos e por toda força e coragem concedida durante esse período para enfrentar os desafios.

Aos meus familiares, especialmente aos meus queridos pais, Edson Woian e Clair Gabe Woian, ao meu irmão Emerson Gabe Woian e ao meu namorado Tiago Gimenes Izidro, por todo suporte e apoio incondicional.

Ao meu orientador Prof. Dr. Caio Antonio Carbonari pela confiança, orientação, paciência e pelos conhecimentos transmitidos durante esse período.

Ao Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini pelas contribuições e pelos conhecimentos transmitidos.

À minha coorientadora Fernanda Satie Ikeda pela disponibilidade e disposição em me coorientar, pelos conselhos e conhecimentos transmitidos.

À Dra. Ivana Paula Ferraz Santos pelas valiosas contribuições, paciência e auxílio na condução desses experimentos e por todo os conhecimentos transmitidos. À Dra. Ana Karollyna Alves de Matos pelas contribuições, conselhos, apoio e conhecimentos transmitidos.

Às colegas de laboratório que sempre estiveram à disposição e me auxiliaram na condução dos experimentos e pelos momentos alegres: Aleixa de Jesus Silva, Júlia Meira de Almeida Guimarães, Giulia Pazetti Bozzo, Monique Macedo Alves, Stephanie Caroline de Melo Ferst, Stéphanie Patel e Vitória Carolina Dantas Alves.

E aos demais colegas do laboratório, mestrandos, doutorandos, pós doutorandos e técnicos pela ajuda e conhecimentos compartilhados.

Ao Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM) pela estrutura e suporte durante a condução dos experimentos.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA-UNESP/ Botucatu) e ao Programa em Pós-graduação em Agronomia (Agricultura), pela oportunidade

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

À todos que me apoiaram e auxiliaram de forma direta ou indireta.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

O uso intensivo de herbicidas, principalmente, o glyphosate selecionou biótipos de plantas daninhas resistentes, como o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*) e aumentou a frequência de espécies tolerantes, como a vassourinha-de-botão (*Borreria spinosa*), as quais têm reduzido a produtividade das culturas e aumentado os custos de produção. Assim, torna-se necessário o uso de diferentes estratégias para o manejo dessas espécies, visando principalmente ampliar o espectro de controle, como a mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a interação da mistura de mesotrione e glufosinate de amônio na eficácia de controle e os efeitos na atividade fotossintética em *Eleusine indica* resistente ao glyphosate e *Borreria spinosa*. Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Para avaliar a eficácia de controle realizaram-se quatro curvas de dose-resposta, sendo as doses: 0, 50, 100, 200, 400 e 800 g i.a. ha⁻¹ dos herbicidas glufosinate de amônio e mesotrione isolados e combinados com 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione ou de glufosinate. Além disso, para avaliar a interação da mistura sobre a atividade fotossintética, um segundo ensaio foi conduzido em esquema fatorial 3x3, sendo os fatores doses de mesotrione e de glufosinate (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹). Os parâmetros avaliados foram: controle visual aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA), por meio de escala de notas de 0 a 100%; massa fresca da parte aérea aos 28 DAA; taxa de transporte de elétrons às 3, 6, 24, 48, 120 e 168 horas após a aplicação (HAA); teor de clorofila e carotenoides aos 3 e 7 DAA; taxa fotossintética aos 2, 5 e 7 DAA e conteúdo de amônia aos 1, 3 e 7 DAA. Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Avaliou-se a interação das misturas comparando-se os valores observados de controle e massa fresca da parte aérea com os valores estimados pela equação de Colby. Observaram-se interações sinérgicas e aditivas das misturas para *Eleusine indica* e aditivas e antagônica para *Borreria spinosa*. Em ambas as espécies os herbicidas isolados e em mistura reduziram os teores de clorofila *a*, *b*, total e carotenoides, assim como interferiram na fotossíntese, na redução da taxa de transporte de elétrons e na taxa de assimilação líquida de CO₂. Conclui-se que a interação das misturas é predominantemente aditiva e essa interação depende da dose utilizada e da espécie.

Assim, a mistura de mesotrione e glufosinate de amônio se mostra como uma estratégia promissora no manejo de *Eleusine indica* resistente e de *Borreria spinosa*.

Palavras-chave: *Borreria spinosa*; *Eleusine indica*; glufosinate de amônio; interação; mesotrione.

ABSTRACT

The intensive use of herbicides, particularly glyphosate, has selected resistant weed biotypes, such as goosegrass (*Eleusine indica*), and increased the prevalence of tolerant species, such as buttonweed (*Borreria spinosa*), thereby reducing crop productivity and increasing production costs. Therefore, the adoption of different management strategies is required to control these species, particularly those aimed at broadening the weed control spectrum, such as herbicide tank mixtures with different mode of action. In this context, the objective of this study was to evaluate the effects of the tank mixture of mesotrione and ammonium glufosinate on weed control efficacy and photosynthetic activity in glyphosate-resistant *Eleusine indica* and *Borreria spinosa*. The experiments were conducted under greenhouse conditions using a completely randomized design with four replications. Weed control efficacy was assessed through four curve dose–response experiments using herbicide rates of: 0, 50, 100, 200, 400, and 800 g a.i. ha⁻¹ of ammonium glufosinate and mesotrione, applied alone or mixtured with 100 g a.i. ha⁻¹ of mesotrione or ammonium glufosinate. Additionally, to evaluate the interaction of the herbicide mixture on photosynthetic activity, a second experiment was conducted in a 3 x 3 factorial arrangement, with mesotrione and ammonium glufosinate rates (0, 100, and 200 g a.i. ha⁻¹) as the factors. The evaluated parameters included visual weed control at 3, 7, 14, 21, and 28 days after application (DAA), using a 0–100% rating scale; fresh biomass at 28 DAA; electron transport rate at 3, 6, 24, 48, 120, and 168 hours after application (HAA); chlorophyll and carotenoid contents at 3 and 7 DAA; net photosynthetic rate at 2, 5, and 7 DAA; and ammonia content at 1, 3, and 7 DAA. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using the *t*-test ($p < 0.05$). Herbicide interactions were evaluated by comparing the observed values for weed control and fresh biomass with the expected values estimated using Colby's equation. Synergistic and additive interactions were observed for *Eleusine indica*, whereas additive and antagonistic interactions were detected for *Borreria spinosa*. In both species, herbicides applied alone or in combination reduced chlorophyll *a*, *b*, total and carotenoid contents, while also affecting photosynthesis by reducing the electron transport rate and net CO₂ assimilation rate. In conclusion, herbicide interactions are predominantly additive, although the type of interaction depended on herbicide rate and weed specie. Therefore, the tank mixture of mesotrione and ammonium

glufosinate prove to be a promising strategy for the management glyphosate-resistant *Eleusine indica* and *Borreria spinosa*.

Keywords: *Borreria spinosa*; *Eleusine indica*; ammonium glufosinate; interaction; mesotrione.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE <i>Eleusine indica</i>.....	21
1.1 INTRODUÇÃO.....	23
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
1.2.1 Experimento 1: Eficácia de controle.....	26
1.2.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia.....	28
1.2.3 Análise estatística.....	32
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
1.3.1 Experimento 1: Eficácia de controle.....	33
1.3.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia.....	40
1.4 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS.....	55
CAPÍTULO 2 - EFEITO DA MISTURA DE MESOTRIONE E GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE <i>Borreria spinosa</i> (CHAM. &SCHLTDL.).....	62
2.1 INTRODUÇÃO.....	64
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	67
2.2.1 Experimento 1: Eficácia de controle.....	67
2.2.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia.....	70
1.2.3 Análise estatística	73
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
2.3.1 Eficácia de controle.....	75
2.3.2 Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia.....	81
2.4 CONCLUSÕES.....	94
REFERÊNCIAS.....	95
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102

REFERÊNCIAS.....103

INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas produtivos agrícolas têm sofrido grandes perdas nas últimas décadas devido à redução de produtividade das culturas e ao aumento dos custos de produção. Essas perdas decorrem da dificuldade de controle de espécies de plantas daninhas, principalmente quando são resistentes aos herbicidas. O uso intensivo de herbicidas, principalmente o glyphosate, contribuiu para a seleção de populações de plantas daninhas resistentes e de difícil controle, além de aumentar a frequência de espécies tolerantes a esse herbicida. Nesse cenário, o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*) e a vassourinha-de-botão (*Borreria spinosa*) têm-se destacado devido ao aumento dos relatos de falhas de controle e da frequência dessas espécies nas principais culturas, como soja, algodão e milho.

O capim-pé-de-galinha é considerado uma das principais infestantes nas áreas agrícolas. Essa espécie possui alta prolificidade, rápido crescimento e bom desenvolvimento radicular. Essas características conferem alta capacidade competitiva e adaptativa a diferentes ambientes (Kissmann; Groth, 2000; Takano *et al.*, 2016) em relação às culturas. A presença dessa espécie tem resultado em perdas significativas em culturas de interesse econômico, com perdas de 35% a 67% para a soja e até 48% para o milho (Rudell *et al.*, 2021; Caldas *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2024), sendo essas perdas variáveis de acordo com o nível de infestação e também da disponibilidade dos recursos do meio.

A relevância dessa espécie tem aumentado nas últimas décadas, em virtude do aumento de relatos de resistência aos herbicidas. No Brasil, foram relatados casos de resistência ao glyphosate e aos inibidores de ACCase e inclusive de resistência múltipla (mais de um mecanismo de ação) a ambos os mecanismos de ação (Heap, 2026). Esse cenário aumenta a complexidade do manejo dessa espécie e os custos de produção.

Por sua vez, a vassourinha-de-botão tem se tornado cada vez mais comum em áreas agrícolas do Mato Grosso, Goiás e regiões do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), com expansão para outras áreas (Correia *et al.*, 2026). O aumento da frequência dessa espécie tem sido associado à adoção de culturas resistentes ao glyphosate. Pois, a mesma é tolerante ao glyphosate, em virtude da redução da absorção e translocação em estádios mais avançados (Martins; Christoffoleti, 2014; Fadin *et al.*, 2018). Outras características, como a alta capacidade de produção de

sementes (Martins, 2008), a rebrota após o início das chuvas, estimulada pela presença de reservas nas raízes (Minozzi, 2022) e a redução da eficácia de controle com o crescimento da planta (Lima *et al.*, 2019; Andrade Jr., 2020), têm dificultado o manejo dessa espécie e contribuído para sua expansão e consolidação em áreas agrícolas.

Como consequência, os agricultores têm encontrado dificuldades para manejar essas plantas daninhas, uma vez que o controle é realizado quase que exclusivamente com glyphosate, o que tem resultado em controle ineficiente e na necessidade de aplicações sequenciais e do uso de herbicidas alternativos para o seu controle, encarecendo o custo de produção. Assim, o aumento de espécies resistentes ao glyphosate e a outros mecanismos de ação comumente utilizados induziu ao uso de herbicidas alternativos e, até mesmo, a mistura de herbicidas para aumentar o controle dessas plantas daninhas (Takano *et al.*, 2018).

Com o advento de novas cultivares com resistência ao glufosinate de amônio em soja, milho e algodão, esse herbicida tem sido amplamente utilizado no controle de plantas daninhas. O glufosinate tem apresentado bons resultados e é uma alternativa ao glyphosate para rotação de mecanismos de ação (Takano *et al.*, 2018; Krenchinski *et al.*, 2019). Contudo, seu uso intensivo pode levar à seleção de populações resistentes a esse herbicida. Assim, recomenda-se o uso de misturas que permitam reduzir a pressão de seleção, retardar a evolução da resistência e aumentar a eficácia de controle de populações resistentes. Novas biotecnologias com resistência a vários herbicidas, como Enlist® e Xtend®, com resistência ao glyphosate e/ou glufosinate e auxínicos e, recentemente, o lançamento da soja Vyconic™ (resistente ao glufosinate, glyphosate, mesotrione, dicamba e 2,4-D) (Bayer, 2026) irá possibilitar a utilização de misturas de glufosinate com outros herbicidas.

O uso de misturas de herbicidas permite aumentar o espectro de controle de plantas daninhas, pois a combinação de mais de um mecanismo de ação aumenta a eficiência de controle sobre diferentes espécies e reduz o número de entradas para pulverização. Além disso, é uma das estratégias mais importantes na prevenção da evolução da resistência (Bianchi *et al.*, 2020; Barbieri *et al.*, 2022).

Contudo, as misturas de herbicidas podem apresentar interações entre as moléculas, as quais podem ocorrer antes da aplicação devido a incompatibilidades físico-químicas no tanque de pulverização (Gazziero, 2015) ou após a aplicação (interações fisiológicas na planta). As interações entre as moléculas na planta podem

ter efeitos aditivos, sinérgicos ou antagônicos. O efeito sinérgico ocorre quando o efeito da mistura é maior do que o esperado para os herbicidas aplicados isolados, resultando no aumento da eficácia de controle. O efeito aditivo ocorre quando o efeito da mistura é igual à soma dos efeitos dos herbicidas aplicados isolados, enquanto o efeito antagônico ocorre quando o efeito da mistura é menor que a soma dos efeitos dos herbicidas aplicados isolados. Nesse caso, um produto reduz a eficácia do outro (Procópio *et al.*, 2003; Silva; Silva, 2007).

Tais interações podem afetar a eficácia de controle, bem como alterar a taxa de absorção, translocação e metabolismo de um herbicida, quando na presença do outro (Zhang *et al.*, 1995). Além disso, a espécie, a fase de crescimento da planta, a dose utilizada e as características físico-químicas e fisiológicas dos herbicidas podem influenciar as interações entre os herbicidas (Zhang *et al.*, 1995; Soltani *et al.*, 2020).

Casos de sinergismo de misturas contendo glufosinate com outros herbicidas já foram relatados, a exemplo de inibidores da Protox na qual o glufosinate potencializa a ação do herbicida em mistura (Takano *et al.*, 2020c; Avila-Neto *et al.*, 2024). Outras misturas contendo glufosinate e auxínicos (2,4-D e dicamba) ou glyphosate apresentaram interações sinérgicas e aditivas no controle de espécies eudicotiledôneas, como *Amaranthus palmeri*, *Ambrosia artemisiifolia* e *Senna obtusifolia* (L.) (Ganie; Jhala, 2017; Joseph *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2022). Por outro lado, o glufosinate pode apresentar antagonismo quando misturado com clethodim (Burke *et al.*, 2005), dicamba (Jones *et al.*, 2022) ou glyphosate (Chuah *et al.*, 2018) no controle de *E. indica*. Para outras espécies o glufosinate também reduziu a translocação de glyphosate, resultando em antagonismo (Bethke *et al.*, 2013; Besançon *et al.*, 2018).

O mesotrione tem sido amplamente utilizado em mistura com inibidores do Fotossistema II, com excelente controle de plantas daninhas e efeito sinérgico. Vários autores relatam efeitos sinérgicos em misturas em tanque contendo mesotrione e metribuzin, ametryn, atrazine e a mistura de diuron + hexazinone, no controle de diferentes espécies, como *Urochloa decumbens*, *Bidens pilosa*, *Euphorbia heterophylla*, *U. plantaginea*, *Digitaria horizontalis*, *Panicum maximum*, *Amaranthus deflexus*, *Ipomoea nil*, *Sida glaziovii* e *Ipomoea hederifolia* (Monquero *et al.*, 2009; De Goes Maciel *et al.*, 2013; Silveira *et al.*, 2020).

O glufosinate de amônio tem-se mostrado uma alternativa ao glyphosate diante do cenário atual de resistência e da adoção de culturas resistentes ao glufosinate.

Esse herbicida é um sal de amônio derivado da fosfinotricina, produzida pelas espécies de bactérias *Streptomyces viridochromogenes* e *S. hygroscopicus* (Dayan; Duke, 2014), e apresenta em sua composição ammonium 4-[hydroxy(methyl)phosphinoyl]-DL-homoalaninate. Caracteriza-se por ser um herbicida de ação rápida, amplo espectro de controle, sendo aplicado na pós-emergência das plantas daninhas eudicotiledôneas e gramíneas (Dayan, 2009). Devido às suas características físico-químicas (como alta solubilidade) a translocação pelo floema é limitada, sendo translocado principalmente pela via apoplástica (Takano *et al.*, 2020a).

O glufosinate inibe de forma irreversível a enzima glutamina sintetase (GS) no cloroplasto, responsável por catalisar a conversão de glutamato em glutamina, por meio da incorporação da amônia (Dayan; Duke, 2014). Em virtude da inibição da enzima glutamina sintetase, ocorre rápido acúmulo de amônia fotorrespiratória, tóxica às plantas, e de glutamato nos cloroplastos das células, além da inibição da síntese de aminoácidos. O glutamato é convertido a α -cetoglutarato, reduzindo os níveis de glutamato e bloqueando a conversão de glioxilato em glicina, levando ao acúmulo de glicolato, glioxilato e à depleção de compostos intermediários do ciclo fotorrespiratório e do ciclo de Calvin. Como consequência, a enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) é inibida, bloqueando a fixação de CO₂ na fotossíntese (Lu *et al.*, 2014; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020b).

A inibição da Rubisco causa desequilíbrio no consumo de fótons e elétrons. Como consequência, o excesso de elétrons da cadeia transportadora se liga ao O₂, originado na quebra da água, formando espécies reativas de oxigênio. O acúmulo dessas espécies reativas de oxigênio (ERO) no cloroplasto leva à peroxidação da membrana, destruição das clorofilas e rápida morte celular (Sauer *et al.*, 1987; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020b).

Com a adoção de biotecnologias que conferem resistência aos inibidores de carotenoides, combinada à resistência ao glufosinate, o mesotrione apresenta potencial para utilização em misturas. Esse herbicida geralmente é utilizado no controle em pós-emergência inicial de eudicotiledôneas e algumas gramíneas, principalmente na cultura do milho e cana-de-açúcar. O mesotrione [2-(4methylsulfonyl-2-nitrobenzoyl)-1,3-cyclohexanedione] é absorvido tanto pelas folhas como pelas raízes. Devido às suas características físico-químicas, como ácido fraco, alta solubilidade em água (1.500 mg/ L) e valor de pKa (3,12), pode ser translocado

via floema e xilema, o que lhe permite boa mobilidade na planta (Mitchell *et al.*, 2001; De Oliveira Jr. *et al.*, 2011).

Esse herbicida pertence ao grupo químico das tricetonas e inibe a síntese de carotenoides ao se ligar à enzima 4-hidroxifenil-piruvato dioxigenase (4-HPPD). A enzima 4-HPPD converte a molécula de 4-hidroxifenilpiruvato em homogentisato, precursor da plastoquinona (PQ) e α -tocoferol. Essa inibição interfere indiretamente na atividade da fitoeno desaturase, pois a plastoquinona atua como cofator da enzima fitoeno desaturase nas reações de dessaturação. A fitoeno desaturase é responsável pela conversão do fitoeno em fitoflueno, intermediários da biossíntese de carotenoides (Lee *et al.*, 1997; Hess, 2000).

Assim, a inibição da HPPD causa acúmulo de tirosina e fitoeno, e redução dos níveis de plastoquinona e α -tocoferóis (vitamina E) nas folhas em desenvolvimento. A redução dos níveis de α -tocoferóis (vitamina E) aumenta a sensibilidade das plantas ao estresse oxidativo, pois esses compostos agem como antioxidantes (Lee *et al.*, 1997; Dayan, 2019). Os carotenoides atuam protegendo as clorofilas da foto-oxidação, dissipando o excesso de energia absorvida na forma de calor. Na ausência de carotenoides, o excesso de energia gera espécies reativas de oxigênio, levando à peroxidação lipídica e à destruição de proteínas do Fotossistema II. Como consequência, observam-se os sintomas de branqueamento das folhas devido à falta de clorofilas (Moreland, 1980; Trebst *et al.*, 2002; Bridges, 2003; Markwell *et al.*, 2019).

Considerando que o glufosinate e o mesotrione apresentam modos de ação distintos, esses herbicidas podem atuar de forma complementar no metabolismo da planta. O mesotrione inibe a síntese de carotenoides e α -tocoferol. Desse modo, o sistema antioxidante da planta é desestabilizado. Dessa forma, hipotetiza-se que a mistura possa apresentar possível interação sinérgica devido ao aumento simultâneo da produção de ERO pelo glufosinate, e da perda da capacidade de neutralizar essas moléculas promovida pelo mesotrione (Matringe *et al.*, 2005; Takano *et al.*, 2019).

Embora já tenham sido relatados interações sinérgicas de misturas contendo glufosinate e outros herbicidas, bem como de mesotrione em misturas, pouco se sabe sobre a interação desses herbicidas em mistura. Compreender a interação dessa mistura é fundamental para avaliar o potencial de uso no manejo de plantas daninhas resistentes.

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da mistura de mesotrione e glufosinate de amônio sobre a eficácia de controle e a atividade fotossintética de *Eleusine indica* e *Borreria spinosa*.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE *Eleusine indica*

RESUMO

O uso intensivo de glyphosate selecionou populações de plantas daninhas resistentes, como o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*), as quais têm reduzido a produtividade das culturas e aumentado os custos de produção. Nesse cenário, torna-se necessária a adoção de diferentes estratégias de manejo, como a mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a interação da mistura de mesotrione e glufosinate de amônio na eficácia de controle e os efeitos na atividade fotossintética em *Eleusine indica* resistente ao glyphosate. Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Para avaliar a eficácia de controle realizaram-se quatro curvas de dose-resposta, sendo as doses: 0, 50, 100, 200, 400 e 800 g i.a. ha⁻¹ dos herbicidas glufosinate de amônio e mesotrione, isolados, e combinados com 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione ou de glufosinate. Além disso, para avaliar a interação da mistura sobre a atividade fotossintética, um segundo ensaio foi conduzido em esquema fatorial 3x3, sendo os fatores doses de mesotrione e de glufosinate (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹). Os parâmetros avaliados foram: controle visual aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA); massa fresca da parte aérea aos 28 DAA; taxa de transporte de elétrons (ETR) às 3, 6, 24, 48, 120 e 168 horas após a aplicação (HAA); teor de clorofila e carotenoides aos 3 e 7 DAA; taxa fotossintética aos 2, 5 e 7 DAA e conteúdo de amônia aos 1, 3 e 7 DAA. Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Avaliou-se a interação das misturas comparando-se os valores observados de controle e massa fresca da parte aérea com os valores estimados pela equação de Colby. Observaram-se interações sinérgicas e aditivas das misturas. Os herbicidas isolados e em mistura interferiram na atividade fotossintética, promovendo reduções significativas na ETR, nos teores dos pigmentos fotossintéticos e na assimilação de carbono. Conclui-se que a interação da mistura depende da dose e pode ser uma estratégia promissora no manejo de *Eleusine indica* resistente.

Palavras-chave: *Eleusine indica*; glufosinate de amônio; interação; mesotrione.

ABSTRACT

The intensive use of glyphosate has selected resistant weed populations, such as goosegrass (*Eleusine indica*), which have reduced crop productivity and increased production costs. Under this scenario, the adoption of integrated weed management strategies, such as herbicide tank mixtures with different mode of action. Therefore, the objective of this study was to evaluate the interaction between mesotrione and ammonium glufosinate applied in mixture regarding weed control efficacy and their effects on the photosynthetic activity of glyphosate-resistant *Eleusine indica*. The experiments were conducted under greenhouse conditions using a completely randomized design with four replications. To evaluate control efficacy, four dose-response curves were established using the following herbicide rates: 0, 50, 100, 200, 400, and 800 g a.i. ha⁻¹ of ammonium glufosinate and mesotrione applied alone, as well as in combination with 100 g a.i. ha⁻¹ of either mesotrione or ammonium glufosinate. Additionally, to assess the interaction of the herbicide mixture on photosynthetic activity, a second experiment was conducted in a 3 × 3 factorial arrangement, with mesotrione and ammonium glufosinate rates (0, 100, and 200 g a.i. ha⁻¹) as factors. The evaluated variables included visual control at 3, 7, 14, 21, and 28 days after application (DAA); shoot fresh biomass at 28 DAA; electron transport rate (ETR) at 3, 6, 24, 48, 120, and 168 hours after application (HAA); chlorophyll and carotenoid contents at 3 and 7 DAA; net photosynthetic rate at 2, 5, and 7 DAA; and ammonia content at 1, 3, and 7 DAA. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and means were compared using the *t*-test ($p < 0.05$). Herbicide interactions were assessed by comparing the observed values of weed control and shoot fresh biomass with the expected values estimated according to Colby's equation. Both synergistic and additive interactions were observed for the herbicide mixtures. Herbicides applied alone and in combination affected photosynthetic activity by significantly reducing ETR, photosynthetic pigment concentrations, and carbon assimilation. It was concluded that the interaction between mesotrione and ammonium glufosinate is dose-dependent and represents a promising strategy for the management of glyphosate-resistant *Eleusine indica*.

Keywords: *Eleusine indica*; ammonium glufosinate; interaction; mesotrione.

1.1 INTRODUÇÃO

O capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica* (L.) Gaertn.) é uma das principais plantas daninhas que ocorrem em áreas agrícolas no mundo. Características como seu metabolismo C₄, o rápido crescimento, a alta produção de sementes e sistema radicular bem desenvolvido conferem a essa espécie uma alta habilidade competitiva e adaptativa a diversos ambientes (Kissmann; Groth, 2000; Takano *et al.*, 2016). Em decorrência da alta capacidade competitiva dessa espécie, sua presença tem resultado em perdas significativas em culturas de interesse econômico, com perdas de 35% a 67% para a soja, e até 48% para o milho (Rudell *et al.*, 2021; Caldas *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2024), sendo essas perdas variáveis de acordo com o nível de infestação e também da disponibilidade dos recursos do meio.

O controle dessa gramínea deve ser realizado até o início do perfilhamento, pois, após esse período, a eficácia de controle pode ser reduzida devido à redução de tecidos meristemáticos e à maior deposição de ceras nas folhas (Oliveira; Inou, 2011).

O manejo dessa espécie se torna mais complexo diante da seleção de populações resistentes. Atualmente são relatados 40 casos de resistência de *E. indica* no mundo, dos quais 18 envolvem o glyphosate e 8 são de resistência múltipla (resistência a mais de um mecanismo de ação) (Heap, 2026). No Brasil, tem-se três situações de resistência: resistência cruzada aos inibidores de ACCase (cyhalofop-butyl, fenoxaprop-ethyl e sethoxydim); resistência ao inibidor de EPSPs (glyphosate); e resistência múltipla aos inibidores de EPSPs e ACCase (glyphosate, fenoxaprop-ethyl e haloxyfop-methyl) (Heap, 2026).

Assim, o manejo dessa infestante tem se mostrado desafiador para os produtores, principalmente pela ocorrência de populações resistentes aos principais herbicidas (glyphosate e o clethodim) utilizados no seu controle. Diante desse cenário, o uso de herbicidas alternativos torna-se essencial. Nesse sentido o glufosinate tem sido apontado como uma alternativa promissora para o manejo de *E. indica* resistente ao glyphosate. Com o advento de novas biotecnologias, com resistência ao glufosinate de amônio em soja, milho e algodão, esse herbicida tem sido amplamente utilizado no controle de plantas daninhas.

O glufosinate apresenta controle eficiente de *E. indica*, entretanto, sua eficácia é reduzida a partir do perfilhamento. A perda da eficácia pode estar associada à movimentação limitada desse herbicida para o meristema apical na base do colmo

(Barbieri *et al.*, 2022), e também pode ser influenciada por condições ambientais como luminosidade, temperaturas baixas e umidade baixa (Takano; Dayan, 2020). Esses fatores podem ter influenciado as falhas de controle observadas nas últimas safras e podem contribuir para a seleção de populações menos sensíveis ao glufosinate. Em alguns casos necessitando o uso de um mecanismo alternativo para manter a eficácia desse herbicida.

Assim, associações de glufosinate com outros herbicidas como inibidores da EPSPs, ACCase, ou Protop, têm apresentado sinergismo no controle dessa espécie (Takano *et al.*, 2018; Takano *et al.*, 2020c). O desenvolvimento de novas biotecnologias, a exemplo da soja Vyconic™, que possui tolerância ao glufosinate, glyphosate, mesotrione, dicamba e 2,4-D (Bayer, 2026) permite a utilização de misturas de glufosinate com outros mecanismos de ação. Nesse contexto, a mistura de glufosinate com outros herbicidas, como mesotrione pode contribuir para ampliar o espectro de controle de plantas daninhas, bem como aumentar a eficácia de controle de populações resistentes. Além disso, a mistura de herbicidas é uma importante estratégia na prevenção da evolução da resistência ao reduzir a pressão de seleção e retardar a evolução da resistência aos herbicidas (Barbieri *et al.*, 2022).

No entanto, as interações entre as moléculas na planta são complexas e podem afetar a eficácia de controle do herbicida, assim como alterar a taxa de absorção, translocação e metabolismo de um herbicida, quando na presença do outro (Zhang *et al.*, 1995). As interações fisiológicas das misturas dependem da espécie, da fase de crescimento da planta, da dose utilizada e das características físico-químicas e fisiológicas dos herbicidas (Zhang *et al.*, 1995; Soltani *et al.*, 2020).

O glufosinate em algumas misturas, tem apresentado interações sinérgicas no controle de algumas espécies eudicotiledôneas (Ganie; Jhala, 2017; Joseph *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2022). No entanto, em outras misturas tem resultado em antagonismo no controle de *E. indica*, por exemplo, quando associado com clethodim (Burke *et al.*, 2005), dicamba (Jones *et al.*, 2022) ou glyphosate (Chuah *et al.*, 2018). O glufosinate apresenta ação rápida e pode reduzir a absorção e a translocação do herbicida parceiro na mistura, resultando em antagonismo (Bethke *et al.*, 2013; Besançon *et al.*, 2018).

O mesotrione apresenta potencial de uso em misturas para o controle de plantas daninhas, com interações sinérgicas quando em misturas com inibidores do Fotossistema II (Abendroth *et al.*, 2006; Monquero *et al.*, 2009; De

Goes Maciel *et al.*, 2013; Takano *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2020; Fluttert *et al.*, 2022b). Embora a interação da associação de glufosinate e mesotrione seja pouco estudada, alguns autores relataram interação sinérgica da mistura de glufosinate e mesotrione no controle de algumas eudicotiledôneas (Fluttert *et al.*, 2022a). Contudo, há poucos estudos de misturas com esse herbicida no controle de *E. indica*.

O glufosinate de amônio inibe a enzima glutamina sintetase (GS), responsável por catalisar a conversão de glutamato em glutamina, por meio da incorporação da amônia (Dayan; Duke, 2014). Como consequência, tem-se o rápido acúmulo de amônia provinda da fotorrespiração, redução dos níveis de glutamina e outros aminoácidos. Tais efeitos desencadeiam uma série de efeitos secundários, incluindo o aumento de glioxilato e redução de compostos intermediários do ciclo de Calvin, que resultam na inibição da enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e da fixação de CO₂ na fotossíntese. Como consequência, há aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), que promovem a peroxidação das membranas e levam a rápida morte celular (Wild; Wendler, 1993; Lu *et al.*, 2014; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020b).

O mesotrione inibe indiretamente a síntese de carotenoides ao se ligar à enzima 4-hidroxifenil-piruvato dioxigenase (4-HPPD). A 4-HPPD converte o 4-hidroxifenilpiruvato em homogentisato, precursor da plastoquinona (PQ) e α -tocoferol, reduzindo os níveis dessas moléculas (Lee *et al.*, 1997; Hess, 2000). A redução de α -tocoferol (vitamina E) aumenta a sensibilidade às ERO, pois age como antioxidante contra o estresse oxidativo (Lee *et al.*, 1997; Dayan, 2019).

Desse modo, hipotetiza-se que a associação de mesotrione e glufosinate pode resultar em interação sinérgica, de modo que um herbicida complementa a ação do outro no metabolismo da planta, com o aumento do estresse oxidativo promovido pelo glufosinate e à redução de mecanismos antioxidantes promovida pela ação do mesotrione (Matringe *et al.*, 2005; Takano *et al.*, 2019). Contudo, estudos sobre a interação desses herbicidas e seus efeitos no controle de *E. indica* são escassos. Nesse sentido, compreender a interação dessas moléculas em mistura é fundamental para sua adoção no manejo de espécies de plantas daninhas resistentes ao glyphosate.

Portanto, este trabalho objetivou avaliar a eficácia e a interação da mistura em tanque de mesotrione e glufosinate de amônio no controle de *Eleusine indica*

resistente ao glyphosate, bem como os efeitos da mistura sobre a atividade fotossintética das plantas.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), na Faculdade de Ciências Agrárias (FCA/UNESP), campus de Botucatu, SP.

Para avaliar o efeito da mistura do glufosinate de amônio e mesotrione foram conduzidos ensaios em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Para tanto, realizaram-se dois ensaios para avaliação de: 1) eficácia de controle da mistura e taxa de transporte de elétrons (ETR); e 2) efeito da mistura no teor de clorofila, carotenoides, acúmulo de amônia e a atividade fotossintética em plantas de *Eleusine indica*.

1.2.1 Experimento 1: Eficácia de controle

O ensaio de eficácia de controle consistiu em curvas de dose resposta, na qual foram aplicadas as doses de: 0, 50, 100, 200, 400 e 800 g i.a. ha⁻¹ dos herbicidas de forma isolada e em mistura, na qual cada curva de glufosinate de amônio foi realizada com 0 e 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione, e cada curva de mesotrione foi realizada com 0 e 100 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate de amônio, sendo adicionado óleo mineral a 0,25% v/v para todos os tratamentos.

As sementes de *Eleusine indica* resistente ao glyphosate [fator de resistência (FR)= 10,9] foram concedidas pela Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop-MT (onde foram realizados os estudos de resistência). Essas sementes foram semeadas em bandejas e, posteriormente, as plântulas foram transplantadas para vasos com capacidade de 1,7 L preenchidos com substrato comercial (carvão vegetal, casca de *Pinus* e vermiculita com pH = 5,8 ($\pm 0,3$)), sendo mantidas duas plantas por vaso. Quando as plantas de *Eleusine indica* apresentavam de 3 a 4 perfilhos, foi realizada a aplicação dos tratamentos.

As aplicações foram realizadas por um pulverizador estacionário em sala fechada (Figura 1), equipado com barra de pulverização com quatro pontas de pulverização XR 110.02 VS (TeeJet), espaçadas a 0,5 m e a 0,5 m de altura em

relação ao alvo, com volume de aplicação de 200 L ha⁻¹, sob pressão constante de 2,0 bar e velocidade de 1 m. s⁻¹.

Figura 1 - Plantas de *Eleusine indica* antes da aplicação (à esquerda) e pulverizador estacionário e unidades experimentais no momento da aplicação (à direita)



Aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) foi avaliada a eficácia de controle dos tratamentos. A avaliação visual de controle foi realizada com auxílio de uma escala de notas, de 0 a 100% de controle, na qual zero (0) representa a ausência de controle e 100% a morte da planta. Após a última avaliação, foi coletada a parte aérea das plantas para determinação da massa fresca, a qual foi acondicionada em sacos de papel, e posteriormente, pesadas em balança analítica (0,0001 g).

Além do controle, foram realizadas avaliações da taxa de transporte de elétrons (ETR) no fotossistema II às 2, 6, 24, 48, 120 e 168 horas após a aplicação (HAA), com auxílio de um medidor portátil de fluorescência da clorofila (medidor Y(II) OPTI-SCIENCES). As leituras foram realizadas na primeira folha totalmente expandida, avaliando-se duas folhas por repetição.

Figura 2 - Avaliação da taxa de transporte de elétrons no Fotossistema II (ETR) em plantas de *Eleusine indica*



1.2.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia

Em um segundo conjunto de unidades experimentais foram avaliados os efeitos dos herbicidas isolados e em misturas sobre a atividade fotossintética, teor de clorofila, carotenoides, assim como o acúmulo de amônia nos tecidos de plantas *E. indica*. Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial 3 x 3, sendo os fatores três doses de mesotrione (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹) e três doses de glufosinate (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹).

As plantas foram cultivadas, conduzidas e os tratamentos aplicados conforme descrito anteriormente. Da mesma forma, as aplicações ocorreram sob as mesmas condições.

A atividade fotossintética foi avaliada aos 2, 5 e 7 DAA, através de um medidor de trocas gasosas por infravermelho (IRGA) modelo LCpro-SD® (ADC BioScientific Ltda®.) (Figura 3). As medições foram realizadas entre 9:00 e 11:00 h no período

matutino e entre 14:00 e 16:00 h no período vespertino, em folhas completamente expandidas do segundo nó da planta, do ápice em direção à base, de forma a evitar as folhas novas. Após, a leitura determinou-se os parâmetros fotossintéticos: concentração de carbono interno (C_i), taxa de transpiração (E), condutância estomática (g_s) e assimilação líquida de CO_2 (A).

Figura 3 - Avaliação da atividade fotossintética em plantas de *Eleusine indica*



Aos 3 e 7 DAA, folhas completamente expandidas, do segundo nó da planta em direção à base, foram coletadas para análise do conteúdo de clorofila e carotenoides no tecido foliar. Desse material coletado pesou-se 0,2 g e, em seguida, o material foi acondicionado em tubos de 5 mL e armazenado em freezer para extração dos pigmentos fotossintéticos (Figura 4). Para a extração, adicionaram-se 5 mL de fase etanol: água (95:05) às amostras de tecido foliar. Em seguida, esse material foi embrulhado em papel alumínio e mantido no escuro em sala com temperatura controlada por 24 horas. Após esse período, realizaram-se as leituras de absorbância em espectrofotômetro modelo UV-2700 (Shimadzu Europe). Para as clorofilas *a* e *b* foram utilizados os comprimentos de onda de 648,6 e 664,2 nm,

respectivamente e, para a leitura de carotenoides, o comprimento de onda foi de 470 nm. Os níveis de clorofilas e carotenoides foram determinados por meio das seguintes equações:

$$\text{Clorofila } a = (13,36 \cdot A_{664,2}) - 5,19 \cdot A_{648,6};$$

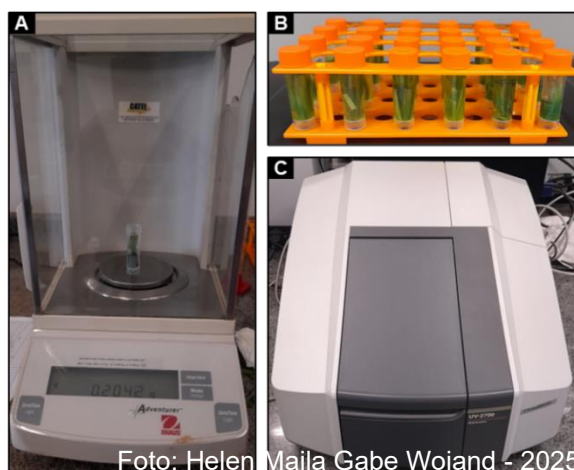
$$\text{Clorofila } b = (27,43 \cdot A_{648,6}) - (8,12 \cdot A_{664,2});$$

$$\text{Clorofila total } (a + b) = (5,24 \cdot A_{664,2}) + (22,24 \cdot A_{648,6});$$

$$\text{Carotenoides} = ((1000 \cdot A_{470}) - (2,13 \cdot Ca) - 97,64 \cdot Cb) / 209;$$

onde, A é a absorbância no comprimento de onda indicado.

Figura 4 - Processo para extração dos pigmentos fotossintéticos. A) pesagem da amostra; B) adição da fase de etanol em água e manutenção no escuro; C) leituras de absorbância em espectrofotômetro



Para determinar o conteúdo de amônia, procedeu-se à coleta da planta inteira aos 1, 3 e 7 dias após a aplicação (DAA). As plantas coletadas foram imediatamente pesadas e acondicionadas em garrafas plásticas previamente pesadas e identificadas (Figura 5). Em seguida, as garrafas contendo as amostras foram preenchidas com uma solução de ácido clorídrico (HCl) com pH 3,5, sendo novamente pesado. Posteriormente, essas garrafas foram colocadas em banho de ultrassom por 60 minutos, para recuperação de toda a amônia. Após, retirou-se as folhas da solução.

Para a extração da amônia e posterior quantificação realizou-se o preparo dos seguintes reagentes: sulfato manganoso, hipoclorito de sódio, solução de fenol + hidróxido de sódio. Adicionou-se 0,05 g de sulfato manganoso (MnSO_4) a um balão volumétrico de 100 mL e, após a dissolução do reagente, completou-se o balão volumétrico com água deionizada. A solução de hipoclorito de sódio foi preparada com

a adição de 5 mL de NaClO (12%) e 45 mL de água deionizada em béquer e, sob agitação constante, ajustou-se o pH entre 6 e 7, com a adição de ácido clorídrico. Para a solução de fenol + hidróxido de sódio, foram adicionados 10 g C₆H₅OH a um balão volumétrico de 100 mL. Após, a dissolução do fenol, foi acrescentado 2,5 g de NaOH e completou-se o volume do balão com água deionizada.

Além dos reagentes foi preparada uma curva padrão utilizando solução estoque de amônia. Preparou-se a curva padrão com as concentrações de 0; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0 e 3,0 ppm, para possibilitar a correlação de absorbância e concentração de amônia.

Figura 5 - Processo para extração da amônia. A) pesagem da amostra; B) amostras em banho de ultrassom; C) curva padrão com concentrações de 0; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0 e 3,0 ppm de amônia; D) agitação das amostras após adição dos reagentes; E) leituras de absorbância em espectrofotômetro

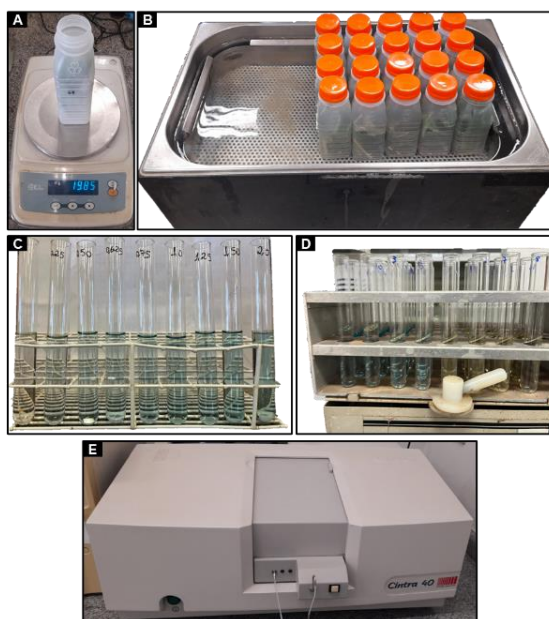


Foto: Helen Maila Gabe Woiland - 2025

Após a preparação dos reagentes e retirada do material vegetal das garrafas, retirou-se uma alíquota de 10 mL da solução sonicada, transferiu-se para tubos de ensaios identificados. Posteriormente, adicionou-se os reagentes para determinação colorimétrica, na seguinte ordem: adição de uma gota de sulfato de manganês; 500 µL da solução de hipoclorito de sódio; 600 µL da solução de fenol + NaOH; em seguida, os tubos foram colocados em um agitador orbital por 10 minutos. Após a agitação, realizou-se a leitura da absorbância e também a determinação do conteúdo

de amônia da solução proveniente das amostras e da curva padrão por espectrofotometria (Wendler; Barniske; Wild, 1990; Dayan *et al.*, 2015), usando o espectrofotômetro de duplo feixe UV visível (Cintra 40, GBC Scientific Equipment Ltd.) no comprimento de onda de 360 nm.

1.2.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e as médias quando significativas foram comparadas pelo teste de t ($p < 0,05$), pelo programa estatístico SISVAR v. 5.8.

Os dados de ETR, pigmentos fotossintéticos e massa fresca foram convertidos em porcentagem em relação à testemunha, na qual a testemunha representa 100%. Já os dados referentes ao teor de amônia foram convertidos em mg kg^{-1} de massa fresca. Para ETR foi calculado os intervalos de confiança a partir da fórmula:

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

onde t é o valor de t tabelado com 5% de significância, desvpad é o desvio padrão da amostra e n é o número de repetições de cada tratamento.

Para avaliar o efeito da interação entre glufosinate de amônio e mesotrione em mistura de tanque, foram comparados os valores reais obtidos de controle visual e massa fresca, e os valores esperados pelo método de sobrevivência multiplicativo, método de Colby (1967), onde as porcentagens de controle visual foram comparadas às porcentagens de controle esperadas por meio da equação:

$$C_{\text{controle}} (\%) = \frac{100 - (100 - C_1) * (100 - C_2)}{100}$$

$$C_{\text{massa fresca residual}} (\%) = \frac{100 - (C_1 * C_2)}{100}$$

onde C: controle estimado; C_1 : controle ou massa fresca residual observado para o glufosinate; C_2 : controle ou massa fresca residual observado para o mesotrione;

Para determinar as interações das misturas dos herbicidas, realizou-se o teste t de Student pareado ($p < 0,05$), comparando o controle esperado e o controle

observado. As interações foram classificadas em: efeito aditivo: quando os valores do controle observado foram iguais aos valores do controle esperado (calculado), e sem diferença estatística; efeito sinérgico (SIN): quando os valores do controle observado foram maiores do que o controle esperado; e efeito antagônico (ANT): quando os valores do controle observado forem menores do que o esperado.

Adicionalmente, os dados de controle e massa fresca foram ajustados ao modelo de regressão não-linear de Mitscherlich (Mitscherlich, 1909) por meio do programa estatístico (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, Version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA), de acordo com a equação:

$$Y=(a \left[1-10^{(-c(x+b))} \right])$$

onde: a , b e c são parâmetros da equação; a é a assíntota máxima da curva; b o deslocamento lateral da curva, e c é a concavidade. O valor de Y indica a porcentagem de controle e x representa a dose do herbicida.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Experimento 1: Eficácia de controle

As porcentagens de controle visual e massa fresca residual foram ajustadas pelo modelo de regressão de Mitscherlich com grau de ajuste acima de 95% para todas as curvas (Figura 6). Nas Tabelas 1 e 2, encontram-se as estimativas dos parâmetros e coeficiente de determinação dos modelos ajustados.

O controle de *Eleusine indica* aumentou com as doses crescentes de glufosinate de amônio e mesotrione isolados e em mistura, ao longo do tempo (Figura 6). Nota-se comportamento distinto entre as curvas de dose-reposta. O glufosinate de amônio isolado apresentou resposta acentuada ao aumento das doses e, a partir de 14 DAA, atingiu os maiores níveis estimados de controle nas doses mais elevadas. A adição de 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione alterou principalmente a resposta nas menores doses de glufosinate, enquanto, nas maiores doses, as curvas se aproximaram da região de máxima resposta, reduzindo a magnitude do incremento proporcionado pela associação.

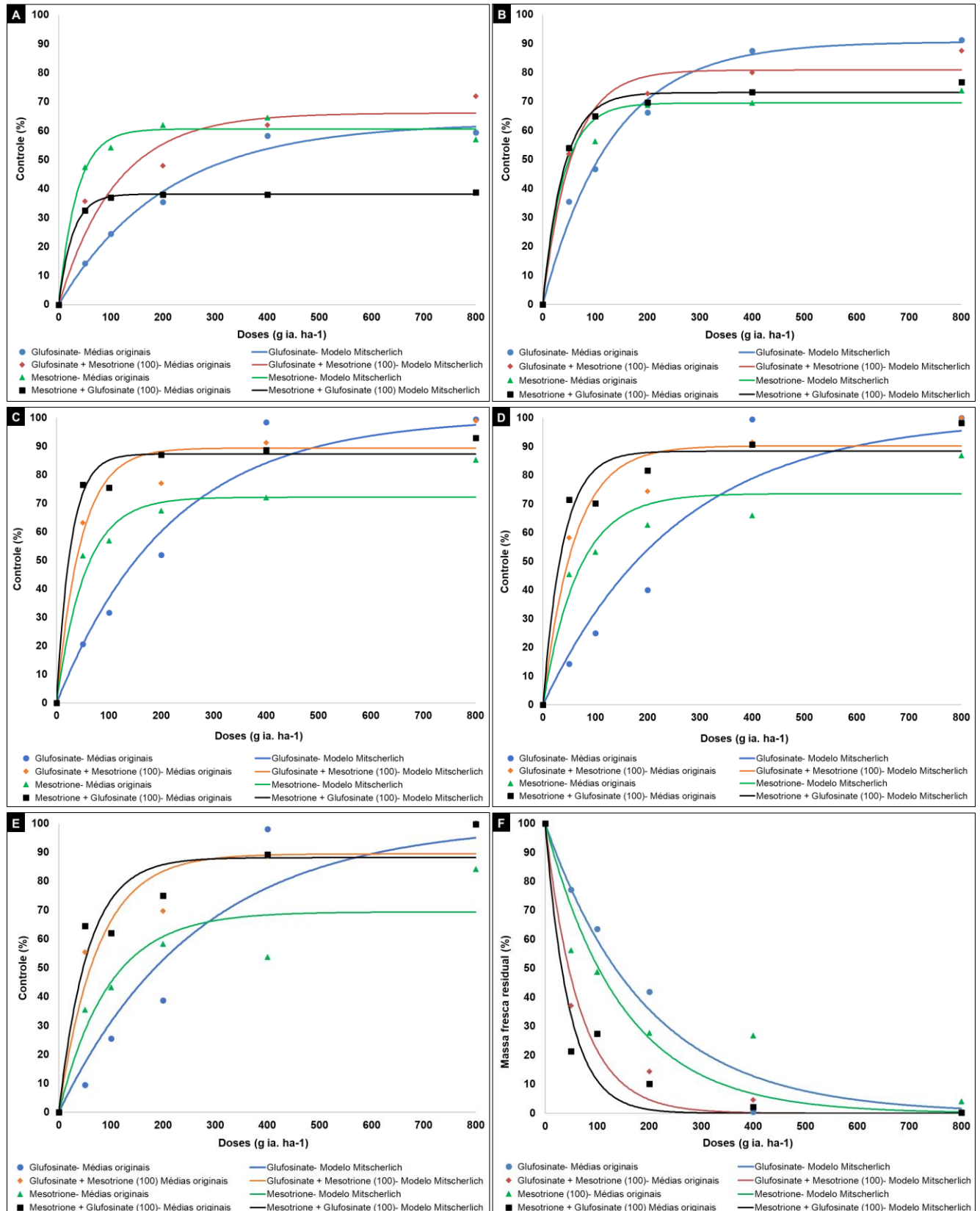
Tabela 1 - Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich para controle visual de *Eleusine indica* aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) para doses de glufosinate de amônio (1) e de mesotrione (2) isoladas e em mistura

	Parâmetros				
	a	b	c	F	R ²
3 DAA					
Glufosinate ¹	62,69	0,00	0,00	485,85	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	66,13	0,00	0,00	116,46	0,98
Mesotrione ²	60,64	0,00	0,01	801,10	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	38,18	0,00	0,02	28052,60	0,99
7 DAA					
Glufosinate ¹	90,60	0,00	0,00	659,34	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	80,86	0,00	0,01	514,32	0,99
Mesotrione ²	69,50	0,000	0,01	434,38	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	73,08	0,00	0,01	1591,01	0,99
14 DAA					
Glufosinate ¹	100,00	0,00	0,00	286,08	0,98
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	89,39	0,00	0,01	265,98	0,99
Mesotrione ²	72,15	0,00	0,01	200,74	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	87,34	0,00	0,02	521,59	0,99
21 DAA					
Glufosinate ¹	100,00	0,00	0,00	153,15	0,96
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	90,29	0,00	0,01	203,02	0,99
Mesotrione ²	73,62	0,00	0,01	118,05	0,98
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	88,43	0,00	0,01	210,19	0,99
28 DAA					
Glufosinate ¹	100,00	0,00	0,00	145,71	0,97
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	89,46	0,00	0,01	129,45	0,98
Mesotrione ²	69,37	0,00	0,01	64,56	0,97
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	88,15	0,00	0,01	116,16	0,98

Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich para massa fresca residual de *Eleusine indica* aos 28 dias após a aplicação (DAA) para doses de glufosinate de amônio (1) e de mesotrione (2) isoladas e em mistura

	Parâmetros		
	c	F	R ²
Glufosinate ¹	0,00	524,34	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	0,01	255,35	0,98
Mesotrione ²	0,00	125,66	0,96
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	0,01	109,68	0,96

Figura 6 - Modelo de Mitscherlich ajustado para o controle de *Eleusine indica* aos 3 DAA (A), 7 DAA (B), 14 DAA (C), 21 DAA (D), 28 DAA (E) e massa fresca residual (%) aos 28 DAA (dias após a aplicação) (F) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura



Por outro lado, a curva de mesotrione isolado apresentou o menor controle, principalmente nas avaliações mais tardias (Figura 6), alcançando controles inferiores a 70%. A curva contendo a mistura de mesotrione com glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) apresentou controle inferior à curva de mesotrione isolado aos 3 DAA, e ao longo do tempo esse controle aumentou nas menores doses e ficou próximo à curva de glufosinate com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) nas avaliações a partir de 14 DAA.

Em relação à redução do acúmulo de massa fresca, o comportamento das misturas se assemelhou ao controle visual (Figura 6F), na qual as curvas isoladas apresentaram redução de 100% da massa fresca nas maiores doses. Enquanto que as curvas com as misturas apresentaram reduções expressivas no acúmulo de massa fresca com menores doses.

Ambos os herbicidas aplicados isoladamente foram ineficientes no controle nas doses baixas, apresentando maior controle apenas nas doses mais altas (Figuras 7 e 8). Outros autores também observaram controles eficientes nas doses de bula de glufosinate (400-600 g i.a. ha⁻¹) em plantas em perfilhamento (Castro, 2018; Tejada *et al.*, 2024). Por outro lado, Takano *et al.* (2018) ao avaliarem o controle por glufosinate de amônio em plantas de *E. indica* resistentes ao glyphosate, e em perfilhamento (um e quatro perfilhos), observaram controle ineficiente, inferiores a 30 e 50% para doses de 400 e 600 g i.a. ha⁻¹, respectivamente.

O controle pela curva de mesotrione isolado foi ineficiente aos 28 DAA (<70%) (Figura 6). Esse resultado está em conformidade com o observado por outros autores, que relataram perda de eficiência do mesotrione quando aplicado em plantas com mais de um perfilho (Takano *et al.*, 2018; Tejada *et al.*, 2024), pois, à medida que a planta avança seu estágio de desenvolvimento se torna menos sensível aos herbicidas, em decorrência da menor quantidade de tecidos meristemáticos e à maior deposição de ceras nas folhas (Oliveira; Inoue, 2011). O menor controle dessas plantas, pode ser explicado pelo fato do mesotrione controlar predominantemente eudicotiledôneas e poucas gramíneas (Carvalho, 2013). Esses fatos justificam a necessidade de doses altas para o controle dessa espécie em perfilhamento e a importância do uso de um herbicida em mistura.

Figura 7 - Curva dose-resposta de doses de glufosinate de amônio isoladas (à esquerda) e em mistura (à direita) em *Eleusine indica* aos 3 (A), 7 (B), 14 (C), 21 (D) e 28 (E) dias após a aplicação (DAA)

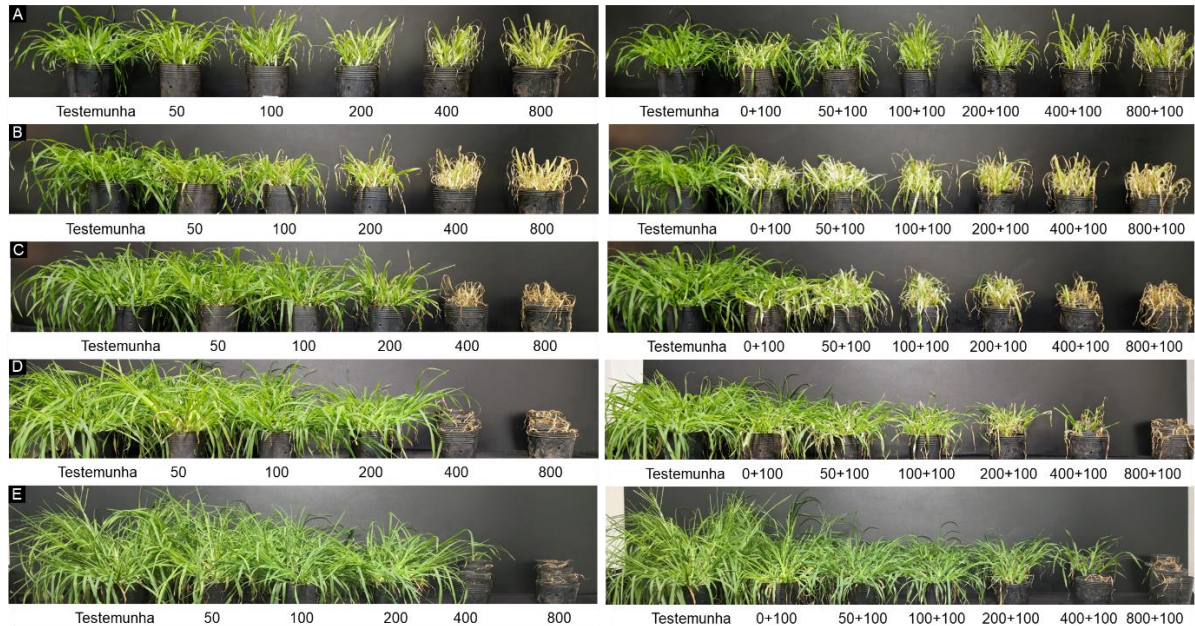
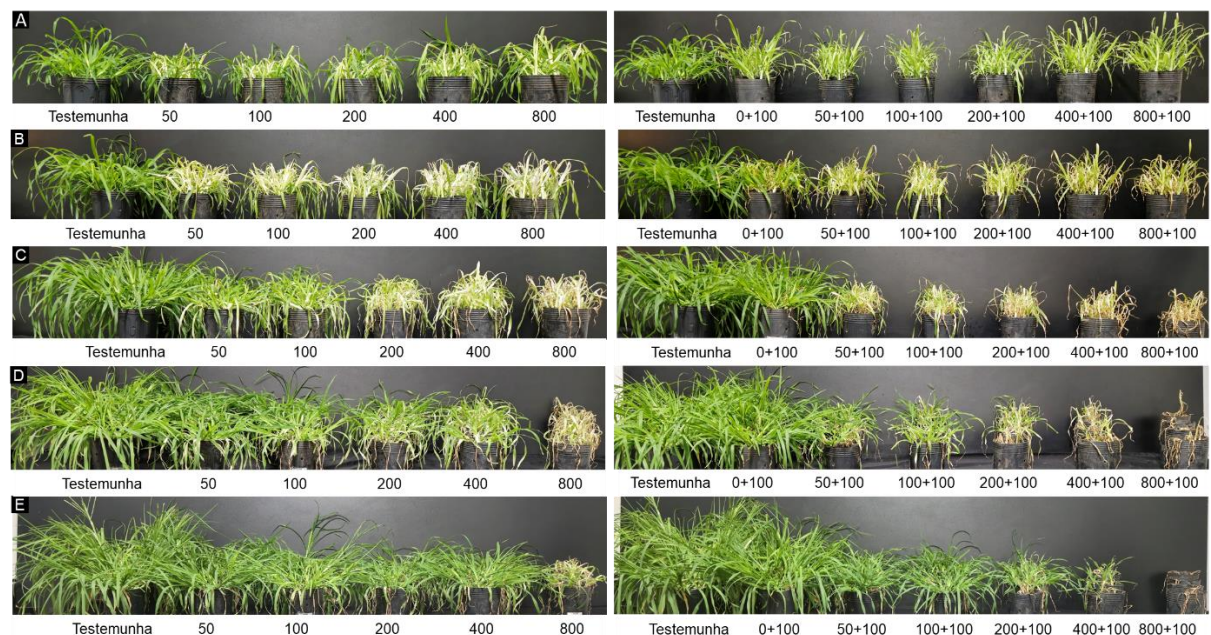


Figura 8 - Curva dose-resposta de doses de mesotrione isoladas (à esquerda) e em mistura (à direita) em *Eleusine indica* aos 3 (A), 7 (B), 14 (C), 21 (D) e 28 (E) dias após a aplicação (DAA)



Conforme discutido anteriormente, o mesotrione isolado não apresentou controle satisfatório de *E. indica*, sendo necessário a associação com outro herbicida

para aumentar a eficácia de controle. Palharini (2024) observou controles ineficientes quando o glufosinate de amônio e mesotrione foram aplicados isoladamente em *E. indica* em perfilhamento, por outro lado, a mistura de glufosinate (560 g i.a. ha⁻¹) + mesotrione (144 g i.a. ha⁻¹) apresentou controle de 94%. Em outro estudo, Takano *et al.* (2018) observaram que o mesotrione isolado (192 g i.a. ha⁻¹) controlou em 40% as plantas de *E. indica* resistentes ao glyphosate (com um e quatro perfilhos). No entanto, ao associarem atrazine, observaram controle de 100% para plantas com um perfilho e 63,8% com quatro perfilhos, enquanto a associação com glyphosate o controle foi de 56,3% em relação ao mesotrione isolado. Esses resultados demonstram a necessidade de associação de outros herbicidas ao mesotrione para o controle dessa espécie, principalmente em plantas perfilhadas.

Nesse sentido, de acordo com os resultados obtidos, as misturas se mostraram promissoras no controle de populações dessa espécie resistentes ao glyphosate (Figuras 7 e 8). Inicialmente, ambas as curvas de dose-resposta com as misturas apresentaram efeito antagônico no controle de *E. indica* (Tabela 3). De forma geral, a adição de mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) à curva dose-resposta de glufosinate apresentou efeito aditivo aos 28 DAA (Tabela 3), exceto para dose de 100 g i.a. ha⁻¹ a qual apresentou sinergismo para controle visual. Por outro lado, a adição de glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) à curva dose-resposta de mesotrione demonstrou efeito sinérgico para o controle aos 28 DAA, exceto para a dose de 200 g i.a. ha⁻¹. Para redução de massa fresca apenas as maiores doses apresentaram sinergismo aos 28 DAA.

Embora existam poucos estudos sobre sinergismo de misturas no controle de *E. indica*, alguns estudos relatam o sinergismo da mistura de glufosinate com herbicidas inibidores de carotenoides para outras espécies. Fluttert *et al.* (2022a) constataram sinergismo da mistura de glufosinate (300 g i.a. ha⁻¹) com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) no controle de *Abutilon theophrasti*, *Ambrosia artemisiifolia* e *Chenopodium album*, além de interação aditiva no controle de *Sinapis arvensis* e *Echinochloa crus-galli*. Quando o glufosinate foi misturado com tolpiralate (30 g i.a. ha⁻¹) obtiveram interação aditiva no controle de *Abutilon theophrasti*, *Chenopodium album* e *Sinapis arvensis*. Esses autores relataram ainda que o glufosinate foi o melhor herbicida gerador de estresse oxidativo quando avaliado na mistura em tanque com mesotrione no controle de gramíneas anuais.

Tabela 3. Controle de *Eleusine indica* observado (Obs) e estimado (Est) e interação entre os herbicidas (Inter) aos 3, 7, 14, 21, 28 dias após a aplicação (DAA) e redução da massa fresca aos 28 dias após a aplicação (DAA)

Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)	Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	3 DAA			7 DAA			14 DAA			21 DAA			28 DAA			Redução de massa fresca		
		Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter
0	0	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
50	0	14	-	-	36	-	-	21	-	-	14	-	-	10	-	-	23	-	-
100	0	25	-	-	47	-	-	32	-	-	25	-	-	26	-	-	36	-	-
200	0	36	-	-	66	-	-	52	-	-	40	-	-	39	-	-	58	-	-
400	0	58	-	-	88	-	-	99	-	-	99	-	-	98	-	-	99	-	-
800	0	60	-	-	91	-	-	99	-	-	100	-	-	100	-	-	99	-	-
50	100	36	60,8 *	ANT	52	71,8 *	ANT	63	65,9	ADIT	58	59,8	ADIT	56	48,7	ADIT	63	60,8	ADIT
100	100	37	65,5 *	ANT	65	76,7 *	ANT	76	70,6 *	SIN	70	64,9 *	SIN	62	57,7 *	SIN	73	70,5	ADIT
200	100	48	70,4 *	ANT	73	85,2 *	ANT	77	79,4	ADIT	75	72,1	ADIT	70	65,5	ADIT	86	81,0	ADIT
400	100	62	80,8 *	ANT	80	94,5 *	ANT	91	99,3 *	ANT	92	99,8	ADIT	89	98,7	ADIT	95	99,7	ADIT
800	100	72	81,4 *	ANT	88	96,2 *	ANT	99	99,8 *	ANT	100	100,0	ADIT	100	100,0	ADIT	99	99,8	ADIT
0	50	48	-	-	54	-	-	52	-	-	46	-	-	36	-	-	44	-	-
0	100	54	-	-	56	-	-	57	-	-	53	-	-	43	-	-	51	-	-
0	200	62	-	-	69	-	-	68	-	-	63	-	-	58	-	-	72	-	-
0	400	65	-	-	70	-	-	72	-	-	66	-	-	54	-	-	73	-	-
0	800	57	-	-	74	-	-	85	-	-	87	-	-	84	-	-	96	-	-
100	50	33	60,4 *	ANT	54	75,6 *	ANT	77	66,9 *	SIN	72	59,1 *	SIN	65	51,9 *	SIN	79	64,0	ADIT
100	100	37	65,5 *	ANT	65	76,7 *	ANT	76	70,6 *	SIN	70	64,9 *	SIN	62	57,7 *	SIN	73	70,5	ADIT
100	200	38	71,3 *	ANT	70	83,3 *	ANT	87	77,8 *	SIN	82	72,1	ADIT	75	68,9	ADIT	90	83,2	ADIT
100	400	38	73,2 *	ANT	73	83,7 *	ANT	89	80,9 *	SIN	91	74,5 *	SIN	89	65,5 *	SIN	98	82,7 *	SIN
100	800	39	67,5 *	ANT	77	86,0 *	ANT	93	89,9	ADIT	98	90,3 *	SIN	100	88,3 *	SIN	100	97,3 *	SIN

ADIT: aditivo; ANT: antagônico; SIN: sinérgico; * significativo a 5% pelo teste t de Student

Diferentemente do observado neste estudo, misturas com herbicidas de ação rápida e pouca mobilidade, como o glufosinate, destroem rapidamente o tecido foliar. De modo a reduzir a absorção e a translocação do herbicida em mistura, assim, menores quantidades são translocadas para o local de ação, reduzindo a ação do outro herbicida com ação mais lenta, resultando em antagonismo da mistura (Vidal *et al.*, 2016; Meyer *et al.*, 2020). Tal antagonismo já foi constatado para algumas misturas em *E. indica*, contendo glufosinate e glyphosate, clethodim ou dicamba (Kuds; Mathiassen, 2004; Burke *et al.*, 2005; Chuah *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2022).

O glufosinate demonstra potencial para uso em mistura com outros herbicidas de ação rápida, como os inibidores da Protoplasto, pois ambos causam o acúmulo de espécies reativas de oxigênio e levam a planta à morte. Conforme verificado por Takano *et al.* (2020c), o glufosinate potencializou a ação do saflufenacil em mistura, resultando em interação sinérgica. Avila-Neto *et al.* (2024) observaram efeito aditivo em misturas contendo glufosinate na dose de 200 e 600 g i.a. ha⁻¹ com saflufenacil, além de sinergismo na dose de 400 g i.a. ha⁻¹ com saflufenacil (10,5; 21; e 31,5 g i.a. ha⁻¹) em azevém.

Diante do exposto, evidencia-se que a mistura de glufosinate com mesotrione é uma ferramenta promissora no controle dessa espécie, como alternativa ao glyphosate, visto que a interação entre os herbicidas proporcionou incrementos no controle em relação às doses isoladas. Contudo, controles satisfatórios foram alcançados nas maiores doses (400 e 800 g i.a. ha⁻¹), tanto para o glufosinate e mesotrione isolados quanto em mistura, sendo que o controle da mistura de glufosinate com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹), nessas doses, foi próximo ao controle observado para o glufosinate isolado.

1.3.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia

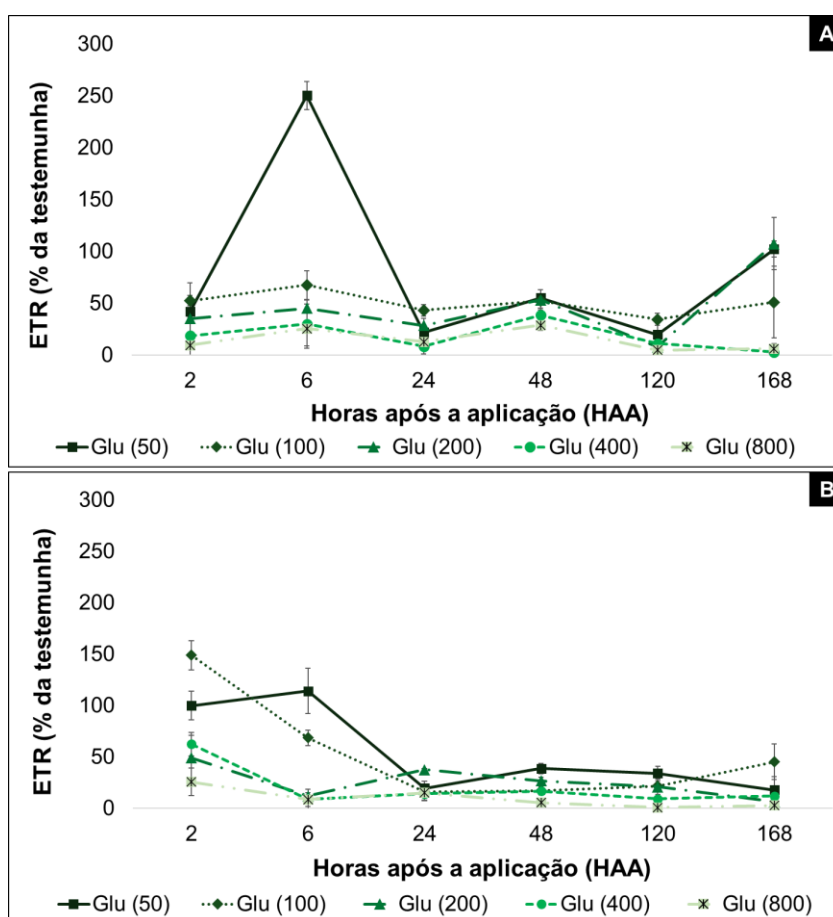
1.3.2.1 Taxa de transporte de elétrons

A taxa de transporte de elétrons no fotossistema II teve decréscimos significativos com o aumento das doses de ambos os herbicidas, isolados e em mistura, ao transcorrer do tempo, como pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

Maiores reduções da taxa de transporte de elétrons foram observadas nas maiores doses.

A curva de glufosinate isolado apresentou valores de ETR abaixo de 50% às 6 HAA, nas maiores doses (Figura 9A). Às 24 HAA todas as doses apresentaram reduções acima de 50%, seguida de recuperação e queda às 120 HAA. Após essa avaliação, a ETR apresentou aumento crescente para as doses baixas, enquanto que nas doses altas (400 e 800 g i.a. ha⁻¹) a ETR continuou próxima de zero devido aos sintomas severos ocasionados pelo glufosinate.

Figura 9 - Taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação à testemunha (%) em curvas de dose-resposta de glufosinate de amônio isolado (A) e em mistura com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) (B) aplicadas em *Eleusine indica*



Glu: glufosinate de amônio

Do mesmo modo, a curva de glufosinate com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹), apresentou comportamento semelhante (Figura 9B). Inicialmente, as menores doses apresentaram valores superiores ao tratamento sem aplicação, e as doses altas

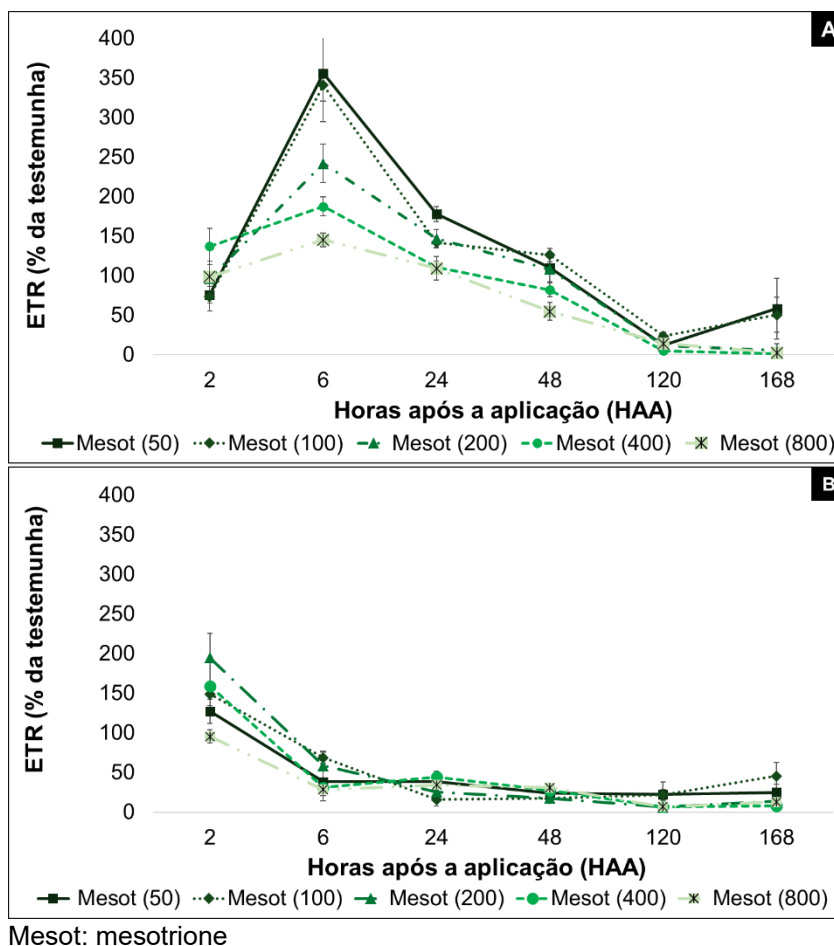
apresentaram reduções superiores a 40%. Ao longo do tempo a ETR apresentou decréscimo para todas as doses, às 24 HAA observou-se reduções superiores a 56 % para todas as doses, e essa redução se manteve durante o período avaliado.

Semelhante à curva do glufosinate, as doses crescentes de mesotrione, isoladas (Figura 10A) e em mistura (Figura 10B), reduziram a ETR. As curvas de mesotrione isolado e em mistura apresentaram, inicialmente, valores superiores à testemunha. A curva de mesotrione isolado apresentou decréscimo gradual do valor de ETR, com redução expressiva de 86,8 %, em média, às 120 HAA. Já a curva de mesotrione com glufosinate ($100 \text{ g i.a ha}^{-1}$) apresentou redução acentuada da ETR às 24 HAA (de 68,3%, em média). Às 120 HAA, a ETR foi reduzida em 87% e, após esse período, houve aumentos nos valores de ETR para as menores doses. Desse modo, o transporte de elétrons no fotossistema II permaneceu inibido durante esse período até 120 HAA e, a partir de então, as plantas se recuperaram parcialmente e emitiram folhas novas sem injúrias, promovendo o aumento da ETR para todas as curvas.

Castro (2018) observou reduções mais pronunciadas da ETR com o aumento das doses de glufosinate em *E. indica*, com maiores reduções da ETR observadas às 60 HAA para as maiores doses avaliadas. Isso corrobora parcialmente com o observado no presente trabalho, pois reduções expressivas da ETR foram observadas já às 24 HAA para todas as doses de glufosinate, isolado e em mistura, com maiores reduções observadas às 120 HAA para o glufosinate isolado. Outros trabalhos relataram redução da ETR com a aplicação de glufosinate em outras espécies, como algodão (Carbonari *et al.*, 2016), pepino (Dayan; Zaccaro, 2012), soja (Barberis, 2012), *Digitaria insularis*, *Lolium multiflorum* (Castro, 2018) e milho (Krenchinski *et al.*, 2019).

Conforme observado, a combinação de glufosinate e mesotrione intensificou a redução da ETR em relação às doses de cada herbicida aplicadas isoladamente. A redução dos valores de ETR acompanhou o controle visual das plantas, que pode ser um indicativo da fitointoxicação das plantas aos herbicidas.

Figura 10 - Taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação a testemunha (%) em curvas dose-resposta de mesotrione isolado (A) e em mistura com glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) (B) aplicadas em *Eleusine indica*



1.3.2.2 Conteúdo de pigmentos fotossintéticos

Nas Tabelas 4 e 5 observam-se as porcentagens de pigmentos fotossintéticos em relação à testemunha durante os períodos de 3 e 7 DAA. Verificou-se aos 3 e 7 DAA a interação entre os fatores para clorofila *a*, total, e para clorofila *b* aos 7 DAA. Aos 3 DAA, o glufosinate (200 g i.a ha⁻¹) isolado e todas as doses em misturas reduziram o conteúdo de clorofila *a*. Embora não tenha interação significativa entre os fatores, as misturas proporcionaram maior redução do teor de clorofila *b* em relação às doses isoladas (Tabela 4). Comportamento semelhante foi observado para a clorofila total (Tabela 5). Aos 7 DAA, as misturas dos herbicidas promoveram maiores reduções das clorofilas *a*, *b* e total em relação às doses isoladas, sem diferenças significativas entre as combinações. As combinações 100 + 100, 100 + 200, 200 + 100

e 200 + 200 g i.a. ha⁻¹ apresentaram reduções da clorofila, em média, de 72,6; 79,5; 76,0 e 71,0%, respectivamente.

Tabela 4 - Conteúdo de clorofila a e b em relação à testemunha sem aplicação (%) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isolados e em mistura aplicados em *Eleusine indica* aos 3 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Clorofila <i>a</i>						Clorofila <i>b</i>			
3 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)		0	100	200	Média	0	100	200	Média
	0	100,0 aB	108,0 aA	82,5 bA	96,8	100,0	106,7	85,6	97,4 A
	100	116,4 aA	77,7 bB	77,7 bA	90,6	101,1 a	65,2	76,9	81,1 B
	200	104,2 aAB	83,5 bB	83,5 bA	90,4	94,2	74,2	64,4	79,3 B
Média		106,8	89,8	81,2	92,6	98,4 a	82,0 b	77,3 b	85,9
Fator A			0,000**			0,006**			
Fator B			0,180 ^{ns}			0,014*			
A x B			0,000**			0,102 ^{na}			
C.V. (%)			10,14			17,98			
DMS			13,62			12,94			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0 aA	50,3 bA	37,5 cA	62,6	100,0 aA	50,6 bA	38,1 cA	62,3
	100	34,8 aB	22,5 bB	20,8 bB	26,0	50,2 aB	32,5 bB	26,9 bA	36,6
	200	29,4 aB	15,7 bB	23,0 abB	22,7	52,9 aB	26,0 bB	35,5 bA	38,1
Média		54,8	29,5	27,1	37,1	67,7	36,4	33,5	45,9
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			21,50			17,83			
DMS			11,58			11,87			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) e * significativo a 5% (p<0,05) pelo teste F; ^{ns}: não significativo.

De modo geral, as combinações dos herbicidas resultaram em maior redução do conteúdo de clorofila foliar em relação às doses isoladas, sem diferenças significativas entre as combinações. Conforme verificado anteriormente, foi identificado sinergismo da mistura nas doses de 100 + 100 g i.a. ha⁻¹, sendo que as combinações foram aditivas. Assim, esses resultados confirmam que as combinações dos herbicidas possuem efeitos aditivos e sinérgicos na degradação das clorofilas e, por consequência, na atividade fotossintética.

Poucos trabalhos na literatura relatam os efeitos fisiológicos de misturas. O resultado encontrado pelo presente estudo para *E. indica* se assemelha ao encontrado

por Wang *et al.* (2018), que também observaram maiores reduções da clorofila *a* e *b* com a aplicação da mistura mesotrione + atrazine, em relação aos herbicidas aplicados isoladamente em plantas de *Cynodon dactylon* L.

O conteúdo de carotenoides apresentou interação significativa entre as combinações de herbicidas durante o período avaliado (Tabela 5). Aos 3 DAA, apesar do conteúdo ser maior que o tratamento sem aplicação, o mesotrione, isolado e em mistura, promoveu maior redução no conteúdo de carotenoides em relação às doses de glufosinate.

Tabela 5 - Conteúdo de clorofila total e carotenoides em relação a testemunha (sem aplicação) (%) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Eleusine indica* aos 3 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Clorofila total					Carotenoides				
3 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
		0	100	200	Média	0	100	200	Média
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0abA	108,5aA	84,0bA	97,6	100,0c C	338,4aA	266,7b A	235,0
	100	112,1aA	75,5bB	81,2bA	89,6	198,3b A	230,6ab C	241,8a A	223,6
	200	101,4aA	86,1abB	79,4bA	88,9	141,1b B	271,9aB	263,3a A	225,4
	Média	104,5	90	81,6	92,0	146,4	280,3	257,3	228
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,145 ^{ns}			0,532 ^{ns}			
A x B			0,010**			0,000**			
C.V. (%)			12,44			11,62			
DMS			16,62			38,43			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0aA	54,4bA	40,6cA	64,9	100,0a A	47,7cA	67,9bA	71,9
	100	41,9aB	27,1bB	24,2bB	31,1	25,4aB	17,1aB	27,1aB	23,2
	200	38,4aB	19,9bB	28,4abAB	28,9	8,7bC	13,7abB	20,9aB	14,4
	Média	60,1	33,8	31,1	41,7	44,7	44,7	26,2	38,5
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			20,48			22,11			
DMS			12,38			11,68			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) e * significativo a 5% (p<0,05) pelo teste F; ^{ns}: não significativo.

Aos 7 DAA, todos os tratamentos apresentaram redução no conteúdo de carotenoides em relação ao tratamento sem aplicação (Tabela 5). O mesotrione na dose de 200 g i.a. ha⁻¹ isolado promoveu maior redução, seguido pelas combinações de mesotrione com glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹), de 100 + 100 e 200 + 100 g i.a. ha⁻¹, com reduções de 91,3; 82,9 e 86,3 %, respectivamente. Em mistura contendo mesotrione e atrazine, Wang *et al.* (2018) verificaram que o mesotrione foi mais eficaz na redução dos carotenoides, enquanto a mistura não diferiu do tratamento isolado na redução desse pigmento em plantas de *Cynodon dactylon*. Esse resultado é semelhante ao observado no presente estudo. Embora as combinações de mesotrione com glufosinate (200 g i.a. ha⁻¹) também tenham resultado em reduções significativas (72,9 e 79,1%), houve uma tendência de menor expressão do efeito do mesotrione na redução dos carotenoides à medida que houve aumento da dose do glufosinate.

Nota-se que o conteúdo de clorofila e carotenoides apresentou decréscimos significativos aos 7 DAA. Isso se deve ao fato de que as folhas analisadas já se apresentavam com os carotenoides formados, o que reduziu os efeitos do mesotrione na síntese desses pigmentos, visto que esse herbicida atua na inibição da síntese de carotenoides em tecidos em formação. Assim, ocorreu a inibição da síntese de novas moléculas de carotenoides, inibindo-se também a sua renovação nessas folhas (Hess; Bridges, 2003).

Outros autores também verificaram maior redução no conteúdo de pigmentos fotossintéticos aos 7 DAA com a aplicação de mesotrione ou outros inibidores da síntese de carotenoides, seguido do aumento da síntese de carotenoides (Kopsell *et al.*, 2010; Brosnan *et al.*, 2011). Outros trabalhos já constatarem a redução de clorofila com a aplicação de mesotrione isolado em plantas de *Digitaria sanguinalis* (Mccurdy *et al.*, 2009), *Lolium perene* (Mccurdy *et al.*, 2008), em milho (Sun *et al.*, 2024; Lv *et al.*, 2024), bem como a redução desse pigmento com a aplicação de glufosinate isolado em soja (Reddy *et al.*, 2011).

1.3.2.3 Atividade fotossintética

Nota-se na Tabela 6 que, aos 2 DAA, todos os tratamentos apresentaram queda acentuada na taxa de assimilação líquida de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹), principalmente os tratamentos contendo glufosinate, os quais reduziram a atividade fotossintética a

valores próximos de zero em *E. indica*. No entanto, o mesotrione isolado proporcionou maior redução da assimilação de carbono aos 5 e 7 DAA, atingindo valores próximos de zero. Esse resultado está relacionado à taxa de transporte de elétrons, que apresentou queda acentuada nesse período. A adição de mesotrione proporcionou redução significativa da atividade fotossintética em comparação aos tratamentos com glufosinate. As doses de mesotrione isoladas e em misturas com glufosinate (200 g i.a. ha⁻¹) promoveram maiores reduções da assimilação de carbono, em média de 93,4% aos 5 DAA e, sem diferença entre as misturas com glufosinate aos 7 DAA (redução média de 97,5% e 89,2%, isolado e em mistura, respectivamente). Isso pode ser explicado pela redução da taxa de transporte de elétrons e do conteúdo de clorofila e carotenoides aos 7 DAA.

Esses resultados corroboram aos resultados encontrados na literatura, que relatam reduções na taxa de assimilação de carbono e nas trocas gasosas com a aplicação isolada desses herbicidas em culturas (Lacuesta *et al.*, 1993; Bulegon *et al.*, 2019).

Em outro estudo, Creech *et al.* (2004) verificam que os herbicidas mesotrione (105 g i.a. ha⁻¹) e atrazine (280 g i.a. ha⁻¹), isolados e em mistura, reduziram a taxa de assimilação de carbono a valores mínimos em *Echinochloa crus-galli*, *Abutilon theophrasti* e *Amaranthus retroflexus*, e se mantiveram mínimos mesmo após sete dias da aplicação, com exceção para a espécie *Setaria viridis*, que apresentou recuperação da taxa fotossintética após sete dias da aplicação. Reduções de 32,9% na atividade fotossintética foram observadas em plantas de milho após a aplicação de mesotrione (Bulegon *et al.*, 2019).

Na Tabela 6, encontram-se os valores do conteúdo de carbono interno ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para *E. indica*. Observou-se que, aos 2 DAA, o conteúdo de carbono interno acompanhou a taxa de assimilação de carbono, e os tratamentos com glufosinate apresentaram maior acúmulo de carbono no mesofilo foliar devido à menor atividade fotossintética. A dose de 200 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate, isolado ou em mistura, proporcionou maior acúmulo de carbono, visto que a taxa de assimilação de carbono para essa dose foi menor. Para 5 e 7 DAA não houve interação significativa entre os herbicidas.

Como pode ser observado no tratamento sem aplicação, quanto maior a atividade fotossintética, menor foi o conteúdo de carbono interno, pois o CO₂ é consumido mais rapidamente, reduzindo suas concentrações no mesofilo foliar, ou

seja, esse parâmetro serve como um indicativo da atividade fotossintética da planta. Conforme observado por Silveira *et al.* (2013), na redução da taxa fotossintética ocorreu o aumento do carbono interno com a aplicação de mesotrione.

Tabela 6 - Conteúdo de carbono interno ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Eleusine indica* aos 2, 5 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Carbono interno					Fotossíntese				
2 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
		0	100	200	Média	0	100	200	Média
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	44,0 cB	204,0 bB	310,3 aA	186,1	24,5 aA	3,5 bA	4,2 bA	10,7
	100	199,0 bA	210,0 bB	369,7 aA	259,6	9,1 aB	2,4 bA	2,0 bA	4,5
	200	216,0 bA	276,3 abA	333,5 aA	275,3	10,1 aB	3,4 bA	2,1 bA	5,2
	Média	153,0	230,1	337,8	240,3	14,6	3,1	2,8	6,8
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,004**			0,000**			
C.V (%)			18,33			41,31			
DMS			63,89			4,08			
5 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	381,0	538,0	500,7	473,2	21,1 aA	19,8 aA	8,4 bA	16,4
	100	454,7	522,7	539,3	505,5	2,1 bB	12,2 aB	2,8 bB	5,7
	200	431,7	626,0	398,0	485,2	0,5 bB	5,3 aC	0,4 bB	2,1
	Média	422,4 b	562,2 a	479,3 ab	487,9	7,9	12,4	3,9	8,1
Fator A			0,044*			0,000**			
Fator B			0,828 ^{ns}			0,000**			
A x B			0,390 ^{ns}			0,000**			
C.V (%)			26,66			23,99			
DMS			108,99			2,80			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	482,7	658,0	705,3	615,3	20,3 aA	14,71 bA	15,3 bA	16,7
	100	401,8	676,7	593,0	557,1	0,3 bB	9,28 aB	0,9 bB	3,5
	200	479,3	702,7	656,7	612,9	0,8 aB	3,19 aC	2,5 aB	2,2
	Média	454,6 b	679,1 a	651,6 a	595,1	7,1	9,1	6,2	7,5
Fator A			0,015*			0,019*			
Fator B			0,706 ^{ns}			0,000**			
A x B			0,967 ^{ns}			0,000**			
C.V (%)			32,25			31,57			
DMS			160,77			3,42			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% ($p < 0,01$) pelo teste F; * significativo a 5% ($p < 0,05$) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Aos 2 e 7 DAA, não houve interação entre os fatores para condução estomática, enquanto para a transpiração a interação foi significativa aos 5 e 7 DAA (Tabela 7).

Tabela 7 - Condutância estomática ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) e taxa de transpiração foliar ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Eleusine indica* aos 2, 5 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Condutância estomática					Transpiração				
2 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)		0	100	200	Média	0	100	200	Média
	0	0,11	0,04	0,05	0,06 A	2,13	0,88	1,05	1,35 A
	100	0,08	0,04	0,03	0,05 B	1,66	0,93	0,79	1,12 AB
	200	0,07	0,03	0,03	0,04 B	1,49	0,77	0,70	0,99 B
Média		0,08 a	0,04 b	0,04 b	0,05	1,76 a	0,86 b	0,85 b	1,16
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,047*			
A x B			0,198 ^{ns}			0,543 ^{ns}			
C.V (%)			28,43			30,02			
DMS			0,01			0,29			
5 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0,58 aA	0,26 bA	0,07 bA	0,30	2,48 aA	2,29 aA	1,79 bA	2,19
	100	0,04 aB	0,13 aA	0,09 aA	0,09	0,87 bB	1,71 aB	0,78 bB	1,12
	200	0,17 aB	0,33 aA	0,07 aA	0,19	0,69 bB	1,70 aB	0,75 bB	1,05
	Média	0,26	0,24	0,08	0,19	1,35	1,90	1,11	1,45
Fator A			0,045 ^{ns}			0,000**			
Fator B			0,028*			0,000**			
A x B			0,029*			0,001**			
C.V (%)			97,18			19,95			
DMS			0,27			0,42			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0,08 aA	0,12 aA	0,11 aA	0,10	1,55 aA	1,07 bA	0,91 bA	1,18
	100	0,04 aB	0,03 aB	0,03 aB	0,03	0,31 bB	0,76 aAB	0,30 bB	0,46
	200	0,04 aB	0,01 aB	0,03 aB	0,03	0,31 aB	0,47 aB	0,59 aAB	0,46
	Média	0,05	0,05	0,06	0,05	0,72	0,77	0,60	0,69
Fator A			0,985 ^{ns}			0,362 ^{ns}			
Fator B			0,037*			0,000**			
A x B			0,926 ^{ns}			0,004*			
C.V (%)			138,46			42,71			
DMS			0,06			0,43			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% ($p < 0,01$) pelo teste F; * significativo a 5% ($p < 0,05$) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Aos 2 DAA, as doses de mesotrione isoladas apresentaram maior condutância e transpiração em virtude da maior atividade fotossintética em relação ao glufosinate, isolado e em mistura. Já aos 5 e 7 DAA, a transpiração para as doses de glufosinate, isolado e em mistura (100 + 100 g i.a. ha⁻¹), foram maiores devido à maior atividade fotossintética nesses tratamentos.

Verifica-se que a taxa de transpiração e a condutância estomática acompanharam o comportamento da fotossíntese ao longo do tempo (Tabela 7). Para a fotossíntese é necessário a entrada de carbono (CO_2) para posterior assimilação, então quanto maior a taxa de assimilação de carbono, maior será a condutância estomática e, conseqüentemente, a taxa de transpiração.

Com a perda de clorofila, danos ao aparato fotossintético ao longo do tempo e a conseqüente redução da capacidade de fixação de carbono, a demanda por CO_2 é reduzida. Assim, há limitação na abertura estomática e aumento da resistência à difusão de gases, ou seja, limita as trocas gasosas da folha. Essa limitação reduz a entrada de CO_2 e saída de água pelos estômatos reduzindo a transpiração, por esse mecanismo a planta regula a perda de água e a absorção de CO_2 , uma vez que a mesma está sob estresse (Taiz *et al.*, 2017).

1.3.2.4 Conteúdo de amônia

O conteúdo de amônia foi significativamente alterado com a aplicação de glufosinate de amônio (Tabela 8), sendo o maior acúmulo observado para a dose de 200 g i.a. ha^{-1} de glufosinate, aplicado isolado ou associado a 100 g ha^{-1} de mesotrione. Em relação à dose de 200 g ha^{-1} de mesotrione, houve menor concentração de amônia apenas quando não foi aplicado o glufosinate em mistura

Observou-se que o aumento no acúmulo de amônia acompanhou o aumento da dose de glufosinate e, inicialmente, as misturas apresentaram menores teores de amônia em relação à respectiva dose de glufosinate isolada (Figura 11). Já aos 3 DAA, a dose de 200 g i.a. ha^{-1} de glufosinate, isolada e em mistura, apresentou os maiores acúmulos de amônia, contudo, a mistura de 200 g i.a. ha^{-1} de glufosinate e 100 g i.a. ha^{-1} de mesotrione teve maior acúmulo (568,32 mg). Aos 7 DAA, observa-se maior acúmulo de amônia, sem diferenças significativas entre a dose de 200 i.a. ha^{-1} de glufosinate isolada e associada a 100 i.a. ha^{-1} de mesotrione.

Como já mencionado, o glufosinate de amônio inibe a atividade da enzima glutamina sintetase, bloqueando a conversão de amônia e glutamato em glutamina. Dessa forma, a planta passa a acumular amônia proveniente da fotorrespiração. Assim, a quantificação do acúmulo de amônia pode ser utilizada como indicador para caracterizar a inibição da atividade da enzima glutamina sintetase em plantas tratadas

com glufosinate de amônio e para avaliar a atividade desse herbicida (Carbonari *et al.*, 2016; Brito *et al.*, 2017; Krenchinski *et al.*, 2019).

Tabela 8 - Acúmulo de amônia em *Eleusine indica* aos 1, 3 e 7 dias após a aplicação (DAA) de doses de glufosinate de amônio e mesotrione aplicados isolados e em mistura.

Concentração de amônia (mg kg ⁻¹ massa fresca)				
1 DAA				
Glufosinate de amônio (g i.a. ha ⁻¹)				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0	100	200
		2,06 cA	157,28 bA	245,68 aA
	100	2,66 cA	53,18 bB	104,13 aB
	200	3,49 bA	73,97 aB	72,14 aB
Fator A			0,000**	
Fator B			0,000**	
A x B			0,000**	
C.V. (%)			27,86	
DMS			32,10	
3 DAA				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	1,84 cA	319,45 bB	462,64 aB
	100	5,61 cA	318,89 bB	568,32 aA
	200	5,70 bA	411,22 aA	415,54 aB
Fator A			0,000**	
Fator B			0,059 ^{ns}	
A x B			0,000**	
C.V. (%)			12,73	
DMS			51,50	
7 DAA				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	2,66 cA	704,57 bB	1345,41 aA
	100	7,29 cA	727,94 bB	1383,19 aA
	200	9,08 cA	926,93 bA	1087,79 aB
Fator A			0,000**	
Fator B			0,328 ^{ns}	
A x B			0,000**	
C.V. (%)			7,56	
DMS			75,46	

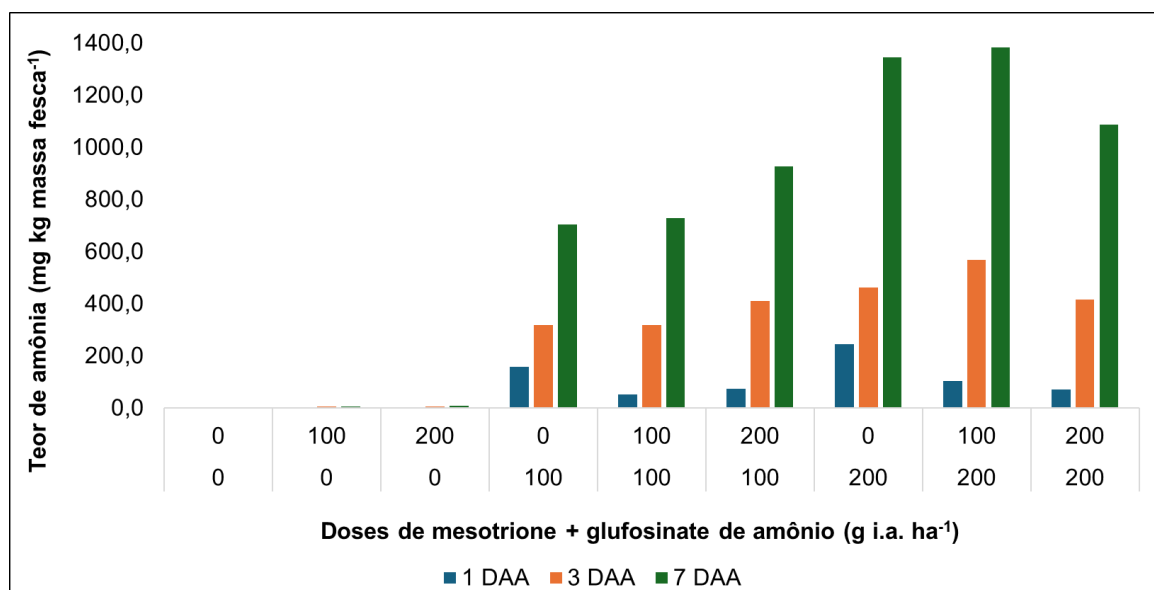
Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F (p<0,05).

Nesse sentido, observou-se que a adição de mesotrione (200 g i.a. ha⁻¹) ao glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) resultou no aumento do acúmulo de amônia em relação à dose isolada de glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹). Quando o mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) foi adicionado ao glufosinate (200 g i.a. ha⁻¹), o acúmulo de amônia não diferiu em relação à dose de glufosinate isolada. Assim, a interação entre essas moléculas pode interferir no acúmulo de amônia pelas plantas. Ao avaliarem o acúmulo de amônia em misturas

contendo glufosinate, em plantas de milho resistentes ao glyphosate e ao glufosinate, Krenchinski *et al.* (2019) observaram que a associação de glufosinate (500 g i.a. ha⁻¹) com carfentrazone-ethyl (30 g i.a. ha⁻¹), bentazon (720 g i.a. ha⁻¹) ou 2,4-D (1.005 g e.a. ha⁻¹) aumentou a concentração de amônia, enquanto a associação com mesotrione (192 g i.a. ha⁻¹) não diferiu em relação ao glufosinate aplicado isoladamente.

Outros trabalhos também têm apresentado aumento na concentração de amônia com a aplicação do glufosinate de amônio em *Amaranthus palmeri* (Coetzer; Al-Khatib, 2001), *Lolium rigidum* (Takano *et al.*, 2019), *Abutilon theophrasti* (Sellers *et al.*, 2004), *Chenopodium álbum*, *Solanum nigrum*, *Tripleurospermum inodorum* e *Echinochloa crus-galli* (Manderscheid *et al.*, 2005), *Eleusine indica*, *Digitaria insularis*, *Lolium multiflorum*, *Ipomoea grandifolia* e *Euphorbia heterophylla* (Castro, 2018).

Figura 11 - Conteúdo de amônia aos 1, 3 e 7 dias após a aplicação (DAA) de mesotrione e glufosinate de amônio



Conforme discutido anteriormente, a mistura de glufosinate e mesotrione apresentou interação sinérgica e aditiva no controle de *E. indica*. A mistura desses herbicidas intensificou as alterações nas respostas fisiológicas que acompanharam o controle. A ETR foi significativamente reduzida quando o glufosinate foi associado ao mesotrione. Paralelamente, a mistura dos herbicidas promoveu redução do conteúdo de clorofila e, associada ao acúmulo de amônia, resultou na inibição da atividade

fotossintética. Tais respostas fisiológicas podem ser relacionadas à ação que cada molécula desempenha no metabolismo da planta.

O glufosinate ao inibir a glutamina sintetase promove rápido acúmulo de amônia fotorrespiratória nas células. Esse acúmulo desencadeia uma série de efeitos, levando à inibição da síntese de aminoácidos e proteínas (Lea, 1991; Wild; Wendler; 1991), além de interromper a fotorrespiração devido à depleção de compostos intermediários do ciclo de Calvin, de modo a inibir a atividade da enzima Rubisco e a assimilação de carbono (Sauer *et al.*, 1987; Dayan; Duke, 2014). A inibição da Rubisco causa desequilíbrio na transferência energia dos elétrons, em consequência, o excesso de elétrons nos fotossistemas se ligam à molécula de O₂ originada na quebra da água formando radicais livres (espécies reativas de oxigênio). O acúmulo dessas ERO no cloroplasto leva à peroxidação de membranas, danos ao aparato fotossintético e rápida morte celular (Carvalho, 2013; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020a).

Por outro lado, o mesotrione bloqueia a síntese de carotenoides e reduz os níveis de plastoquinona e α -tocoferóis. O decréscimo dos níveis de plastoquinona no fotossistema II interfere no fluxo de elétrons entre os fotossistemas. Além disso, a redução da concentração de carotenoides no cloroplasto leva à perda da fotoproteção de clorofilas, resultando na degradação das mesmas. Como consequência, pode comprometer a estabilidade dos fotossistemas e afetar a capacidade do complexo antena dos fotossistemas em captar energia luminosa, reduzindo o transporte de elétrons e inibir a capacidade fotossintética (Mccurdy *et al.*, 2008). Na ausência de carotenoides, o excesso de energia absorvida pelas clorofilas não é dissipado na forma de calor e, associado à redução de α -tocoferol, pode favorecer a geração de clorofila triplet e oxigênio singlet. Essa condição leva à perda da capacidade de neutralizar essas moléculas, aumentando assim, os danos às proteínas do fotossistema II e degradação das clorofilas (Hess; 2000; Trebst *et al.*, 2002).

Considerando-se o modo de ação desses herbicidas no metabolismo da planta é possível que um herbicida complemente a ação do outro. O mesotrione, ao inibir a síntese de carotenoides e α -tocoferol, reduz a capacidade antioxidante da planta e pode contribuir para intensificar os danos causados pelo estresse oxidativo promovido pelo glufosinate (Trebst *et al.*, 2002; Kruse *et al.*, 2006; Takano *et al.*, 2020a). Os resultados observados sugerem uma possível interação fisiológica entre as moléculas, uma vez que a mistura intensificou tanto o controle quanto as alterações nas respostas

fisiológicas. Embora mecanismos diretos como absorção, translocação, metabolismo e estresse oxidativo não tenham sido avaliados. Portanto, novos estudos são necessários para compreender quais mecanismos bioquímicos e fisiológicos estão envolvidos na interação sinérgica desses herbicidas.

1.4 CONCLUSÕES

A mistura de glufosinate de amônio com mesotrione apresenta potencial de uso no controle de *Eleusine indica* resistente ao glyphosate. Essa mistura apresenta interações sinérgicas quando o glufosinate ($100 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) é associado às doses de mesotrione e interação aditiva quando o mesotrione ($100 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) é associado às doses de glufosinate. Entretanto, acredita-se que novos estudos sejam necessários para avaliar quais combinações de doses de glufosinate e mesotrione apresentam maior eficácia de controle dessa espécie em campo.

As respostas fisiológicas indicam alterações associadas à inibição da atividade fotossintética, redução dos pigmentos, queda da ETR e acúmulo de amônia. Esses efeitos sugerem possível interação fisiológica entre as moléculas, embora estudos adicionais sejam necessários para avaliar quais mecanismos fisiológicos ou bioquímicos podem ter contribuído para a interação sinérgica da mistura.

REFERÊNCIAS

- ABENDROTH, J. A.; MARTIN, A. R.; ROETH, F. W. Plant response to combinations of mesotrione and photosystem II inhibitors. **Weed Technology**, v. 20, n. 1, p. 267-274, 2006.
- AVILA-NETO, R.; ULGUIM, A. R.; SCHNEIDER, T.; FORTUNA, C.; HOLKEM, A. S.; SOMAVILLA, I. P. Interaction between saflufenacil and ammonium glufosinate to control ryegrass. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e286456, 2024.
- BARBERIS, L. R. M. **Metodologia para determinação de efeitos fisiológicos e metabólicos do glufosinate em soja**. 2012. 66 f. Tese (Doutorado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.
- BARBIERI, G. F.; YOUNG, B. G.; DAYAN, F. E.; STREIBIG, J. C.; TAKANO, H.; MEROTTO JUNIOR, A.; AVILA, L. A. Herbicide mixtures: interactions and modeling. *Advances in Weed Science*, v. 40, n. 1, p. e020220051, 2022.
- BAYER. Vyconic™ soybeans. Bayer Global, 2026. Disponível em: <<https://www.bayer.com/en/agriculture/vyconic>> Acesso em: 10 ago. 2026.
- BESANÇON, T. E.; PENNER, D.; EVERMAN, W.J. Reduced translocation is associated with antagonism of glyphosate by glufosinate in giant foxtail (*Setaria faberi*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science**, v. 66, p.159-167, 2018.
- BETHKE, R. K.; MOLIN, W. T.; SPRAGUE, C.; PENNER, D. Evaluation of the Interaction between Glyphosate and Glufosinate. **Weed Science**, v. 61, p. 41-47, 2013.
- BRITO, I. P. F. S.; MORAES, C. P.; MARCHESI, B. B.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Sensitivity of morningglory plants and their progenies to glufosinate ammonium. **Planta Daninha**, v. 35, p. e017159881, 2017.
- BROSNAN, J. T.; KOPSELL, D. A.; ARMEL, G. R.; MCELROY, J. S. Changes in 'Riviera' bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] carotenoid pigments after treatment with three p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase-inhibiting herbicides. **HortScience**, v. 46, n. 3, p. 493-498, 2011.
- BULEGON, L. G.; GUIMARÃES, V. F.; LAURETH, J. C. U.; BATTISTUS, A. G.; INAGAKI, A. M. Intoxicação por mesotriona em milho inoculado com *Azospirillum brasilense* e com aplicação de reguladores de crescimento vegetal. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019188937, 2019.
- BURKE, I. C.; ASKEW, S. D.; CORBETT, J. L.; WILCUT, J. W. Glufosinate antagonizes clethodim control of goosegrass (*Eleusine indica*). **Weed Technology**, v. 19, n. 3, p. 664-668, 2005.

CALDAS, J. V. S.; SILVA, A. G.; BRAZ, G. B. P.; PROCÓPIO, S. O.; TEIXEIRA, I. R.; SOUZA, M. F. Weed competition on soybean varieties from different relative maturity groups. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 1-12, 2023.

CARBONARI, C. A.; LATORRE, D. O.; GOMES, G. L. G. C.; VELINI, E. D.; OWENS, D. K.; PAN, Z.; DAYAN, F. E. Resistance to glufosinate is proportional to phosphinothricin acetyltransferase expression and activity in LibertyLink® and WideStrike® cotton. **Planta Daninha**, v. 243, n. 4, p. 925-933, 2016.

CARVALHO, L. B. DE. **Herbicidas**. Lages, SC, 1 ed. 62 p. 2013.

CASTRO, E. B. **Efeito da aplicação diurna e noturna de glufosinate no acúmulo de amônia, taxa de transporte de elétrons e controle de plantas daninhas**. 2018. Tese (Doutorado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2018.

CHUAH, T. S.; TWH, H. H.; CHA, T. S.; ISMAIL, B. S. Antagonismo da atividade do glufosinato de amônio causado pelo glifosato nas misturas de tanque usadas para o controle de capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica* Gaertn.). **Plant Protection Quarterly**, v. 23, n. 3, p. 116-119, 2018.

COETZER, E.; AL-KHATIB, K. Inibição fotossintética e acúmulo de amônio em amaranto-palmer após aplicação de glufosinato. **Weed Science**, v. 49, n. 4, p. 454-459, 2001.

COLBY, S. R. Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations. **Weeds**, v. 15, n. 1, p. 20–22, 1967.

CREECH, J. E.; MONACO, T. A.; EVANS, J. O. Photosynthetic and growth responses of *Zea mays* L. and four weed species following post-emergence treatments with mesotrione and atrazine. **Pest Management Science**, v. 60, n. 11, p. 1079-1084, 2004.

DAYAN, F. E.; ZACCARO, M. L. M. Chlorophyll fluorescence as a marker for herbicide mechanisms of action. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 102, n. 3, p. 189-197, 2012.

DAYAN, F. E.; DUKE, S. O. Natural compounds as next generation herbicides. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1090-1105, 2014.

DAYAN, F. E.; OWENS, D.K.; CORNIANI, N.; SILVA, M. L.; WATSON, S. B.; HOWELL, J'L.; SHANER, D. L. Biochemical markers and enzyme assays for herbicide mode of action and resistance studies. **Weed Science**, v. 63, n. 1, p. 23-63, 2015.

DAYAN, F. E. Current Status and Future Prospects in Herbicide Discovery. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 341, 2019.

DE GOES MACIEL, C. D. *et al.* Potencialization of mesotrione efficiency in tank mixture with inhibiting of Photosystem II by distinct absorption pathways of crabgrass. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 210-219, 2013.

FLUTTERT, J. C.; SOLTANI, N.; GALLA, M.; HOOKER, D. C.; ROBINSON, D. E.; SIKKEMA, P. H. Interaction between 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase–inhibiting and reactive oxygen species–generating herbicides for the control of annual weed species in corn. **Weed Science**, v. 70, n. 4, p. 423-435, 2022a.

FLUTTERT, J. C.; SOLTANI, N.; GALLA, M.; HOOKER, D. C.; ROBINSON, D. E.; SIKKEMA, P. H. Additive and synergistic interactions of 4- hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) and photosystem II (PSII) inhibitors for the control of glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) in corn. **Weed Science**, v. 70, n. 3, p. 319–327, 2022b.

GANIE, Z. A.; JHALA, A. J. Interaction of 2,4-D or dicamba with glufosinate for control of glyphosate-resistant giant ragweed (*Ambrosia trifida* L.) in glufosinate-resistant maize (*Zea mays* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1207, 2017.

HEAP, I. **The International Herbicide-Resistant Weed Database**. 2026. Disponível em: <http://www.weedscience.org>. Acesso em: 20 jun. 2026.

HESS, F. D. Review: Light-dependent herbicides: an overview. **Weed Science**, v. 48, n. 2, p. 160-170, 2000.

HESS, F. D.; BRIDGES, D. Mode of action of carotenoid biosynthesis inhibitors. In: **HERBICIDE ACTION COURSE**. West Lafayette: Purdue University, 2003. p. 383-396.

JONES, E. A. L.; LEON, R. G.; EVERMAN, W. J. Control of pervasive row crop weeds with dicamba and glufosinate applied alone, mixed, or sequentially. **Weed Technology**, v. 36, n. 5, p. 733-739, 2022.

JOSEPH, D. D.; MARSHALL, M. W.; SANDERS, C. H. Efficacy of 2,4-D, dicamba, glufosinate and glyphosate combinations on selected broadleaf weed heights. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, p. 1321-1333, 2018.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**: Tomo III. 2. ed. São Paulo: Basf, 2000. 725 p.

KOPSELL, D. A.; BROSNAN, J. T.; ARMEL, G. R.; MCELROY, J. S. Increases in bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] tissue pigments during post-application recovery from mesotrione. **HortScience**, v. 45, n. 10, p. 1559-1562, 2010.

KRENCHINSKI, F. H.; CESCO, V. J. S.; CASTRO, E. B.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Ammonium glufosinate associated with post-emergence herbicides in corn with the CP4-EPSPS and Pat Genes. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019184453, 2019.

KRUSE, N. D.; VIDAL, R. A.; TREZZI, M. M. Curvas de resposta e isoblograma como forma de descrever a associação de herbicidas inibidores do fotossistema II e da síntese de carotenóides. **Planta Daninha**, v. 24, n. 3, p. 579-587, 2006.

KUDSK, P.; MATHIASSEN, S. K. Joint action of amino acid biosynthesis-inhibiting herbicides. **Weed Research**, v. 44, n. 4, p. 313-322, 2004.

LACUESTA, M.; MUÑOZ-RUEDA, A.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; SIVAK, M. N. Effect of phosphinothricin (glufosinate) on photosynthesis and chlorophyll fluorescence emission by barley leaves illuminated under photorespiratory and non-photorespiratory conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 43, n. 2, p. 159-165, 1993.

LEA, P. J. The inhibition of ammonia assimilation: a mechanism of herbicide action. In: BAKER, N. R.; PERCIVAL, M. P. (ed.). **Herbicides**. New York: Elsevier, 1991. p. 267-297.

LEE, D. L.; PRISBYLLA, M. P.; CROMARTIE, T. H.; DAGARIN, D. P.; HOWARD, S. W.; PROVAN, W. M.; ELLIS, M. K.; FRASER, T.; MUTTER, L. C. The discovery and structural requirements of inhibitors of p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase. **Weed Science**, v. 45, n. 5, p. 601-609, 1997.

LU, Y.; LI, Y.; YANG, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; PENG, X.-X. Suppression of glycolate oxidase causes glyoxylate accumulation that inhibits photosynthesis through deactivating Rubisco in rice. **Physiologia Plantarum**, v. 150, n. 3, p. 463-476, 2014.

LV, G.; LI, X.; WANG, T.; WU, Z.; FANG, R.; CHEN, J. Mechanisms Underlying the Differential Sensitivity to Mesotrione in Sweet Corn. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 555, 2024.

MANDERSCHIED, R.; SCHAAF, S.; MATTSSON, M.; SCHJOERRING, J. K. Glufosinate treatment of weeds results in ammonia emission by plants. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 109, n. 1-2, p. 129-140, 2005.

MATRINCE, M.; SAILLAND, A.; PELISSIER, B.; ROLLAND, A.; ZINK, O. p-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitor-resistant plants. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 61, n. 3, p. 269-276, 2005.

MCCURDY, J. D.; MCELROY, J. S.; KOPSELL, D. A.; SAMS, C. E.; SOROCHAN, J. C. Efeitos do mesotrione nas concentrações de carotenóides do azevém perene (*Lolium perenne* L.) sob diferentes condições ambientais. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 19, p. 9133-9139, 2008.

MCCURDY, J. D.; MCELROY, J. S.; KOPSELL, D. A.; SAMS, C. E. Controle de mesotrione e concentração de pigmentos em capim-caranguejo (*Digitaria sanguinalis*) sob diferentes condições ambientais. **Pest Management Science**, v. 65, n. 6, p. 640-644, 2009.

MEYER, C. J.; PETER, F.; NORSWORTHY, J. K.; BEFFA, R. Uptake, translocation, and metabolism of glyphosate, glufosinate, and dicamba mixtures in *Echinochloa crus-galli* and *Amaranthus palmeri*. **Pest Management Science**, v. 76, n. 9, p. 3078-3087, 2020.

MITSCHERLICH, E. A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtschaftliches Jahrbuch**, v. 38, p. 537-552, 1909.

MONQUERO, P. A.; SILVA, A. C.; HIRATA, A. C. S. Eficácia de herbicidas aplicados em diferentes épocas e espécies daninhas em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente. **Planta Daninha**, v. 27, n. 2, p. 309-317, 2009.

OLIVEIRA, R. S.; INOUE, M. H. Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas. In: OLIVEIRA, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p. 243-261.

PALHARINI, W. G. **Mapeamento e alternativas de controle para o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica* L.) resistente aos herbicidas inibidores de ACCase e EPSPs**. 2024. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2024.

REDDY, K. N.; ZABLOTOWICZ, R. M.; BELLALLOUI, N.; DING, W. Glufosinate effects on nitrogen nutrition, growth, yield, and seed composition in glufosinate-resistant and glufosinate-sensitive soybean. **International Journal of Agronomy**, v. 2011, p. 1-12, 2011.

RUDELL, E. C.; PETROLI, I. D. S.; SANTOS, F. M.; FRANDALOSO, D.; SILVA, D. R. O. Weed interference capacity on soybean yield. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 74, n. 2, p. 9541-9547, 2021.

SAUER, H.; WILD, A.; RÜHLE, W. The effect of phosphinotricin (glufosinate) on photosynthesis. II. The causes of inhibition of cell photosynthesis. **Verlag der Zeitschrift für Naturforschung**, v. 42, n. 3, p. 270-278, 1987.

SELLERS, B. A.; SMEDA, R. J.; LI, J. Glutamine synthetase activity and ammonium accumulation is influenced by time of glufosinate application. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 78, n. 1, p. 9–20, 2004.

SILVEIRA, H. M.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; NETO, M. D. C.; CARVALHO, F. P.; SANTOS, J. B.; SILVA, A.A. Características fisiológicas de cultivares de mandioca após aplicação do mesotrione. **Planta Daninha**, v. 31, n. 2, p. 403-409, 2013.

SILVEIRA, R. F.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; GOMES, G. L. G. C. Interacting effects on absorption and translocation of ¹⁴C-mesotrione and ¹⁴C-atrazine mixture for morning glory (*Ipomoea hederifolia*) control. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, p. 563-573, 2020.

SOLTANI, N.; SHROPSHIRE, C.; SIKKEMA, P. H. Weed control in dicamba-resistant soybean with glyphosate/dicamba applied at various doses and timings.

International Journal of Agronomy, v. 2020, p. 8903941, 2020.

SOUZA, M. F.; HENCKES, J. R.; ZOBIOLE, L. H. S.; OLIVEIRA JR., R. S.; BRAZ, G. B. P.; CONSTANTIN, J. Competitive response of maize against glyphosate-resistant *Digitaria insularis* and *Eleusine indica*. **Crop Protection**, v. 183, p. 106760, 2024.

SUN, S.; WANG, L.; WANG, S.; YU, N.; ZHONG, X. Photosynthetic and Physiological Responses of Different Maize Varieties to Mesotrione. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1701, 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TAKANO, H. K.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; BRAZ, G. B. P.; GHENO, E. A. Growth, Development and Seed Production of Goosegrass. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 249-258, 2016.

TAKANO, H. K.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; SILVA, V. F. V.; MENDES, R. R. Chemical control of glyphosate-resistant goosegrass. **Planta Daninha**, v. 36, p. e018176124, 2018.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Reactive oxygen species trigger the fast action of glufosinate. **Planta**, v. 249, p. 1837-1849, 2019.

TAKANO, H. K.; DAYAN, F. E. Glufosinate-ammonium: a review of the current state of knowledge. **Pest Management Science**, v. 76, n. 11, p. 3911–3925, 2020.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. Physiological factors affecting uptake and translocations of glufosinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 68, p. 3026-3032, 2020a.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. A novel insight into the mode of action of glufosinate: how reactive Oxygen species are formed. *Photosynthesis Research*, v. 144, p. 361-372, 2020b.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Glufosinate enhances the activity of protoporphyrinogen oxidase inhibitors. **Weed Science**, v. 68, n. 4, p. 324-332, 2020c.

TEJADA, J. L.; BARROSO, A. A. M.; SOLIS-ROSAS-DIAZ, L. F.; ALVARADO-HUAMÁN, L.; SILVA, E.; ALVES, P. L. C. A. Herbicidas pós-emergentes para o controle do capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica* L.) nos estádios de pré-perfilhamento e em perfilhamento. **Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica**, v. 27, n. 1, e2361, 2024.

TREBST, A.; DEPKA, B.; HOLLÄNDER-CZYTKO, H. A specific role for tocopherol and of chemical singlet oxygen quenchers in the maintenance of photosystem II

structure and function in *Chlamydomonas reinhardtii*. **FEBS Letters**, v. 516, p. 156–160, 2002.

VIDAL, R. A.; QUEIROZ, A. R. S.; TREZZI, M. M.; KRUSE, N. D. Association of glyphosate with other agrochemicals: the knowledge synthesis. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, n. 1, p. 39-47, 2016.

WANG, Y.; YU, J.; ZHOU, B.; SAPKOTA, S.; WEI, F.; WANG, Z. Atrazine and mesotrione-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes and chlorophyll contents in bermudagrass. **Planta Daninha**, v. 36, p. e018172227, 2018.

WENDLER, C.; BARNISKE, M.; WILD, A. Effect of phosphinothricin (glufosinate) on photosynthesis and photorespiration of C3 and C4 plants. **Photosynthesis Research**, v. 24, p. 55–61, 1990.

WILD, A.; WENDLER, C. Effect of glucosinate (phosphinothricin) on amino acid content, photorespiration and photosynthesis. **Pesticide Science**, v. 30, p. 422–424, 1991.

WILD, A.; WENDLER, C. Inhibitory action of glufosinate on photosynthesis. **Zeitschrift für Naturforsch**, v. 48, n. 3-4, p. 369–373, 1993.

ZHANG, J.; HAMILL, A. S.; WEAVER, S. E. Antagonism and synergism between herbicides: trends from previous studies. **Weed Technology**, v. 9, n. 1, p. 86-90, 1995.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO FISIOLÓGICA DA INTERAÇÃO ENTRE MESOTRIONE E GLUFOSINATE DE AMÔNIO NO CONTROLE DE *Borreria spinosa* (Cham. &Schltdl.)

RESUMO

O uso intensivo de glyphosate aumentou a frequência de espécies tolerantes a esse herbicida em áreas agrícolas, a exemplo da espécie *Borreria spinosa*. A emergência desuniforme dessa espécie resulta em escapes e plantas em avançado estágio de desenvolvimento, o que compromete a eficácia dos herbicidas. Nessa situação, torna-se necessário o uso de diferentes estratégias de manejo, como a mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, bem como aplicações sequenciais. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar a interação da mistura de mesotrione e glufosinate de amônio na eficácia de controle e os efeitos na atividade fotossintética em *Borreria spinosa*. Os ensaios foram conduzidos em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Para avaliar a eficácia de controle realizaram-se quatro curvas de dose-resposta, sendo as doses: 0, 50, 100, 200, 400 e 800 g i.a. ha⁻¹ dos herbicidas glufosinate de amônio e mesotrione, isolados, e combinados com 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione ou de glufosinate. Além disso, para avaliar a interação da mistura sobre a atividade fotossintética, um segundo ensaio foi conduzido em esquema fatorial 3x3, sendo os fatores doses de mesotrione e de glufosinate (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹). Os parâmetros avaliados foram: controle visual aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA); massa fresca da parte aérea aos 28 DAA; taxa de transporte de elétrons (ETR) às 3, 6, 24, 48, 120 e 168 horas após a aplicação (HAA); teor de clorofila e carotenoides aos 3 e 7 DAA; taxa fotossintética aos 2, 5 e 7 DAA e conteúdo de amônia aos 1, 3 e 7 DAA. Os dados obtidos foram submetidos à ANOVA e as médias comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Avaliou-se a interação das misturas comparando-se os valores observados de controle e massa fresca da parte aérea com os valores estimados pela equação de Colby. Observou-se interações aditivas das misturas. Os herbicidas isolados e em mistura interferiram na atividade fotossintética, promovendo reduções significativas na ETR, nos teores dos

pigmentos fotossintéticos e na assimilação de carbono. Conclui-se que a mistura é uma estratégia promissora no manejo de *Borreria spinosa*.

Palavras-chave: *Borreria spinosa*; glufosinate de amônio; interação; mesotrione.

Abstract

The intensive use of glyphosate has increased the prevalence of weed species tolerant to this herbicide in agricultural systems, including *Borreria spinosa*. The prolonged emergence pattern of this species results in weed escapes and plants reaching advanced growth stages, thereby reducing herbicide efficacy. Under these conditions, the adoption of different management strategies, such as herbicide tank mixtures with different mode of action, and sequential applications, becomes essential. Therefore, the objective of this study was to evaluate the interaction between mesotrione and ammonium glufosinate applied as a tank mixture regarding weed control efficacy and their effects on the photosynthetic activity of *Borreria spinosa*. The experiments were conducted under greenhouse conditions using a completely randomized design with four replications. Weed control efficacy was assessed through four curve dose-response experiments using herbicide rates of: 0, 50, 100, 200, 400, and 800 g a.i. ha⁻¹ of ammonium glufosinate and mesotrione applied alone or mixed with 100 g a.i. ha⁻¹ of mesotrione or ammonium glufosinate. In addition, to evaluate the interaction of the herbicide mixture on photosynthetic activity, a second experiment was conducted in a 3 x 3 factorial arrangement, with mesotrione and ammonium glufosinate rates (0, 100, and 200 g a.i. ha⁻¹) as the factors. The evaluated variables included visual weed control at 3, 7, 14, 21, and 28 days after application (DAA); shoot fresh biomass at 28 DAA; electron transport rate (ETR) at 3, 6, 24, 48, 120, and 168 hours after application (HAA); chlorophyll and carotenoid contents at 3 and 7 DAA; net photosynthetic rate at 2, 5, and 7 DAA; and ammonia content at 1, 3, and 7 DAA. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and treatment means were compared using Student's *t*-test ($p < 0.05$). Herbicide interactions were evaluated by comparing the observed values for weed control and shoot fresh biomass with the expected values estimated according to Colby's equation. Additive interactions were observed for the herbicide mixtures. Herbicides applied alone and in combination interfered with photosynthetic activity, resulting in significant reductions in ETR, photosynthetic pigment contents, and carbon assimilation. These results demonstrate

that the mesotrione plus ammonium glufosinate mixture represents a promising strategy for the management of *Borreria spinosa*.

Keywords: *Borreria spinosa*; ammonium glufosinate; interaction; mesotrione.

2.1 INTRODUÇÃO

A vassourinha-de-botão tem ganhado grande importância, pois sua frequência tem aumentado em áreas agrícolas do Mato Grosso, Goiás e regiões do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), com expansão para outras áreas. O aumento de sua frequência tem sido associado à adoção de culturas resistentes ao glyphosate e à tolerância da vassourinha-de-botão a esse herbicida, que pode ter intensificado sua seleção nessas áreas (Correia *et al.*, 2026).

No Brasil, são encontradas várias espécies de plantas daninhas que são denominadas como vassourinha-de-botão. Essas espécies pertencem à família Rubiaceae, sendo os principais gêneros *Borreria* e *Mitracarpus*. Devido às semelhanças entre as espécies há conflitos na identificação e classificação das mesmas (Kissman; Groth, 2000; Nepomuceno *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2020). Em campo, as espécies desses gêneros, a exemplo das espécies *Borreria spinosa* e *Mitracarpus hirtus*, são comumente confundidas e identificadas erroneamente como *Borreria verticillata* (sín. *Spermacoce verticillata*). Essa dificuldade ocorre em razão desses gêneros apresentarem características morfológicas semelhantes e variações fenotípicas dentro da espécie, dificultando a correta identificação. A identificação errada dessas espécies pode impactar diretamente na eficácia de controle, pois cada espécie pode apresentar uma resposta diferente aos herbicidas (Correia, 2023).

A vassourinha-de-botão apresenta características morfológicas e fisiológicas que dificultam o controle, como a elevada produção de sementes, os fluxos desuniformes de emergência (Martins, 2008), a capacidade de rebrota após o início das chuvas (para espécies perenes), estimulada pela presença de reservas nas raízes (Minozzi, 2022), e a redução da eficácia de controle com o crescimento da planta (Lima *et al.*, 2019; Andrade Júnior, 2020). Essas características têm contribuído para a ocorrência de controles ineficientes e para a expansão e consolidação dessas espécies nas áreas agrícolas.

O controle dessas espécies é realizado quase que exclusivamente por glyphosate. Entretanto, observam-se controles ineficientes quando aplicado em

plantas com mais de oito folhas expandidas ou em rebrotes, sendo necessário o uso de doses altas, uma vez que a mesma apresenta tolerância a esse herbicida devido à menor absorção e translocação em plantas adultas (Fadin *et al.*, 2018; Fadin; Monquero, 2019; Lima *et al.*, 2019; Correia, 2023). Nesse sentido, tem-se realizado a mistura de herbicidas para o controle dessa planta daninha como, por exemplo, a mistura de glyphosate e 2,4-D, entretanto, essa mistura apresenta efeito antagônico em vassourinha-de-botão (*Borreria verticillata*) (Minozzi, 2022). Algumas associações ao glyphosate não têm apresentado controles eficientes em plantas adultas ou rebrotes, contudo, quando associado com flumioxazina, saflufenacil, carfentrazone e cloransulam tem-se observado controles satisfatórios (Fadin *et al.*, 2018; Lima *et al.*, 2019).

Outros herbicidas têm apresentado controles excelentes para vassourinha-de-botão, como o glufosinate de amônio. Entretanto, assim como para outros herbicidas, a eficácia do glufosinate diminui com o crescimento da planta sendo necessário a associação com outros herbicidas. Nesse contexto, misturas de glufosinate com inibidores da Protox (flumioxazin), e inibidores do fotossistema II (atrazine e terbutilazine) com inibidores de carotenoides (mesotrione e tembotrione) têm apresentado controles satisfatórios em plantas adultas (Andrade Júnior, 2020; Ikeda *et al.*, 2025). Assim, a utilização de misturas tem sido uma estratégia importante no manejo de vassourinha-de-botão aumentando a eficácia de controle dos herbicidas, principalmente sobre plantas adultas.

No entanto, os herbicidas utilizados no controle de vassourinha-de-botão são registrados apenas para *Borreria verticillata*, enquanto para *Borreria spinosa*, espécie de maior ocorrência no Cerrado, ainda não há herbicidas registrados (Correia, 2023; Brasil, 2026). Além disso, os herbicidas que possuem registros, em sua maioria, são para aplicações em dessecação e em pré-emergência. Assim, as opções disponíveis para uso em pós-emergência da cultura da soja são limitadas. Nesse contexto, o desenvolvimento de cultivares resistentes a herbicidas, com resistência ao glyphosate, glufosinate, 2,4-D ou dicamba e, mais recentemente da soja Vyconic™, resistente ao glufosinate, glyphosate, mesotrione, dicamba e 2,4-D (Bayer, 2026), amplia as possibilidades de misturas de herbicidas. Essas biotecnologias possibilitam a utilização de novas opções de misturas, como glufosinate e mesotrione.

As associações de herbicidas constituem uma importante ferramenta no manejo da vassourinha-de-botão, principalmente em plantas adultas ou rebrotes. As

misturas permitem rotacionar mecanismos de ação e ampliam o espectro de controle, além de aumentar a eficácia de controle e até mesmo reduzir a dose dos herbicidas em mistura. Além disso, a mistura de herbicidas pode ser uma importante estratégia na prevenção da evolução da resistência ao reduzir a pressão de seleção de populações resistentes e retardar a evolução da resistência (Barbieri *et al.*, 2022). Entretanto, as interações entre as moléculas na planta são complexas e podem afetar a eficácia de controle do herbicida, assim como alterar a taxa de absorção, translocação e metabolismo de um herbicida, quando na presença de outro herbicida, alterando a quantidade de herbicida que atua sobre o local de ação (Zhang *et al.*, 1995). As interações fisiológicas das misturas dependem da espécie, da fase de crescimento da planta, da dose utilizada e das características físico-químicas e fisiológicas dos herbicidas (Zhang *et al.*, 1995; Soltani *et al.*, 2020).

O mesotrione apresenta potencial para utilização em misturas de herbicidas, podendo proporcionar efeito sinérgico no controle de plantas daninhas, principalmente quando em misturas com inibidores do fotossistema II (Abendroth *et al.*, 2006; Monquero *et al.*, 2009; De Goes Maciel *et al.*, 2013; Silveira *et al.*, 2020; Fluttert *et al.*, 2022b). Embora o glufosinate, quando em misturas, tenha apresentado interações sinérgicas no controle de algumas espécies eudicotiledôneas (Ganie; Jhala, 2017; Joseph *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2022), também já foram relatadas interações antagônicas devido à sua ação rápida, reduzindo a absorção e translocação do herbicida parceiro na mistura (Bethke *et al.*, 2013; Besançon *et al.*, 2018).

O glufosinate de amônio inibe a enzima glutamina sintetase (GS), responsável por catalisar a conversão de glutamato em glutamina por meio da incorporação da amônia (Dayan; Duke, 2014). Como consequência, ocorre rápido acúmulo de amônia proveniente da fotorrespiração e redução dos níveis de glutamina e de outros aminoácidos. Esses efeitos desencadeiam uma série de efeitos secundários, incluindo o aumento de glioxilato e depleção de compostos intermediários do ciclo de Calvin, que resultam na inibição da enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e da fixação de CO₂ na fotossíntese. Como consequência, há aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), que promovem a peroxidação das membranas e levam a rápida morte celular (Wild; Wendler, 1993; Lu *et al.*, 2014; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020a).

O mesotrione inibe indiretamente a síntese de carotenoides ao se ligar à enzima 4-hidroxifenil-piruvato dioxigenase (4-HPPD). A 4-HPPD converte o 4-

hidroxifenilpiruvato em homogentisato, precursor da plastoquinona (PQ) e α -tocoferol, reduzindo os níveis dessas moléculas (Lee *et al.*, 1997; Hess, 2000). A redução de α -tocoferol (vitamina E) aumenta a sensibilidade às ERO, pois age como antioxidante contra o estresse oxidativo (Lee *et al.*, 1997; Dayan, 2019).

Embora a interação entre glufosinate e mesotrione seja pouco estudada, há relatos de interação sinérgica dessa mistura no controle de algumas espécies eudicotiledôneas (Fluttert *et al.*, 2022a). Desse modo, hipotetiza-se que a mistura de mesotrione e glufosinate promova interação sinérgica devido ao aumento simultâneo da produção de ERO pelo glufosinate e a redução dos mecanismos antioxidantes promovida pela ação do mesotrione (Matringe *et al.*, 2005; Takano *et al.*, 2019). Contudo, estudos sobre a interação desses herbicidas e seus efeitos no controle de vassourinha-de-botão são escassos. Nesse sentido, compreender a interação dessas moléculas em mistura é fundamental para sua adoção no manejo de espécies de plantas daninhas tolerantes ao glyphosate.

Portanto, objetivou-se com este trabalho avaliar a eficácia e a interação da mistura em tanque com mesotrione e glufosinate de amônio no controle de *Borreria spinosa*, bem como os efeitos da mistura sobre a atividade fotossintética.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), na Faculdade de Ciências Agrárias (FCA/UNESP), campus de Botucatu, SP.

Para avaliar o efeito da mistura do glufosinate de amônio e mesotrione foram conduzidos ensaios em delineamento inteiramente casualizado e quatro repetições. Para tanto, foram realizados dois ensaios para avaliação de: 1) eficácia de controle da mistura e taxa de transporte de elétrons (ETR); e 2) efeito da mistura no teor de clorofila, carotenoides e a atividade fotossintética de plantas de *Borreria spinosa*.

2.2.1 Experimento 1: Eficácia de controle

O ensaio de eficácia de controle consistiu em curvas de dose resposta, onde foram aplicadas as doses de: 0, 50, 100, 200, 400 e 800 g i.a. ha⁻¹ para os herbicidas glufosinate de amônio e mesotrione de forma isolada e em mistura, sendo que cada

curva de glufosinate de amônio foi realizada com 0 e 100 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione, e cada curva de mesotrione foi realizada com 0 e 100 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate de amônio, sendo adicionado óleo mineral a 0,25% v/v em todos os tratamentos.

As sementes de *Borreria spinosa* foram adquiridas da empresa Agro Cosmos LTDA. Essas sementes foram semeadas em bandejas e, posteriormente, as plântulas foram transplantadas para vasos com capacidade de 1,7 L preenchidos com substrato comercial (carvão vegetal, casca de *Pinus* e vermiculita com pH = 5,8 (±0,3)), sendo mantida uma planta por vaso. Quando as plantas de *Borreria spinosa* apresentavam de 6 a 8 pares de folhas (22,8 cm de altura) foi realizada a aplicação dos tratamentos.

As aplicações foram realizadas por um pulverizador estacionário em sala fechada (Figura 1), equipado com barra de pulverização com quatro pontas de pulverização XR 110.02 VS (TeeJet), espaçadas a 0,5 m e a 0,5 m de altura em relação ao alvo, com volume de aplicação de 200 L ha⁻¹, sob pressão constante de 2,0 bar e velocidade de 1 m. s⁻¹.

Aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) foi avaliada a eficácia de controle dos tratamentos. A avaliação visual de controle foi realizada com auxílio de uma escala de notas, de 0 a 100% de controle, na qual zero (0) representa a ausência de controle e 100% a morte da planta. Após a última avaliação, a parte aérea das plantas foi coletada para determinação da massa fresca, sendo depois acondicionadas em sacos de papel e, posteriormente, pesadas em balança analítica (0,0001 g).

Além do controle, foram realizadas avaliações da taxa de transporte de elétrons (ETR) no fotossistema II às 2, 6, 24, 48, 120 e 168 horas após a aplicação (HAA), com auxílio de um medidor portátil de fluorescência da clorofila *a* (medidor Y(II) OPTI-SCIENCES). As leituras foram realizadas na segunda folha totalmente expandida, avaliando-se duas folhas por repetição (Figura 2).

Figura 1 - Plantas de *Borreria spinosa* antes da aplicação (à esquerda), e pulverizador estacionário e unidades experimentais no momento da aplicação (à direita)



Figura 2 - Avaliação da taxa de transporte de elétrons no Fotossistema II (ETR) em plantas de *Borreria spinosa*



2.2.2 Experimento 2: Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia

Em um segundo conjunto de unidades experimentais foram avaliados os efeitos dos herbicidas isolados e em misturas sobre a atividade fotossintética, teor de clorofila, carotenoides, assim como, o acúmulo de amônia nos tecidos de plantas de *B. spinosa*. Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial 3 x 3, sendo os fatores três doses de mesotrione (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹) e três doses de glufosinate (0, 100 e 200 g i.a. ha⁻¹).

As plantas foram conduzidas até a aplicação dos tratamentos, conforme descrito anteriormente. Da mesma forma, as aplicações ocorreram sob as mesmas condições.

A atividade fotossintética foi avaliada aos 2, 5 e 7 DAA, por meio de um medidor de trocas gasosas por infravermelho (IRGA) modelo LCpro-SD® (ADC BioScientific Ltda®) (Figura 3). As medições foram realizadas entre 9:00 e 11:00 h no período matutino e entre 14:00 e 16:00 h no período vespertino em folhas completamente expandidas do segundo nó da planta, do ápice em direção à base, de forma a evitar as folhas novas. Após a leitura, determinou-se os seguintes parâmetros fotossintéticos: concentração de carbono interno (C_i), taxa de transpiração (E), condutância estomática (g_s) e assimilação líquida de CO₂ (A).

Aos 3 e 7 DAA, folhas completamente expandidas foram coletadas para análise do conteúdo de clorofila e carotenoides no tecido foliar. Desse material coletado, pesou-se 0,2 g e, em seguida, o material foi acondicionado em tubos de 5 mL e armazenado em freezer para extração dos pigmentos fotossintéticos (Figura 4). Para a extração, adicionou-se 5 mL de fase etanol:água (95:05) às amostras de tecido foliar. Posteriormente, esse material foi embrulhado em papel alumínio e mantido no escuro em sala com temperatura controlada por 24 horas. Após esse período, realizou-se as leituras de absorbância em espectrofotômetro modelo UV-2700 (Shimadzu Europe). Para as clorofilas *a* e *b* foram utilizados os comprimentos de onda de 648,6 e 664,2 nm, respectivamente e, para a leitura de carotenoides, o comprimento de onda foi de 470 nm. Os níveis de clorofilas e carotenoides foram determinados por meio das seguintes equações:

$$\text{Clorofila } a = (13,36 \cdot A_{664,2}) - 5,19 \cdot A_{648,6};$$

Clorofila *b* = $(27,43 \cdot A_{648,6}) - (8,12 \cdot A_{664,2})$;

Clorofila total (*a* + *b*) = $(5,24 \cdot A_{664,2}) + (22,24 \cdot A_{648,6})$;

Carotenoides = $((1000 \cdot A_{470}) - (2,13 \cdot Ca) - 97,64 \cdot Cb)) / 209$;

onde, A é a absorbância no comprimento de onda indicado.

Figura 3 - Avaliação da atividade fotossintética em plantas de *Borreria spinosa*

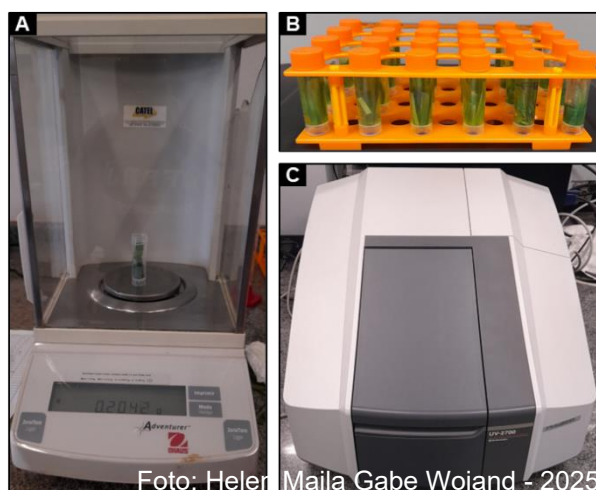


Para determinar o conteúdo de amônia, procedeu-se a coleta da planta inteira aos 1, 3 e 7 DAA. As plantas coletadas foram imediatamente pesadas e acondicionadas em garrafas plásticas previamente pesadas e identificadas (Figura 5A). Em seguida, as garrafas contendo as amostras foram preenchidas com uma solução de ácido clorídrico (HCl) com pH 3,5, sendo novamente pesado. Posteriormente, essas garrafas foram colocadas em banho de ultrassom por 60 minutos, para recuperação de toda a amônia (Figura 5B). Em seguida, retirou-se as folhas da solução.

Para a extração da amônia e posterior quantificação, realizou-se o preparo dos seguintes reagentes: sulfato manganoso, hipoclorito de sódio, solução de fenol + hidróxido de sódio. Adicionou-se 0,05 g de sulfato manganoso ($MnSO_4$) a um balão

volumétrico de 100 mL e, após a dissolução do reagente, completou-se o balão volumétrico com água deionizada. A solução de hipoclorito de sódio foi preparada com a adição de 5 mL de NaClO (12%) e 45 mL de água deionizada em béquer e, sob agitação constante, ajustou-se o pH entre 6 e 7, com a adição de ácido clorídrico. Para a solução de fenol + hidróxido de sódio, foram adicionados 10 g C₆H₅OH a um balão volumétrico de 100 mL. Após, a dissolução do fenol, foi acrescentado 2,5 g de NaOH, completando-se depois o volume do balão com água deionizada.

Figura 4 - Processo para a extração dos pigmentos fotossintéticos. A) pesagem da amostra; B) adição da fase de etanol em água e manutenção no escuro; C) leituras de absorbância em espectrofotômetro



Além dos reagentes, uma curva padrão foi preparada utilizando-se solução estoque de amônia. Preparou-se a curva padrão com as concentrações de 0; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0 e 3,0 ppm, para possibilitar a correlação de absorbância e concentração de amônia (Figura 5C).

Após a preparação dos reagentes e a retirada do material vegetal das garrafas, retirou-se uma alíquota de 10 mL da solução sonicada, transferindo-se depois para tubos de ensaios identificados. Posteriormente, adicionou-se os reagentes para determinação colorimétrica, na seguinte ordem: adição de uma gota de sulfato de manganês; 500 µL da solução de hipoclorito de sódio; 600 µL da solução de fenol + NaOH; em seguida, os tubos foram colocados em um agitador orbital por 10 minutos (Figura 5D). Após a agitação, realizou-se a leitura da absorbância e também a

determinação do conteúdo de amônia da solução proveniente das amostras e da curva padrão por espectrofotometria (Wendler; Barniske; Wild, 1990; Dayan *et al.*, 2015), usando o espectrofotômetro de duplo feixe UV visível (Cintra 40, GBC Scientific Equipment Ltd.) no comprimento de onda de 360 nm (Figura 5E).

Figura 5 - Processos para extração da amônia. A) pesagem da amostra; B) amostras em banho de ultrassom; C) curva padrão com concentrações de 0; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0 e 3,0 ppm de amônia; D) agitação das amostras após adição dos reagentes; E) leituras de absorbância em espectrofotômetro

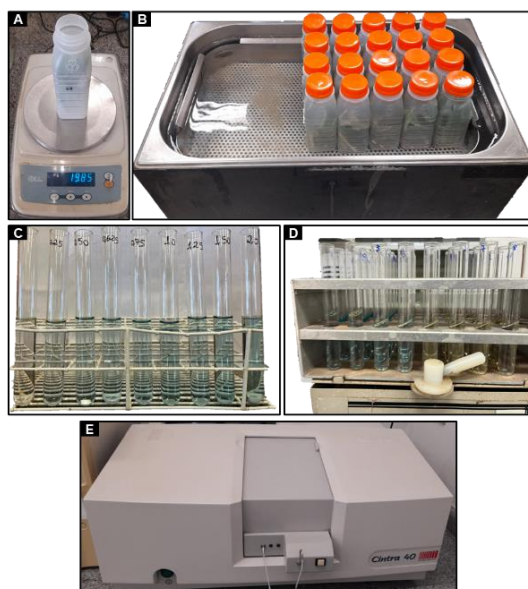


Foto: Helen Maila Gabe Woiland - 2025

1.2.3 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e as médias quando significativas foram comparadas pelo teste de t ($p < 0,05$), pelo programa estatístico SISVAR v. 5.8.

Os dados de ETR, pigmentos fotossintéticos e massa fresca foram convertidos em porcentagem em relação à testemunha que representa 100%. Já os dados referentes ao teor de amônia foram convertidos em mg kg^{-1} massa fresca. Para os dados de ETR, calculou-se os intervalos de confiança a partir da fórmula:

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

onde: t é o valor de t tabelado com 5% de significância, desvpad é o desvio padrão da amostra e n é o número de repetições de cada tratamento.

Para avaliar o efeito da interação entre glufosinate de amônio e mesotrione em mistura de tanque foram comparados os valores reais obtidos pelo controle visual e massa fresca residual, e o controle esperado, calculado pelo método de sobrevivência multiplicativo, método de Colby (1967), por meio da equação:

$$C_{\text{controle}} (\%) = \frac{100 - (100 - C_1) * (100 - C_2)}{100}$$

$$C_{\text{massa fresca residual}} (\%) = \frac{100 - (C_1 * C_2)}{100}$$

onde: C : controle estimado; C_1 : controle ou massa fresca residual observado para o glufosinate; C_2 : controle ou massa fresca residual observado para o mesotrione.

Para determinar as interações das misturas dos herbicidas, realizou-se o teste t de Student pareado ($p < 0,05$), comparando-se o controle esperado e o controle observado. As interações foram classificadas em: efeito aditivo (quando os valores do controle observados foram iguais aos valores do controle esperado (calculado), e sem diferença estatística), efeito sinérgico (SIN) (quando os valores do controle observado foram maiores do que o controle esperado) e efeito antagônico (ANT) (quando os valores do controle observado forem menores do que o esperado).

Adicionalmente, os dados de controle e massa de matéria fresca foram ajustados ao modelo de regressão não-linear de Mitscherlich (Mitscherlich, 1909) por meio do programa estatístico (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, Version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA), de acordo com a equação:

$$Y = (a [1 - 10^{(-c(x+b))}])$$

onde: a , b e c são parâmetros da equação; a é a assíntota máxima da curva; b o deslocamento lateral da curva, e c é a concavidade. O valor de Y indica a porcentagem de controle e x representa a dose do herbicida.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Eficácia de controle

Nas tabelas 1 e 2, encontram-se as estimativas dos parâmetros do modelo e coeficiente de determinação das porcentagens de controle visual e redução de massa de matéria fresca para *B. spinosa* (Figura 6) ajustadas pelo modelo de regressão de Mitscherlich com grau de ajuste acima de 90%.

Tabela 1 - Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich para controle visual de *Borreria spinosa* aos 3, 7, 14, 21 e 28 dias após a aplicação (DAA) de doses de glufosinate (1) e de mesotrione (2) isoladas e em mistura

3 DAA	Parâmetros				
	a	b	c	F	R ²
Glufosinate ¹	76,75	0,00	0,00	256,71	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	69,23	0,00	0,00	337,44	0,99
Mesotrione ²	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	36,50	0,00	0,11	34,51	0,94
7 DAA					
Glufosinate ¹	89,31	0,00	0,01	1269,36	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	88,09	0,00	0,01	820,01	0,99
Mesotrione ²	71,26	0,00	0,01	1546,16	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	79,30	0,00	0,02	653,68	0,99
14 DAA					
Glufosinate ¹	96,09	0,00	0,01	4114,88	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	96,82	0,00	0,03	11123,80	0,99
Mesotrione ²	90,11	0,00	0,02	1784,72	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	94,82	0,00	0,03	14384,70	0,99
21 DAA					
Glufosinate ¹	97,85	0,00	0,01	5151,75	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	99,03	0,00	0,03	16518,30	0,99
Mesotrione ²	94,77	0,00	0,02	2030,11	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	97,02	0,00	0,03	30064,30	0,99
28 DAA					
Glufosinate ¹	98,24	0,00	0,01	6926,92	0,99
Glufosinate ¹ + mesotrione (100 g ia. ha ⁻¹)	99,42	0,00	0,02	18868,80	0,99
Mesotrione ²	93,85	0,00	0,02	844,18	0,99
Mesotrione ² + glufosinate (100 g ia. ha ⁻¹)	96,39	0,00	0,03	8346,98	0,99

Tabela 2 - Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich para massa fresca residual de *Borreria spinosa* aos 28 dias após a aplicação (DAA) de glufosinate (1) e mesotrione (2) isolado e em mistura

	Parâmetros		
	c	F	R ²
Glufosinate¹	0,00	1028,59	0,99
Glufosinate¹ + Mesotrione (100 g ia. ha⁻¹)	0,02	1910,12	0,99
Mesotrione²	0,01	152,74	0,96
Mesotrione² + Glufosinate (100 g ia. ha⁻¹)	0,02	360,64	0,98

As curvas de dose-resposta inicialmente apresentaram comportamentos distintos (Figura 6). As curvas de glufosinate e mesotrione isolados e em mistura apresentaram aumento gradual no controle com o aumento das doses (Figuras 7 e 8). Aos 3 DAA e 7 DAA, a aplicação de doses isoladas de glufosinate e glufosinate + mesotrione (100 g ha⁻¹) proporcionaram controles superiores às curvas de mesotrione e mesotrione + glufosinate (100 g ha⁻¹), devido à ação rápida do glufosinate. A partir de 14 DAA, as curvas indicaram elevados níveis de controle, sendo que as misturas apresentaram aumento acentuado no controle nas doses baixas. De modo geral, a associação dos herbicidas promoveu maior resposta principalmente na faixa de menores doses, enquanto o incremento proporcionado pela mistura tornou-se menos evidente com o aumento das doses, quando o controle proporcionado pelos herbicidas isolados já se encontrava próximo dos níveis máximos estimados pelas curvas. Esse comportamento evidencia a maior sensibilidade da *B. spinosa* a esses herbicidas em doses baixas.

Comportamento semelhante ao controle visual foi observado na redução da massa de matéria fresca aos 28 DAA (Figura 6F), para a qual as curvas das misturas indicaram maior redução da massa fresca, enquanto as respostas dos herbicidas isolados se aproximaram das misturas com o aumento das doses.

Figura 6 - Modelo de Mitscherlich ajustado para o controle de *Borreria spinosa* aos 3 (A), 7 (B), 14 (C), 21 (D), 28 (E) dias após a aplicação (DAA) e massa fresca residual (%) aos 28 DAA (F), para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura

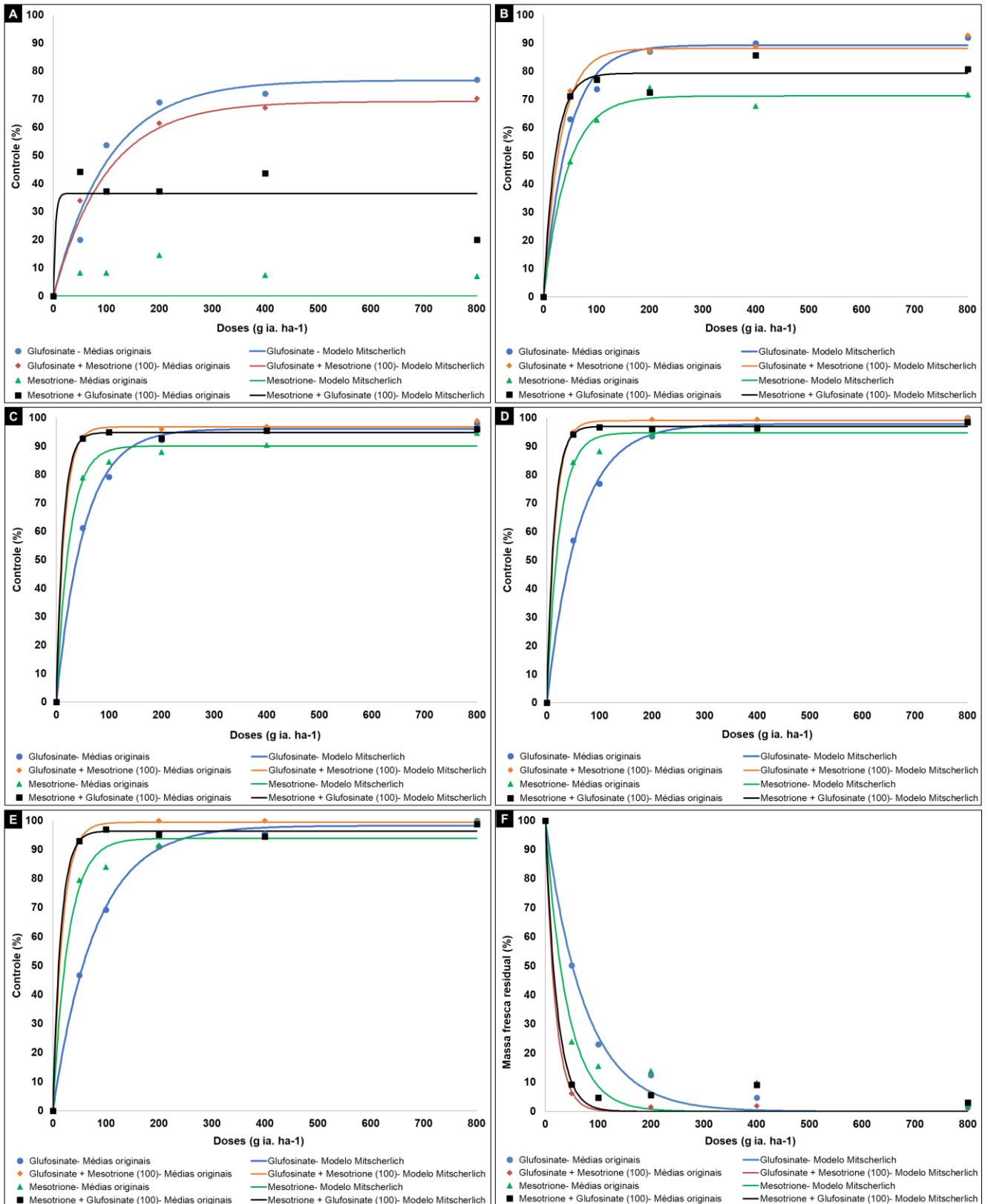
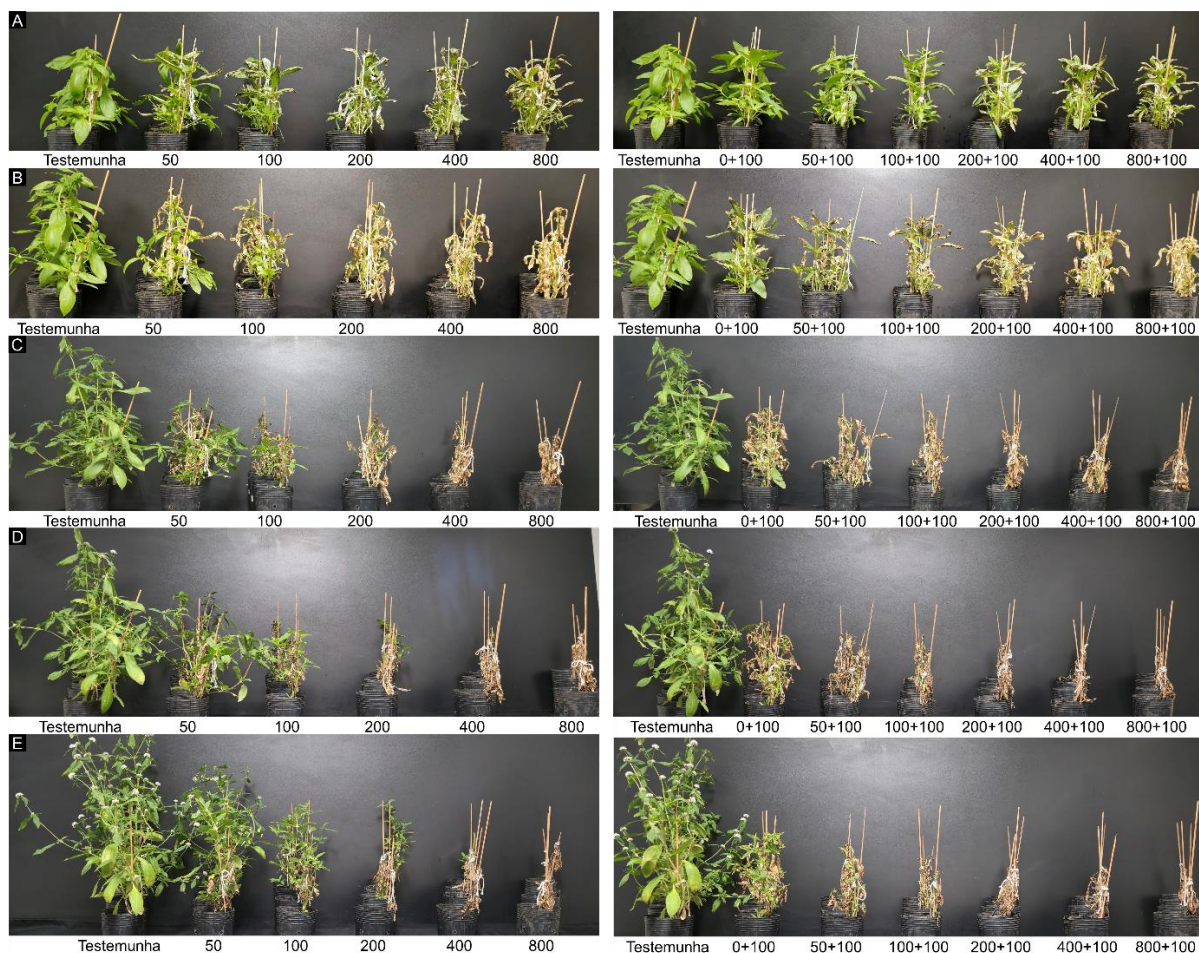
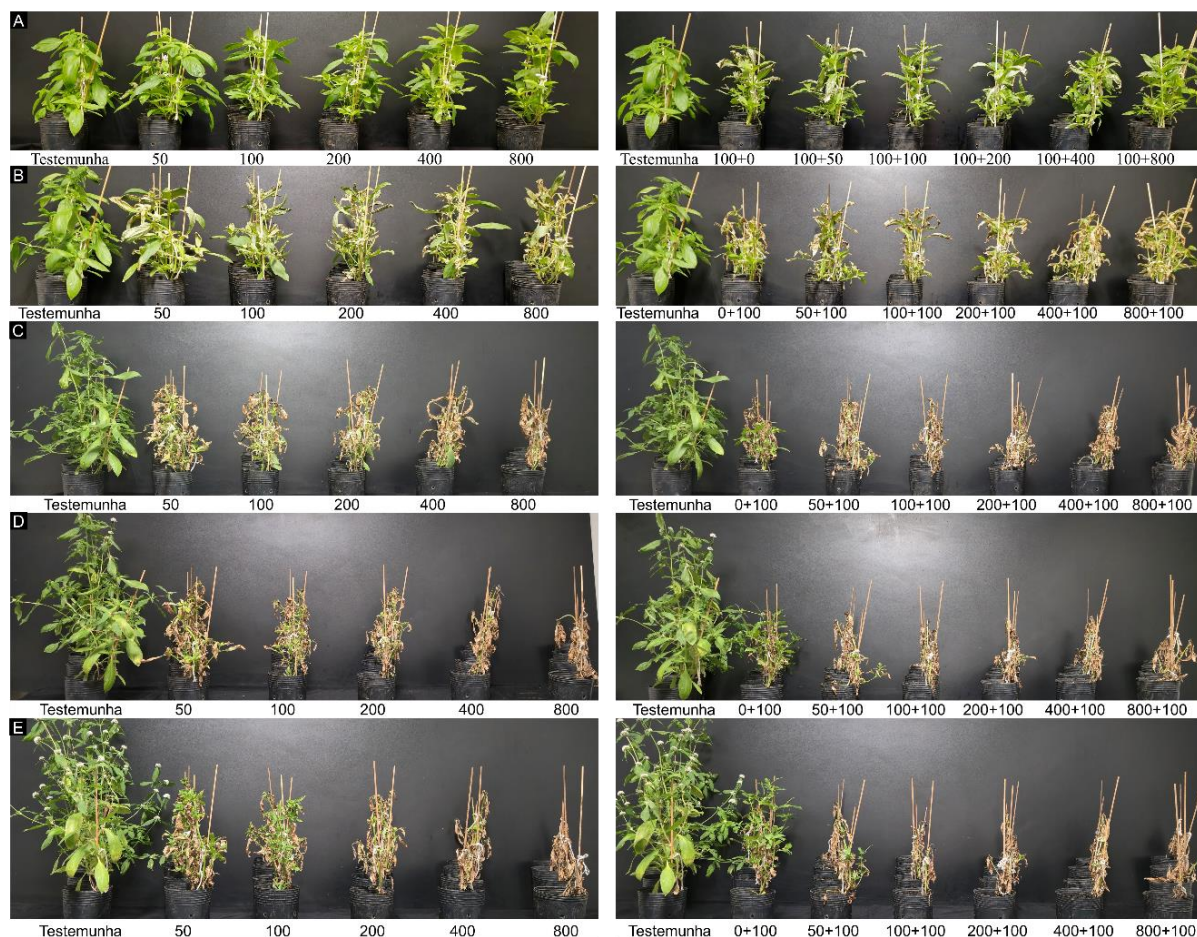


Figura 7 - Curva dose-resposta de doses de glufosinate de amônio isoladas (à esquerda) e em mistura com mesotrione (100 g ha⁻¹) (à direita) em *Borreria spinosa* aos 3 (A), 7 (B), 14 (C), 21 (D) e 28 (E) dias após a aplicação (DAA)



De forma geral, a mistura de glufosinate com mesotrione apresentou efeito aditivo. Inicialmente, as misturas apresentaram interação antagônica. Entretanto, a partir de 14 DAA, as menores doses apresentaram efeito aditivo, enquanto que a interação nas maiores doses manteve-se antagônica (Tabela 3). Esse resultado diverge de estudos anteriores, nos quais o aumento das doses dos herbicidas combinados reduziu a probabilidade de ocorrer antagonismo na mistura (Koger *et al.*, 2007; Meyer *et al.*, 2020). Aos 28 DAA, todas as misturas apresentaram efeito aditivo, exceto a mistura de mesotrione (400 g i.a. ha⁻¹) e glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹), a qual demonstrou efeito antagônico. Tal comportamento pode estar relacionado à alguma interação fisiológica entre as moléculas.

Figura 8- Curva dose-resposta de doses de mesotrione isoladas (à esquerda) e em mistura com glufosinate (100 g ha⁻¹) (à direita) em *Borreria spinosa* aos 3 (A), 7 (B), 14 (C), 21 (D) e 28 (E) dias após a aplicação (DAA)



A ausência de interação sinérgica pode ser explicada pela sensibilidade da espécie. Visto que nas baixas doses testadas isoladamente já proporcionaram controles acima de 50%. Assim, os herbicidas em mistura não promoveram incrementos expressivos no controle, pois o controle já se encontrava próximo dos níveis máximos da curva de dose-resposta (platô da curva). Portanto, não houve espaço para a mistura reduzir o crescimento da planta e produzir maior resposta de controle (Kruse *et al.*, 2001). Resultados semelhantes foram observados por Kruse *et al.* (2001), nos quais o isoxaflutole isolado reduziu a densidade populacional de *Abutilon theophrasti*, *Ipomoea hederacea* e *Amaranthus retroflexus* de forma mais significativa do que em mistura com a atrazine.

Tabela 3 - Controle de *Borreria spinosa* observado (Obs) e estimado (Est) e interação entre os herbicidas (Inter) aos 3, 7, 14, 21, 28 DAA e redução da massa fresca aos 28 após a aplicação (DAA)

Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)	Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	3 DAA			7 DAA			14 DAA			21 DAA			28 DAA			Redução de massa fresca		
		Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter	Obs	Est	Inter
0	0	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-	0	-	-
50	0	20	-	-	63	-	-	61	-	-	57	-	-	45	-	-	50	-	-
100	0	54	-	-	74	-	-	79	-	-	77	-	-	69	-	-	77	-	-
200	0	69	-	-	87	-	-	92	-	-	94	-	-	91	-	-	87	-	-
400	0	72	-	-	90	-	-	97	-	-	97	-	-	96	-	-	95	-	-
800	0	77	-	-	92	-	-	98	-	-	100	-	-	100	-	-	98	-	-
50	100	34	26,6	ADIT	73	86,2*	ANT	93	93,9	ADIT	95	95,0	ADIT	93	91,8	ADIT	94	92,1	ADIT
100	100	37	57,6*	ANT	77	90,2*	ANT	95	96,8	ADIT	97	97,3	ADIT	97	95,3	ADIT	95	96,7	ADIT
200	100	62	71,6*	ANT	87	95,1*	ANT	96	98,9*	ANT	99	99,4	ADIT	100	98,9	ADIT	99	98,6	ADIT
400	100	67	74,3*	ANT	89	96,2*	ANT	97	99,5*	ANT	99	99,8	ADIT	100	99,6	ADIT	98	99,5*	ANT
800	100	70	78,9*	ANT	93	96,9*	ANT	99	99,7*	ANT	100	100,0	ADIT	100	100,0	ADIT	99	99,7	ADIT
0	50	8	-	-	48	-	-	79	-	-	85	-	-	80	-	-	76	-	-
0	100	8	-	-	63	-	-	85	-	-	88	-	-	84	-	-	84	-	-
0	200	15	-	-	74	-	-	88	-	-	94	-	-	92	-	-	86	-	-
0	400	8	-	-	68	-	-	91	-	-	96	-	-	95	-	-	90	-	-
0	800	7	-	-	72	-	-	95	-	-	98	-	-	100	-	-	98	-	-
100	50	44	57,6*	ANT	71	86,4*	ANT	93	95,6	ADIT	94	96,4	ADIT	93	93,8	ADIT	91	94,4	ADIT
100	100	37	57,6*	ANT	77	90,2*	ANT	95	96,8	ADIT	97	97,3	ADIT	97	95,3	ADIT	95	96,7	ADIT
100	200	37	60,5*	ANT	73	93,3*	ANT	93	97,5*	ANT	96	98,6	ADIT	95	97,5	ADIT	94	96,5	ADIT
100	400	44	57,3*	ANT	86	91,5*	ANT	96	98,1*	ANT	97	99,1*	ANT	95	98,2*	ANT	91	97,5*	ANT
100	800	20	56,9*	ANT	81	92,6*	ANT	96	98,9*	ANT	99	99,6	ADIT	99	100	ADIT	97	99,6	ADIT

ADIT: aditivo; ANT: antagônico; SIN: sinérgico; * significativo a 5% pelo teste t de Student

Os controles observados no presente trabalho estão parcialmente de acordo com o observado por outros trabalhos, que também observaram controles satisfatórios para espécies de vassourinha-de-botão (*Borreria* spp.) com a aplicação isolada de glufosinate e mesotrione em plantas com até 8 folhas (Lima *et al.*, 2019; Sanches *et al.*, 2025). No entanto, Andrade Júnior (2020) observou controle de 100% com glufosinate (500 g i.a. ha⁻¹) em plantas de *Borreria verticillata* com 2 a 4 folhas, enquanto que, a partir de 4 folhas o controle foi inferior a 25%.

O controle de espécies de vassourinha-de-botão (*Borreria* spp.) geralmente torna-se problemático à medida que a planta se desenvolve e emite folhas e ramos nas gemas laterais ao longo do caule. Assim, a sobreposição dessas folhas impede que o herbicida atinja as folhas inferiores, resultando em menor controle da planta e dos rebrotes (Martins; Christoffoleti, 2014; Lima *et al.*, 2019). Nesse sentido, o uso de misturas de herbicidas pode contribuir para aumentar a eficácia de controle dessas espécies em estádios mais avançados, visto que a eficiência de controle é reduzida.

Assim como no presente trabalho, o incremento no controle com a mistura de glufosinate e mesotrione já foi relatado para outras espécies de plantas daninhas. Armel *et al.* (2008) obtiveram controle superior a 90% para *Ambrosia artemisiifolia* e *Setaria faberi* com a mistura desses herbicidas. Da mesma forma, Fluttert *et al.* (2022a) constataram sinergismo da mistura de glufosinate (300 g i.a. ha⁻¹) com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) no controle de *Abutilon theophrasti*, *Ambrosia artemisiifolia* e *Chenopodium album*, além de interação aditiva no controle de *Sinapis arvensis* e *Echinochloa crus-galli*. Quando o glufosinate foi misturado com tolpiralate (30 g i.a. ha⁻¹) observou-se interação aditiva no controle de *Abutilon theophrasti*, *Chenopodium album* e *Sinapis arvensis*.

Outros trabalhos já relataram interações positivas ao combinar glufosinate de amônio a outros herbicidas no controle de espécies eudicotiledôneas. Isso demonstra que apesar de o glufosinate ser um herbicida de ação rápida, que pode limitar o efeito do herbicida em mistura (Takano; Dayan, 2020), algumas misturas demonstraram potencial de sinergismo. Conforme observado nesse estudo e em outros, esse herbicida apresenta interações promissoras. Ganie e Jhala (2017) obtiveram interação aditiva com a mistura de 2,4-D ou dicamba com glufosinate no controle de *Ambrosia trifida*. Adicionalmente, Jones *et al.* (2022) observaram efeito aditivo no controle de *Amaranthus palmeri*, *Ambrosia artemisiifolia* e *Senna obtusifolia*, com a mistura de glufosinate e dicamba.

Paralelamente, o mesotrione é um excelente parceiro utilizado em misturas, como já foi constatado quando em mistura com inibidores do fotossistema II. Esse herbicida em mistura com atrazine, bromoxynil ou ametrin, apresentou sinergismo no controle de *Amaranthus retroflexus*, *Brachiaria decumbens*, *Bidens pilosa*, *Conyza canadensis* e *Euphorbia heterophylla* (Hugie *et al.*, 2008; Monquero *et al.*, 2009; Fluttert *et al.*, 2022b).

Os resultados evidenciam que a mistura de glufosinate e mesotrione, apesar do efeito aditivo, é uma ferramenta promissora no controle dessa espécie, pois aumenta a eficiência de controle dos herbicidas em doses menores e, pode reduzir o rebrote de plantas.

2.3.2 Efeito da mistura sobre a atividade fotossintética e conteúdo de amônia

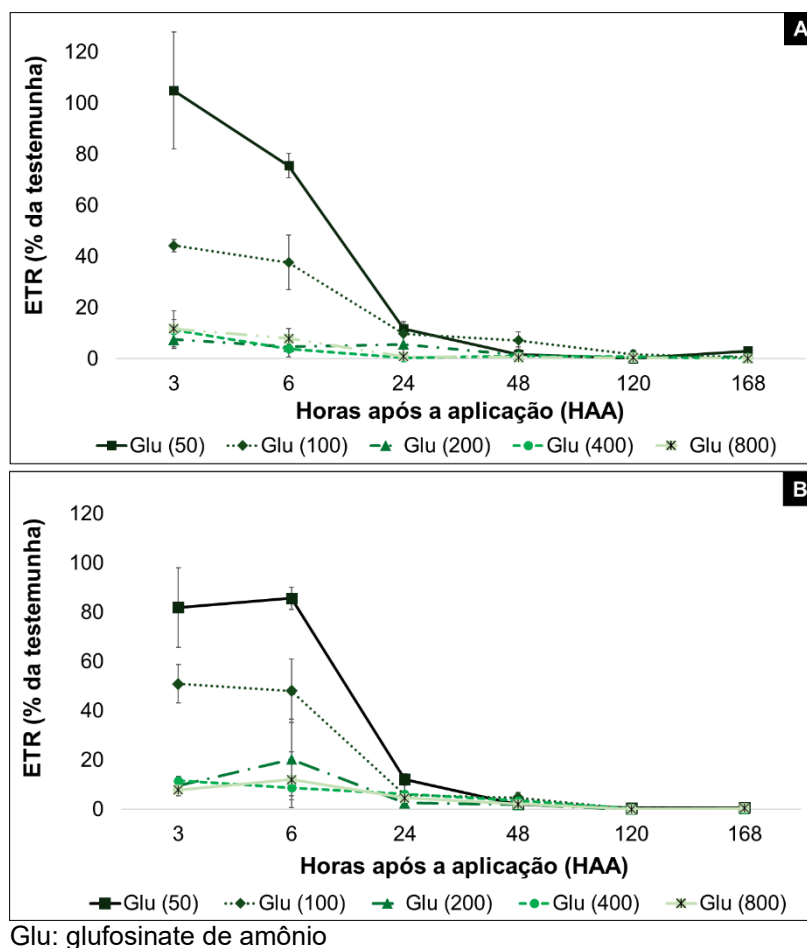
2.3.2.1 Taxa de transporte de elétrons

Nas figuras 9 e 10, observou-se a redução da ETR para as plantas de *B. spinosa* com as doses crescentes de glufosinate e mesotrione, isoladas e em mistura, ao longo do período avaliado.

As curvas de glufosinate isolada (Figura 9A) e combinada com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) (Figura 9B) apresentaram decréscimos acentuados às 24 HAA para todas as doses, com redução média de 94% da ETR em relação ao tratamento sem aplicação. Os valores de ETR mantiveram-se próximos de zero durante o período avaliado em ambas as curvas.

Semelhante à curva do glufosinate, as doses crescentes de mesotrione isoladas (Figura 10A) e em mistura (Figura 10B) reduziram a ETR. A curva do mesotrione isolada apresentou queda gradual dos valores de ETR, alcançando redução de 99% às 120 HAA. Enquanto que a curva de mesotrione com glufosinate (100 g i.a ha⁻¹) apresentou redução acentuada da ETR às 24 HAA, em média de 92 %, mantendo os valores de ETR próximos de zero após às 120 HAA. Essa redução acentuada da ETR às 24 HAA demonstra que a associação desses herbicidas intensifica os efeitos sobre o transporte de elétrons. Nota-se que, após as 120 HAA, os valores de ETR se mantiveram próximos de zero até o final das avaliações para todas as curvas. Essa redução acompanhou a evolução dos sintomas visuais, sem recuperação da ETR, devido aos danos severos ocasionados às plantas.

Figura 9 - Taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação à testemunha (%) em curvas de dose-resposta de glufosinate de amônio isolado (A) e em mistura com mesotrione (100 g i.a. ha⁻¹) (B) aplicadas em *Borreria spinosa*

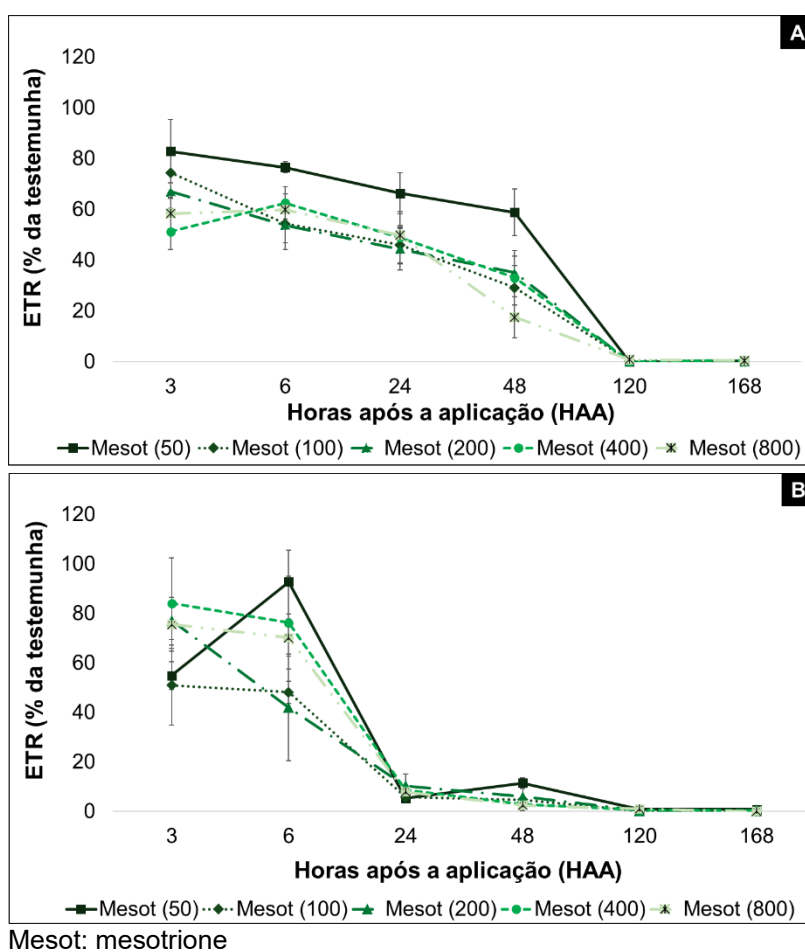


Castro (2018) observou reduções mais expressivas da ETR com doses a partir de 300 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate, com redução de 50% às 24 HAA e superior a 80% às 60 HAA em plantas de *Ipomoea grandifolia*. Para plantas de *Euphorbia heterophylla*, esse autor observou 70% de redução da ETR às 12 HAA, mesmo na menor dose de 150 g i.a. ha⁻¹. Esses resultados corroboram parcialmente com o presente trabalho, visto que se observam reduções da ETR superiores a 50% já às 3 HAA com doses a partir de 200 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate. Outros trabalhos relataram redução da ETR com a aplicação de glufosinate em outras espécies como algodão (Carbonari *et al.*, 2016), pepino (Dayan; Zaccaro, 2012), soja (Barberis, 2012), *Digitaria insularis*, *Lolium multiflorum* (Castro, 2018) e milho (Krenchinski *et al.*, 2019).

Conforme observado, quando o glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) foi misturado ao mesotrione, houve maiores reduções da ETR em relação às doses de mesotrione

aplicadas isoladamente. Dessa forma, a mistura intensificou o efeito dos herbicidas sobre o transporte de elétrons. Sugere-se que essa mistura apresentou efeito sinérgico na inibição do transporte de elétrons no fotossistema II. Além do mais, a redução dos valores de ETR acompanhou os sintomas visuais das plantas, o que pode justificar a fitointoxicação das plantas aos herbicidas.

Figura 10 - Taxa de transporte de elétrons (ETR) em relação à testemunha (%) em curvas dose-resposta de mesotrione isolado (A) e em mistura com glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) (B) aplicadas em *Borreria spinosa*



2.3.2.2 Conteúdo de pigmentos fotossintéticos

Observou-se nas Tabelas 4 e 5, o conteúdo de pigmentos fotossintéticos para *B. spinosa*. Aos 3 DAA, a mistura de glufosinate + mesotrione (200 + 200 g i.a. ha⁻¹) proporcionou maior redução de clorofila *a*. Para clorofila *b* e total, todas as doses, isoladas ou em misturas, reduziram o teor de clorofila, com exceção das misturas nas

doses de 100 + 200 e 200 + 100 (g i.a. ha⁻¹) de glufosinate + mesotrione, as quais apresentaram reduções menos expressivas.

Aos 7 DAA, as doses de glufosinate isoladas (100 e 200 g i.a. ha⁻¹) e a mistura de glufosinate (200 g ha⁻¹) + mesotrione (200 g ha⁻¹) promoveram maior redução do conteúdo de clorofila *a*, *b* e total. Enquanto as misturas de 100 + 200 g ha⁻¹ e 200 + 100 g ha⁻¹ de glufosinate + mesotrione proporcionaram as menores reduções de clorofila em relação às demais misturas. As doses isoladas de glufosinate reduziram a clorofila, em média, 74,5 e 64,5%, respectivamente, enquanto as combinações de 100+100 e 200+200 reduziram, em média, 45,3 e 61,5 %, respectivamente. Para as doses isoladas de mesotrione, observaram-se aumentos no conteúdo de clorofila *b*.

Tabela 4 - Conteúdo de clorofila *a* e *b* em relação à testemunha (%) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Borreria spinosa*, aos 3 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Clorofila <i>a</i>								Clorofila <i>b</i>					
3 DAA													
		Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)											
		0		100		200		0		100		200	
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0	aA	93,8	abAB	86,5	bA	100,0	aA	61,7	bB	61,9	bB
	100	84,9	aB	86,9	aB	91,1	aA	52,2	bB	57,8	bB	88,8	aA
	200	82,3	bB	96,4	aA	77,1	bB	54,2	bB	82,1	aA	58,8	bB
Fator A				0,006**						0,806 ^{ns}			
Fator B				0,002**						0,051 ^{ns}			
A x B				0,000**						0,000**			
C.V. (%)				5,87						14,24			
DMS				7,57						14,18			
7 DAA													
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100	aA	21,9	bB	28,0	bB	100,0	aA	30,1	cB	45,6	bB
	100	79,6	aB	49,9	cA	63,7	bA	95,3	aA	63,5	bA	85,4	aA
	200	86,7	aB	51,1	bA	32,3	cB	101,0	aA	71,7	bA	46,7	cB
Fator A				0,000**						0,000**			
Fator B				0,001**						0,000**			
A x B				0,000**						0,000**			
C.V. (%)				13,91						13,89			
DMS				11,51						14,31			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) pelo teste F; ^{ns}: não significativo.

As reduções significativas de clorofila, aos 7 DAA, foram maiores para as doses isoladas de glufosinate e quando se associou às doses de 200 + 200 g i.a ha⁻¹ (Tabela 4 e 5). Essa espécie se apresenta mais sensível aos herbicidas, já que a aplicação isolada proporcionou controles altos nessas doses. A mistura resultou em menores

reduções da clorofila em relação ao glufosinate isolado, conforme se aumentou a dose desse herbicida. Esse resultado evidencia que quando se aumenta a dose do glufosinate a degradação da clorofila é reduzida, devido a uma possível interação negativa entre os herbicidas.

Tabela 5 - Conteúdo de clorofila total e carotenoides em relação à testemunha (%) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Borreria spinosa*, aos 3 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Clorofila total								Carotenoides					
3 DAA													
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)													
		0		100		200		0		100		200	
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0	aA	76,7	bB	77,1	bB	100,0	aA	95,9	aAB	76,4	bB
	100	72,4	bB	74,2	bB	90,2	aA	92,8	aA	83,0	aB	95,1	aA
	200	70,3	bB	90,9	aA	72,8	bB	91,7	aA	98,0	aA	99,5	aA
Fator A				0,957 ^{ns}						0,481 ^{ns}			
Fator B				0,080 ^{ns}						0,199 ^{ns}			
A x B				0,000 ^{**}						0,004 ^{**}			
C.V. (%)				9,20						9,72			
DMS				10,74						13,04			
7 DAA													
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	100,0	aA	24,2	bB	32,9	bB	100,0	aA	27,7	bA	18,3	bB
	100	84,0	aB	50,8	cA	69,8	bA	60,3	aB	36,9	bA	55,4	aA
	200	90,8	aAB	56,9	bA	36,4	cB	71,8	aB	38,2	bA	24,8	bB
Fator A				0,000 ^{**}						0,000 ^{**}			
Fator B				0,000 ^{**}						0,451 ^{ns}			
A x B				0,000 ^{**}						0,000 ^{**}			
C.V. (%)				14,16						23,87			
DMS				12,46						16,67			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) pelo teste F; ^{ns}: não significativo.

O conteúdo de carotenoides apresentou maior redução aos 3 DAA para a dose isolada de glufosinate de 200 g i.a. ha⁻¹ (Tabela 5). Resultados análogos ao conteúdo de clorofila foram observados para o conteúdo de carotenoides aos 7 DAA, com maiores reduções desses pigmentos para as doses isoladas do glufosinate (72,3 e 81,8%) e nas misturas de glufosinate + mesotrione, 100 + 100, 100 + 200 e 200 + 200 g i.a. ha⁻¹ (63,0; 61,8 e 75,2%, respectivamente). Quando se aumenta a dose do glufosinate e mantém a dose do mesotrione baixa observou-se tendência de menor degradação dos pigmentos fotossintéticos.

Outros autores também verificaram maior redução no conteúdo de pigmentos fotossintéticos aos 7 DAA, com a aplicação de mesotrione ou outros inibidores da síntese de carotenoides, seguida do aumento do conteúdo desse pigmento (Kopsell *et al.*, 2010; Brosnan *et al.*, 2011). Outros trabalhos já constataram a redução de clorofila com a aplicação de mesotrione isolado em plantas de *Digitaria sanguinalis* (Mccurdy *et al.*, 2009), *Lolium perenne* (Mccurdy *et al.*, 2008) e milho (SUN *et al.*, 2024; LV *et al.*, 2024), além da redução de clorofila com aplicação de glufosinate isolado em soja (Reddy *et al.*, 2011).

2.3.2.3 Atividade fotossintética

A assimilação líquida de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi completamente inibida aos 2 DAA para todas as combinações dos herbicidas, mantendo esse comportamento até os 7 DAA (Tabela 6). Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que, 48 h após a aplicação, a taxa de transporte de elétrons apresentou valores próximos de zero para todos os tratamentos e permaneceu baixa durante o período. Aos 7 DAA, as folhas se encontravam com sintomas severos e os tecidos foliares estavam parcialmente mortos. Assim, a atividade fotossintética foi inibida pelo conjunto de fatores, tais como a inibição do transporte de elétrons e o estresse oxidativo com destruição da clorofila e do aparato fotossintético. Além disso, fatores estomáticos como a redução da condutância estomática também teve pequena contribuição para esse resultado.

Esses resultados corroboram com os encontrados na literatura, na qual verificam-se reduções na taxa de assimilação de carbono e trocas gasosas com a aplicação isolada desses herbicidas em culturas (Lacuesta *et al.*, 1993; Bulegon *et al.*, 2019). Em outro estudo, Creech *et al.* (2004) verificaram que os herbicidas mesotrione (105 g i.a. ha⁻¹) e atrazine (280 g i.a. ha⁻¹), isolados e em mistura, reduziram a taxa de assimilação de carbono a valores mínimos em *Echinochloa crus-galli*, *Abutilon theophrasti* e *Amaranthus retroflexus*, os quais se mantiveram mínimos mesmo após sete dias da aplicação, com exceção para a espécie *Setaria viridis*, que apresentou recuperação da taxa fotossintética após sete dias da aplicação. Reduções de 32,9% na atividade fotossintética foram observadas em plantas de milho após a aplicação de mesotrione (Bulegon *et al.*, 2019).

Tabela 6 - Conteúdo de carbono interno ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa de assimilação líquida de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Borreria spinosa* aos 2, 5 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Carbono interno					Assimilação de CO ₂				
2 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
		0	100	200	Média	0	100	200	Média
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	373,0bB	449,3aB	452,3aA	424,8	8,9aA	0,0bA	0,0bA	2,9
	100	435,5bA	470,0aA	437,3bA	447,6	1,0aB	0,0aA	0,0aA	0,3
	200	434,3bA	460,3aAB	439,0bA	444,5	0,0aB	0,0aA	0,0aA	0,0
Média		424,8	459,8	442,9	439,0	3,3	0,0	0,0	1,1
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			2,57			71,53			
DMS			16,37			1,14			
5 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	271,3bB	441,7aB	442,8aA	385,2	17,6aA	0,0aA	0,0aA	5,9
	100	459,0aA	460,5aA	450,0aA	456,5	0,0aB	0,0aA	0,0aA	0,0
	200	463,8aA	452,3abAB	443,0bA	453,0	0,0aB	0,0aA	0,0aA	0,0
Média		398,0	451,5	445,3	431,6	5,9	0,0	0,0	2,0
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			2,96			67,38			
DMS			18,52			1,92			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	306,0bB	465,0aA	452,0aA	407,7	14,4aA	0,0aA	0,0aA	4,8
	100	465,0aA	462,3aA	462,0aA	463,1	0,0aB	0,0aA	0,0aA	0,0
	200	473,8abA	475,8aA	455,0bA	468,2	0,0aB	0,0aA	0,0aA	0,0
Média		414,9	467,7	456,3	446,3	4,8	0,0	0,0	1,6
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,000**			0,000**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			3,16			104,38			
DMS			20,45			2,41			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% ($p < 0,01$) pelo teste F; * significativo a 5% ($p < 0,05$) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

O conteúdo de carbono interno permaneceu elevado com poucas variações ao longo do período avaliado para todos os tratamentos em relação ao tratamento sem aplicação, que apresentou menor valor, com interação significativa entre os fatores (Tabela 6). Tal comportamento pode ser explicado pela maior atividade fotossintética nas plantas não tratadas, onde o consumo do carbono presente no mesofilo foi maior, resultando na redução da concentração do conteúdo de carbono interno. Conforme observado por Silveira *et al.* (2013), a redução da taxa fotossintética resultou no aumento do carbono interno com a aplicação de mesotrione.

A taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e a condutância estomática ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) foram reduzidas em relação ao tratamento sem aplicação (Tabela 7), apesar da interação significativa para doses, durante o período avaliado. A taxa de transpiração e condutância estomática acompanharam o comportamento da fotossíntese ao longo do tempo. Como a entrada de carbono (CO_2) é necessária para posterior assimilação fotossintética, quanto maior a taxa de assimilação de carbono maior será a condutância estomática, e consequentemente, a taxa de transpiração (Taiz *et al.*, 2017).

Tabela 7 - Condutância estomática ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) e taxa de transpiração foliar ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{H}_2\text{O}$) para doses de glufosinate de amônio e mesotrione isoladas e em mistura aplicados em *Borreria spinosa* aos 2, 5 e 7 dias após a aplicação (DAA)

Condutância estomática					Transpiração				
2 DAA									
Glufosinate (g i.a. ha ⁻¹)									
		0	100	200	Média	0	100	200	Média
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0,33	0,11	0,09	0,18	3,19	1,79	1,58	2,19
	100	0,40	0,09	0,12	0,20	3,30	1,49	1,84	2,21
	200	0,37	0,09	0,16	0,21	3,19	1,55	2,17	2,30
Média		0,37 a	0,09 b	0,12 b	0,20	3,23 a	1,61 b	1,86 b	2,23
Fator A			0,000**			0,000**			
Fator B			0,441 ^{ns}			0,774 ^{ns}			
A x B			0,487 ^{ns}			0,344 ^{ns}			
C.V. (%)			33,53			18,80			
DMS			0,05			0,35			
5 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0,36 aA	0,09 bA	0,06 bA	0,17	2,78 aA	1,34 bA	0,92 bA	1,68
	100	0,07 aB	0,06 aA	0,07 aA	0,07	1,01 aB	0,98 aA	0,97 aA	0,99
	200	0,07 aB	0,07 aA	0,12 aA	0,09	0,93 aB	1,14 aA	1,51 aA	1,19
Média		0,17	0,07	0,08	0,11	1,57	1,15	1,13	1,29
Fator A			0,005**			0,141 ^{ns}			
Fator B			0,002**			0,022*			
A x B			0,000**			0,004**			
C.V. (%)			64,17			46,25			
DMS			0,09			0,86			
7 DAA									
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0,37 aA	0,07 bA	0,03 bA	0,16	3,02 aA	0,94 bA	0,54 bA	1,50
	100	0,07 aB	0,04 aA	0,06 aA	0,06	0,99 aB	0,60 aA	1,02 aA	0,87
	200	0,05 aB	0,04 aA	0,06 aA	0,05	0,74 aB	0,75 aA	0,78 aA	0,76
Média		0,16	0,05	0,05	0,09	1,58	0,76	0,78	1,04
Fator A			0,000**			0,002**			
Fator B			0,000**			0,006**			
A x B			0,000**			0,000**			
C.V. (%)			48,59			54,03			
DMS			0,61			0,82			

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% ($p < 0,01$) pelo teste F; * significativo a 5% ($p < 0,05$) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Com a perda de clorofila e danos ao aparato fotossintético ao longo do tempo, e a consequente redução da capacidade de fixação de carbono, a demanda por CO₂ diminui. Assim, ocorre limitação da abertura estomática, aumentando a resistência à difusão de gases e restringindo as trocas gasosas da folha. Com menor entrada de CO₂ e saída de água pelos estômatos, a transpiração é reduzida. Por meio desse mecanismo, a planta regula a perda de água e a absorção de CO₂, uma vez que a mesma está sob estresse (Taiz *et al.*, 2017).

B. spinosa foi altamente sensível aos herbicidas com redução, em média, de 52% da ETR às 6 HAA, o que explica a atividade fotossintética mínima aos 2 DAA. Takano *et al.* (2019) também observaram maior inibição da fotossíntese em espécies com metabolismo C₃ do que em C₄. Outros estudos relataram que espécies eudicotiledôneas possuem maior sensibilidade ao glufosinate em relação a espécies de gramíneas anuais, sendo que a maior sensibilidade pode estar relacionada a quantidade de glufosinate absorvida por cada espécie (Culpepper *et al.*, 2000; Takano *et al.*, 2019).

2.3.2.4 Conteúdo de amônia

O conteúdo de amônia foi significativamente alterado com a aplicação de glufosinate de amônio isolado ou em mistura (Tabela 8). Inicialmente, 1 DAA, as misturas de glufosinate (100 g i.a. ha⁻¹) com mesotrione apresentaram maior acúmulo de amônia em relação ao mesotrione isolado. Contudo, o acúmulo de amônia apresentou variações ao longo do tempo, de acordo com as doses em mistura. Aos 3 DAA, a dose de glufosinate (200 g i.a. ha⁻¹) em mistura com mesotrione acumulou maiores quantidades de amônia em relação às demais misturas. Aos 7 DAA, a mistura de glufosinate (200 g i.a. ha⁻¹) e mesotrione (200 g i.a. ha⁻¹) acumulou maior quantidade de amônia (923,2 mg kg⁻¹ de massa fresca) seguida pelas misturas com mesotrione à 100 g i.a. ha⁻¹ (Figura 11).

O glufosinate de amônio inibe a atividade da enzima glutamina sintetase, bloqueando a conversão de amônia e glutamato em glutamina. Isso leva ao acúmulo de amônia proveniente da fotorrespiração. Assim, a quantificação do acúmulo de amônia pode ser utilizada como indicador para caracterizar a inibição da atividade dessa enzima em plantas tratadas com glufosinate de amônio e para avaliar a

atividade desse herbicida (Carbonari *et al.*, 2016; Brito *et al.*, 2017; Krenchinski *et al.*, 2019).

Tabela 8 - Acúmulo de amônia em *Borreria spinosa* aos 1, 3 e 7 dias após a aplicação (DAA) de doses de glufosinate de amônio e mesotrione aplicados isolados e em mistura.

Concentração de amônia (mg kg ⁻¹ de massa fresca)				
1 DAA				
Glufosinate de amônio (g i.a. ha ⁻¹)				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	0	100	200
	100	5,66 cA	15,89 bB	37,30 aA
	200	2,78 cA	62,24 aA	41,96 bA
	200	3,02 cA	54,65 aA	41,91 bA
Fator A			0,000**	
Fator B			0,000**	
A x B			0,000**	
C.V. (%)			23,43	
DMS			10,03	
3 DAA				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	5,46 bA	249,64 aAB	303,18 aB
	100	2,09 cA	200,05 bB	661,16 aA
	200	2,70 cA	323,93 bA	714,56 aA
	200			
Fator A			0,000**	
Fator B			0,000*	
A x B			0,000*	
C.V. (%)			27,76	
DMS			110,21	
7 DAA				
Mesotrione (g i.a. ha ⁻¹)	0	8,77 bA	616,43 aA	595,99 aB
	100	14,73 bA	609,16 aA	752,57 aB
	200	3,08 cA	364,46 bB	923,24 aA
	200			
Fator A			0,000**	
Fator B			0,537 ^{ns}	
A x B			0,000**	
C.V. (%)			26,08	
DMS			163,49	

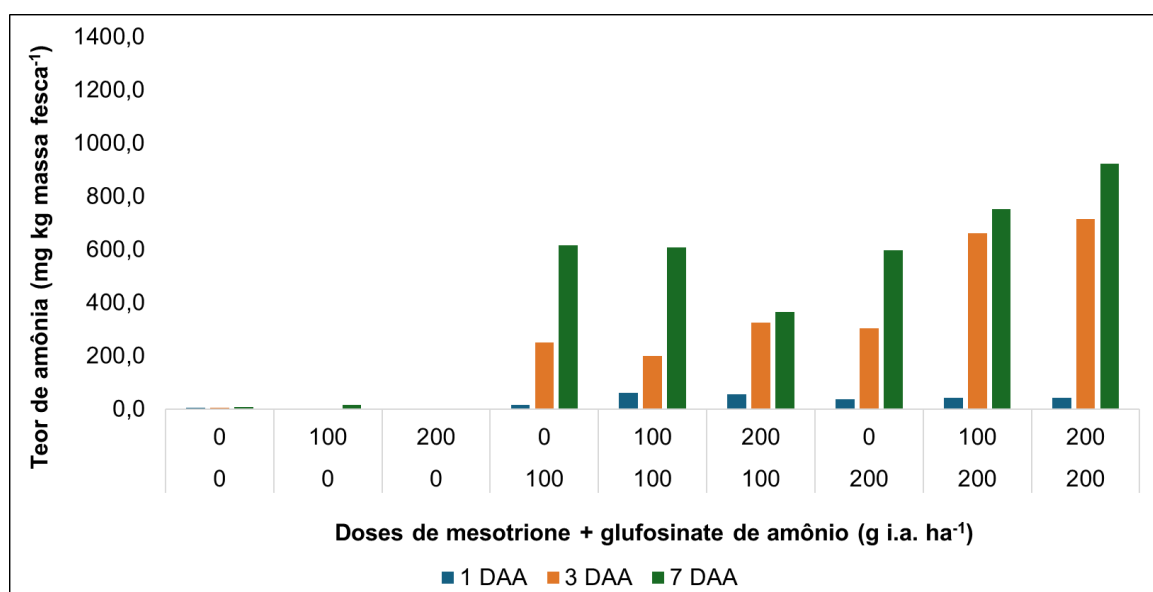
Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste t, ao nível de 5% de significância; ** significativo a 1% (p<0,01) ou * significativo a 5% (p<0,05) pelo teste F; ns: não significativo pelo teste F (p<0,05).

Adicionalmente, nota-se que a adição de mesotrione ao glufosinate pode interferir na atividade do glufosinate, sobre a inibição da glutamina sintetase, dependendo da dose utilizada na mistura. Observa-se tendência de maior acúmulo de amônia quando o mesotrione foi adicionado ao glufosinate a 200 g i.a ha⁻¹. Ao avaliarem o acúmulo de amônia em misturas com glufosinate, em plantas de milho resistentes ao glyphosate e glufosinate, Krenchinski *et al.* (2019) observaram que a

associação de glufosinate (500 g i.a. ha⁻¹) com carfentrazone-ethyl (30 g i.a. ha⁻¹), bentazon (720 g i.a. ha⁻¹) ou 2,4-D (1.005 g e.a. ha⁻¹) aumentaram a concentração de amônia, e a associação com mesotrione (192 g i.a. ha⁻¹) não diferiu em relação ao glufosinate aplicado isoladamente.

Outros trabalhos também têm apresentado aumento na concentração de amônia com a aplicação do glufosinate de amônio em *Amaranthus palmeri* (Coetzer; Al-Khatib, 2001), *Lolium rigidum* (Takano *et al.*, 2019), *Abutilon theophrasti* (Sellers *et al.*, 2004), *Chenopodium álbum*, *Solanum nigrum*, *Tripleurospermum inodorum* e *Echinochloa crus-galli* (Manderscheid *et al.*, 2005), *Euphorbia heterophylla* e *Ipomoea grandifolia* (Castro, 2018).

Figura 11 - Conteúdo de amônia aos 1, 3 e 7 dias após a aplicação (DAA) de doses de glufosinate de amônio e mesotrione aplicados isolados e em mistura



Conforme discutido anteriormente, a mistura apresentou interação aditiva e antagônica no controle de *B. spinosa*. Observou-se uma tendência na redução do efeito da mistura quando se aumentou a dose utilizada. Assim, a mistura permite reduzir a dose utilizada, na qual combinações dos herbicidas a partir das doses de 50 e 100 g i.a. ha⁻¹, de glufosinate com mesotrione, ou vice-versa, apresentaram controles satisfatórios (> 95%).

A mistura desses herbicidas intensificou as alterações nas respostas fisiológicas que resultaram no aumento do controle. Visto que, a ETR foi

significativamente reduzida quando o glufosinate foi associado ao mesotrione. Verificou-se que tal comportamento se correlacionou com a evolução dos sintomas visuais, pois a ETR se manteve baixa, evidenciando maiores danos às plantas.

Paralelamente a esse resultado, as misturas dos herbicidas promoveram redução do conteúdo de clorofila e, acompanhado pelo aumento do teor de amônia, resultou na inibição da atividade fotossintética. Tais respostas fisiológicas podem ser explicadas pela ação que cada molécula desempenha no metabolismo da planta.

Ao inibir a enzima glutamina sintetase, pelo glufosinate, ocorre rápido acúmulo de amônia fotorrespiratória nas células. Esse acúmulo desencadeia uma série de efeitos (Lea, 1991; Wild; Wendler; 1991) e interrompe a fotorrespiração devido à redução de compostos intermediários do ciclo de Calvin, que resultam na inibição da atividade da enzima Rubisco (Sauer *et al.*, 1987; Dayan; Duke, 2014). A inibição da Rubisco causa desequilíbrio entre a renda e o consumo de fótons/ elétrons e consequentemente, o excesso de elétrons nos fotossistemas se ligam à molécula de O₂ originada na quebra da água, formando radicais livres (espécies reativas de oxigênio). O acúmulo dessas ERO no cloroplasto leva à peroxidação de membranas, danos ao aparato fotossintético e à rápida morte celular (Carvalho, 2013; Takano *et al.*, 2019; Takano *et al.*, 2020a).

Por outro lado, o mesotrione bloqueia a síntese de carotenoides e reduz os níveis de plastoquinona e α -tocoferóis. O decréscimo dos níveis de plastoquinona no fotossistema II interfere no fluxo de elétrons entre os fotossistemas. Além disso, a redução da concentração de carotenoides no cloroplasto, leva à perda da fotoproteção de clorofilas, resultando na degradação das mesmas. Assim, por consequência, isso resulta na menor capacidade do complexo antena dos fotossistemas em captar energia luminosa, de modo a afetar o transporte de elétrons e inibir a capacidade fotossintética (Mccurdy *et al.*, 2008). Na ausência de carotenoides, o excesso de energia absorvida pelas clorofilas não é dissipado na forma de calor e, associado à redução de α -tocoferóis, a geração de moléculas oxidativas (clorofila triplet e oxigênio singlet) é intensificado, devido à perda da capacidade de neutralizar essas moléculas, aumentando assim, os danos às proteínas do fotossistema II e degradação das clorofilas (Hess, 2000; Trebst *et al.*, 2002).

A redução nos níveis de carotenoides pelo mesotrione reduz os mecanismos antioxidantes. Esse efeito pode ter contribuído para maiores danos causados pelo estresse oxidativo promovido pelo glufosinate (Trebst *et al.*, 2002; Kruse *et al.*, 2006).

A mistura de mesotrione e glufosinate interferiu de forma positiva na atividade de ambos no metabolismo das plantas de *B. spinosa*, visto que, os sintomas visuais e as respostas fisiológicas foram intensificados com a mistura. Os resultados sugerem uma possível interação fisiológica entre os herbicidas, na qual um herbicida pode ter complementado a ação do outro, embora não tenham sido avaliados os mecanismos de interação. Novos estudos são necessários para compreender quais mecanismos bioquímicos e fisiológicos estão envolvidos na interação desses herbicidas na planta.

2.4 CONCLUSÕES

A mistura de glufosinate de amônio e mesotrione apresenta interação aditiva no controle de *B. spinosa*, contudo, em doses mais altas (400 g i.a. ha⁻¹ de mesotrione) pode ocorrer antagonismo. A mistura de mesotrione e glufosinate de amônio é eficiente no controle de *B. spinosa*, a partir, de doses de 50 e 100 g i.a. ha⁻¹ de glufosinate e mesotrione. Entretanto, estudos em campo ainda são necessários para avaliar as melhores combinações da mistura no controle de *B. spinosa*.

As respostas fisiológicas indicam alterações associadas à inibição da atividade fotossintética, redução dos pigmentos, queda da ETR e acúmulo de amônia. Esses efeitos sugerem possível interação fisiológica entre as moléculas, embora mecanismos diretos como absorção, translocação, metabolismo e estresse oxidativo não tenham sido avaliados.

REFERÊNCIAS

- ABENDROTH, J. A.; MARTIN, A. R.; ROETH, F. W. Plant response to combinations of mesotrione and photosystem II inhibitors. **Weed Technology**, v. 20, n. 1, p. 267-274, 2006.
- ANDRADE JUNIOR, E. J. de. Controle químico de *Spermacoce verticillata* em pré-semeadura da soja. 2020. 29 f. Dissertação (Mestrado profissional em Bioenergia e Grãos) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde.
- ARMEL, G. R.; RICHARDSON, R. J.; WILSON, H. P.; HINES, T. E. Mesotrione and glufosinate in glufosinate-resistant corn. **Weed Technology**, v. 22, n. 4, p.591-596, 2008.
- BARBERIS, L. R. M. **Metodologia para determinação de efeitos fisiológicos e metabólicos do glufosinate em soja**. 2012. 66 f. Tese (Doutorado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.
- BARBIERI, G. F.; YOUNG, B. G.; DAYAN, F. E.; STREIBIG, J. C.; TAKANO, H.; MEROTTO JUNIOR, A.; AVILA, L. A. Herbicide mixtures: interactions and modeling. *Advances in Weed Science*, v. 40, n. 1, p. e020220051, 2022.
- BAYER. Vyconic™ soybeans. Bayer Global, 2026. Disponível em: <<https://www.bayer.com/en/agriculture/vyconic>> Acesso em: 10 ago. 2026.
- BESANÇON, T. E.; PENNER, D.; EVERMAN, W.J. Reduced translocation is associated with antagonism of glyphosate by glufosinate in giant foxtail (*Setaria faberi*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science**, v. 66, p.159-167, 2018.
- BETHKE, R. K.; MOLIN, W. T.; SPRAGUE, C.; PENNER, D. Evaluation of the Interaction between Glyphosate and Glufosinate. **Weed Science**, v. 61, p. 41-47, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. AGROFIT: Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários. Brasília, DF: MAPA, [s.d.]. Disponível em: <https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 11 set. 2026.
- BRITO, I. P. F. S.; MORAES, C. P.; MARCHESI, B. B.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Sensitivity of morningglory plants and their progenies to glufosinate ammonium. **Planta Daninha**, v. 35, p. e017159881, 2017.
- BROSNAN, J. T.; KOPSELL, D. A.; ARMEL, G. R.; MCELROY, J. S. Changes in 'Riviera' bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] carotenoid pigments after treatment with three p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase-inhibiting herbicides. **HortScience**, v. 46, n. 3, p. 493-498, 2011.
- BULEGON, L. G.; GUIMARÃES, V. F.; LAURETH, J. C. U.; BATTISTUS, A. G.; INAGAKI, A. M. Intoxicação por mesotriona em milho inoculado com *Azospirillum*

brasiliense e com aplicação de reguladores de crescimento vegetal. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019188937, 2019.

CARBONARI, C. A.; LATORRE, D. O.; GOMES, G. L. G. C.; VELINI, E. D.; OWENS, D. K.; PAN, Z.; DAYAN, F. E. Resistance to glufosinate is proportional to phosphinothricin acetyltransferase expression and activity in LibertyLink® and WideStrike® cotton. **Planta Daninha**, v. 243, n. 4, p. 925-933, 2016.

CARVALHO, L. B. DE. **Herbicidas**. Lages, SC, 1 ed. 62 p. 2013.

CASTRO, E. B. **Efeito da aplicação diurna e noturna de glufosinate no acúmulo de amônia, taxa de transporte de elétrons e controle de plantas daninhas**. 2018. Tese (Doutorado em Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2018.

COETZER, E.; AL-KHATIB, K. Inibição fotossintética e acúmulo de amônio em amaranto-palmer após aplicação de glufosinato. **Weed Science**, v. 49, n. 4, p. 454-459, 2001.

COLBY, S. R. Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations. **Weeds**, v. 15, n. 1, p. 20–22, 1967.

CORREIA, N. M. Desafios no manejo de vassourinha-de-botão em ambiente de Cerrado. 2023.

CORREIA, N. M.; MATHIONI, S. M.; MIGUEL, L. M.; MIRANDA, Z. J.; LEMES, L. N. Morphological and molecular identification of buttonweed species in Brazil. **Advances in Weed Sciences**, v. 44, p. e020252061, 2026.

CREECH, J. E.; MONACO, T. A.; EVANS, J. O. Photosynthetic and growth responses of *Zea mays* L. and four weed species following post-emergence treatments with mesotrione and atrazine. **Pest Management Science**, v. 60, n. 11, p. 1079-1084, 2004.

CULPEPPER, A. S.; YORK, A. C.; BATTS, R. B.; JENNINGS, K. M. Weed management in glufosinate- and glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technology*, n. 14, p. 77–88, 2000.

DAYAN, F. E.; ZACCARO, M. L. M. Chlorophyll fluorescence as a marker for herbicide mechanisms of action. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 102, n. 3, p. 189-197, 2012.

DAYAN, F. E.; DUKE, S. O. Natural compounds as next generation herbicides. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1090-1105, 2014.

DAYAN, F. E.; OWENS, D.K.; CORNIANI, N.; SILVA, M. L.; WATSON, S. B.; HOWELL, J'L.; SHANER, D. L. Biochemical markers and enzyme assays for herbicide mode of action and resistance studies. **Weed Science**, v. 63, n. 1, p. 23-63, 2015.

DAYAN, F. E. Current Status and Future Prospects in Herbicide Discovery. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 341, 2019.

DE GOES MACIEL, C. D. *et al.* Potencialization of mesotrione efficiency in tank mixture with inhibiting of Photosystem II by distinct absorption pathways of crabgrass. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 210-219, 2013.

FADIN, D. A; TORNISIELO, V. L; BARROSO, A. A. M; RAMOS, S; dos REIS, F. C; MONQUERO, P. A. Absorption and translocation of glyphosate in *Spermacoce verticillata* and alternative herbicide control. **Weed Research**, v. 58, n. 5, p. 389-396, 2018.

FADIN, D. A; MONQUERO, P. A. Leaf characterization of *Spermacoce verticillata* at three stages of development. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 5, p. 792-797, 2019.

FLUTTERT, J. C.; SOLTANI, N.; GALLA, M.; HOOKER, D. C.; ROBINSON, D. E.; SIKKEMA, P. H. Interaction between 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase–inhibiting and reactive oxygen species–generating herbicides for the control of annual weed species in corn. **Weed Science**, v. 70, n. 4, p. 423-435, 2022a.

FLUTTERT, J. C.; SOLTANI, N.; GALLA, M.; HOOKER, D. C.; ROBINSON, D. E.; SIKKEMA, P. H. Additive and synergistic interactions of 4- hydroxyphenylpyruvate dioxygenase (HPPD) and photosystem II (PSII) inhibitors for the control of glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) in corn. **Weed Science**, v. 70, n. 3, p. 319–327, 2022b.

GANIE, Z. A.; JHALA, A. J. Interaction of 2,4-D or dicamba with glufosinate for control of glyphosate-resistant giant ragweed (*Ambrosia trifida* L.) in glufosinate-resistant maize (*Zea mays* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1207, 2017.

HESS, F. D. Review: Light-dependent herbicides: an overview. **Weed Science**, v. 48, n. 2, p. 160-170, 2000.

HUGIE, J. A.; BOLLERO, G. A.; TRANEL, P. J.; RIECHERS, D. E. Defining the rate requirements for synergism between mesotrione and atrazine in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*). **Weed Science**, v. 56, n. 2, p. 265-270, 2008.

IKEDA, F. S.; OLIBONE, A. P. E.; GUIMARÃES, A. C.; DA SILVA, L. C. Manejo de vassourinha-de-botão (*Borreria spinosa*) na sucessão soja-milho. Sinop: Embrapa Agrossilvipastoril, 2025. 22p. (Embrapa Agrossilvipastoril, Documentos, 11).

JONES, E. A. L.; LEON, R. G.; EVERMAN, W. J. Control of pervasive row crop weeds with dicamba and glufosinate applied alone, mixed, or sequentially. **Weed Technology**, v. 36, n. 5, p. 733-739, 2022.

JOSEPH, D. D.; MARSHALL, M. W.; SANDERS, C. H. Efficacy of 2,4-D, dicamba, glufosinate and glyphosate combinations on selected broadleaf weed heights. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, p. 1321-1333, 2018.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**: Tomo III. 2. ed. São Paulo: Basf, 2000. 725 p.

KOGER, C. H.; BURKE, I. C.; MILLER, D. K.; KENDING, J. A.; REDDY, K. N.; WILCUT, J. W. MSMA antagonizes glyphosate and glufosinate efficacy on broadleaf and grass weeds. **Weed Technology**, v. 21, n. 1, p. 159-165, 2007.

KOPSELL, D. A.; BROSNAN, J. T.; ARMEL, G. R.; MCELROY, J. S. Increases in bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] tissue pigments during post-application recovery from mesotrione. **HortScience**, v. 45, n. 10, p. 1559-1562, 2010.

KRENCHINSKI, F. H.; CESCO, V. J. S.; CASTRO, E. B.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Ammonium glufosinate associated with post-emergence herbicides in corn with the CP4-EPSPS and Pat Genes. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019184453, 2019.

KRUSE, N. D.; VIDAL, R. A.; BAUMAN, T. T.; TREZZI, M. M. Sinergismo potencial entre herbicidas inibidores do fotossistema II e da síntese de carotenóides. **Ciência Rural**, v. 31, n. 4, p. 569-575, 2001.

KRUSE, N. D.; VIDAL, R. A.; TREZZI, M. M. Curvas de resposta e isoblograma como forma de descrever a associação de herbicidas inibidores do fotossistema II e da síntese de carotenóides. **Planta Daninha**, v. 24, n. 3, p. 579-587, 2006.

LACUESTA, M.; MUÑOZ-RUEDA, A.; GONZÁLEZ-MURUA, C.; SIVAK, M. N. Effect of phosphinothricin (glufosinate) on photosynthesis and chlorophyll fluorescence emission by barley leaves illuminated under photorespiratory and non-photorespiratory conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 43, n. 2, p. 159-165, 1993.

LEA, P. J. The inhibition of ammonia assimilation: a mechanism of herbicide action. In: BAKER, N. R.; PERCIVAL, M. P. (ed.). **Herbicides**. New York: Elsevier, 1991. p. 267-297.

LEE, D. L.; PRISBYLLA, M. P.; CROMARTIE, T. H.; DAGARIN, D. P.; HOWARD, S. W.; PROVAN, W. M.; ELLIS, M. K.; FRASER, T.; MUTTER, L. C. The discovery and structural requirements of inhibitors of p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase. **Weed Science**, v. 45, n. 5, p. 601-609, 1997.

LIMA, C. C.; SILVA, R. P.; JERONIMO, A. V.; HIRATA, A. C. S.; MONQUERO, P. A. Estágios fenológicos associados ao controle químico no manejo de *Spermacoce densiflora* originada de sementes e rebrota. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 3. 2019.

LIMA, M. P. de S.; SOARES, A.; PORTO, J. M. P.; SÁ, F. S.; CARVALHO, M. dos S.; BRAGA, F. T. Leaf anatomy of Rubiaceae species in a semiarid área of Brazil. **Rodriguésia**, v. 70, e01562018, 2020.

- LU, Y.; LI, Y.; YANG, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; PENG, X.-X. Suppression of glycolate oxidase causes glyoxylate accumulation that inhibits photosynthesis through deactivating Rubisco in rice. **Physiologia Plantarum**, v. 150, n. 3, p. 463–476, 2014.
- LV, G.; LI, X.; WANG, T.; WU, Z.; FANG, R.; CHEN, J. Mechanisms Underlying the Differential Sensitivity to Mesotrione in Sweet Corn. **Agronomy**, v. 14, n. 3, p. 555, 2024.
- MANDERSCHIED, R.; SCHAAF, S.; MATTSSON, M.; SCHJOERRING, J. K. Glufosinate treatment of weeds results in ammonia emission by plants. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 109, n. 1-2, p. 129-140, 2005.
- MARTINS, B. A. B. **Biologia e manejo da planta daninha *Borreria densiflora* DC.** 2008. Tese (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 169p. 2008.
- MARTINS, B. A. B.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Herbicide efficacy on *Borreria densiflora* control in pre-and post-emergence conditions. **Planta daninha**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 817-825, 2014.
- MATRINGE, M.; SAILLAND, A.; PELISSIER, B.; ROLLAND, A.; ZINK, O. p-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitor-resistant plants. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 61, n. 3, p. 269-276, 2005.
- MCCURDY, J. D.; MCELROY, J. S.; KOPSELL, D. A.; SAMS, C. E.; SOROCHAN, J. C. Efeitos do mesotrione nas concentrações de carotenoides do azevém perene (*Lolium perenne* L.) sob diferentes condições ambientais. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 19, p. 9133-9139, 2008.
- MCCURDY, J. D.; MCELROY, J. S.; KOPSELL, D. A.; SAMS, C. E. Controle de mesotriona e concentração de pigmentos em capim-caranguejo (*Digitaria sanguinalis*) sob diferentes condições ambientais. **Pest Management Science**, v. 65, n. 6, p. 640-644, 2009.
- MEYER, C. J.; PETER, F.; NORSWORTHY, J. K.; BEFFA, R. Uptake, translocation, and metabolism of glyphosate, glufosinate, and dicamba mixtures in *Echinochloa crus-galli* and *Amaranthus palmeri*. **Pest Management Science**, v. 76, n. 9, p. 3078-3087, 2020.
- MINOZZI, G. B. **Eficácia, absorção e translocação de glifosato e 2, 4-D em *Spermacoce verticillata* (L.).** 2022. Tese de Doutorado (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.
- MITSCHERLICH, E. A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtschaftliches Jahrbuch**, v. 38, p. 537-552, 1909.

MONQUERO, P. A.; SILVA, A. C.; HIRATA, A. C. S. Eficácia de herbicidas aplicados em diferentes épocas e espécies daninhas em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente. **Planta Daninha**, v. 27, n. 2, p. 309-317, 2009.

NEPOMUCENO, F. A. A.; SOUZA, E. B. DE; NEPOMUCENO, I. V.; MIGUEL, L. M.; CABRAL, E. L.; LOIOLA, M. I. B. O gênero *Borreria* (Spermacoceae, Rubiaceae) no estado do Ceará, Brasil. **Rodriguésia**, v. 69, n. 2, p. 715-731, 2018.

REDDY, K. N.; ZABLOTOWICZ, R. M.; BELLALLOUI, N.; DING, W. Glufosinate effects on nitrogen nutrition, growth, yield, and seed composition in glufosinate-resistant and glufosinate-sensitive soybean. **International Journal of Agronomy**, v. 2011, p. 1-12, 2011.

SANCHES, A. K. S.; WITTER, A. P. W.; ACCETTI, J. M. S.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J. Controle químico em pré-emergência e pós-emergência de *Spermacoce verticillata*. **ARACÊ**, v. 7, n. 2, p. 8509-8522, 2025.

SAUER, H.; WILD, A.; RÜHLE, W. The effect of phosphinotricin (glufosinate) on photosynthesis. II. The causes of inhibition of cell photosynthesis. **Verlag der Zeitschrift für Naturforschung**, v. 42, n. 3, p. 270-278, 1987.

SELLERS, B. A.; SMEDA, R. J.; LI, J. Glutamine synthetase activity and ammonium accumulation is influenced by time of glufosinate application. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 78, n. 1, p. 9-20, 2004.

SILVEIRA, H. M.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; NETO, M. D. C.; CARVALHO, F. P.; SANTOS, J. B.; SILVA, A.A. Características fisiológicas de cultivares de mandioca após aplicação do mesotrione. **Planta Daninha**, v. 31, n. 2, p. 403-409, 2013.

SILVEIRA, R. F.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; GOMES, G. L. G. C. Interacting effects on absorption and translocation of ¹⁴C-mesotrione and ¹⁴C-atrazine mixture for morning glory (*Ipomoea hederifolia*) control. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, p. 563-573, 2020.

SOLTANI, N.; SHROPSHIRE, C.; SIKKEMA, P. H. Weed control in dicamba-resistant soybean with glyphosate/dicamba applied at various doses and timings. **International Journal of Agronomy**, v. 2020, p. 8903941, 2020.

SUN, S.; WANG, L.; WANG, S.; YU, N.; ZHONG, X. Photosynthetic and Physiological Responses of Different Maize Varieties to Mesotrione. **Agronomy**, v. 14, n. 8, p. 1701, 2024.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Reactive oxygen species trigger the fast action of glufosinate. **Planta**, v. 249, p. 1837-1849, 2019.

TAKANO, H. K.; DAYAN, F. E. Glufosinate-ammonium: a review of the current state of knowledge. **Pest Management Science**, v. 76, n. 11, p. 3911–3925, 2020.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. A novel insight into the mode of action of glufosinate: how reactive oxygen species are formed. **Photosynthesis Research**, v. 144, p. 361-372, 2020a.

TREBST, A.; DEPKA, B.; HOLLÄNDER-CZYTKO, H. A specific role for tocopherol and of chemical singlet oxygen quenchers in the maintenance of photosystem II structure and function in *Chlamydomonas reinhardtii*. **FEBS Letters**, v. 516, p. 156–160, 2002.

WENDLER, C.; BARNISKE, M.; WILD, A. Effect of phosphinothricin (glufosinate) on photosynthesis and photorespiration of C3 and C4 plants. **Photosynthesis Research**, v. 24, p. 55–61, 1990.

WILD, A.; WENDLER, C. Effect of glucosinate (phosphinothricin) on amino acid content, photorespiration and photosynthesis. **Pesticide Science**, v. 30, p. 422–424, 1991.

WILD, A.; WENDLER, C. Inhibitory action of glufosinate on photosynthesis. **Zeitschrift für Naturforsch**, v. 48, n. 3-4, p. 369–373, 1993.

ZHANG, J.; HAMILL, A. S.; WEAVER, S. E. Antagonism and synergism between herbicides: trends from previous studies. **Weed Technology**, v. 9, n. 1, p. 86-90, 1995.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mistura de glufosinate de amônio com mesotrione, de forma geral apresenta efeitos aditivos e sinérgicos no controle de *E. indica* e efeito aditivo no controle de *B. spinosa*. Portanto, a interação desses herbicidas em mistura é dependente da espécie, em virtude, da sensibilidade de cada espécie a esses herbicidas.

Esse trabalho evidencia que a mistura de glufosinate de amônio e mesotrione apresenta potencial de uso no controle de *E. indica* resistente ao glyphosate e *B. spinosa*, e essa interação depende da dose utilizada. Novos estudos serão necessários para identificar as combinações de doses de glufosinate e mesotrione com maior eficácia de controle dessas espécies em condições de campo.

As respostas fisiológicas indicam alterações associadas à inibição da atividade fotossintética, redução dos pigmentos, queda da ETR e acúmulo de amônia. Esses efeitos sugerem possível interação fisiológica entre as moléculas, embora mecanismos diretos como absorção, translocação, metabolismo e estresse oxidativo não tenham sido avaliados.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE JUNIOR, E. J. de. Controle químico de *Spermacoce verticillata* em pré-semeadura da soja. 2020. 29 f. Dissertação (Mestrado profissional em Bioenergia e Grãos) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde.
- AVILA-NETO, R.; ULGUIM, A. R.; SCHNEIDER, T.; FORTUNA, C.; HOLKEM, A. S.; SOMAVILLA, I. P. Interaction between saflufenacil and ammonium glufosinate to control ryegrass. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e286456, 2024.
- BARBIERI, G. F.; YOUNG, B. G.; DAYAN, F. E.; STREIBIG, J. C.; TAKANO, H.; MEROTTO JUNIOR, A.; AVILA, L. A. Herbicide mixtures: interactions and modeling. *Advances in Weed Science*, v. 40, n. 1, p. e020220051, 2022.
- BAYER. Vyconic™ soybeans. Bayer Global, 2026. Disponível em: <<https://www.bayer.com/en/agriculture/vyconic>> Acesso em: 10 ago. 2026.
- BIANCHI, L.; ANUNCIATO, V.M.; GAZOLA, T.; PERISSATO, S.M.; DE CARVALHO DIAS, R.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Effects of glyphosate and clethodim alone and in mixture in sourgrass (*Digitaria insularis*). *Crop Protection*, v. 138, p. 105322, 2020.
- BRIDGES, D. C. Pigment inhibitors. In: **Herbicide action course**. West Lafayette: Purdue University, 2003. p. 373-382.
- BESANÇON, T. E.; PENNER, D.; EVERMAN, W.J. Reduced translocation is associated with antagonism of glyphosate by glufosinate in giant foxtail (*Setaria faberi*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science**, v. 66, p.159-167, 2018.
- BETHKE, R. K.; MOLIN, W. T.; SPRAGUE, C.; PENNER, D. Evaluation of the Interaction between Glyphosate and Glufosinate. **Weed Science**, v. 61, p. 41-47, 2013.
- BURKE, I. C.; ASKEW, S. D.; CORBETT, J. L.; WILCUT, J. W. Glufosinate antagonizes clethodim control of goosegrass (*Eleusine indica*). **Weed Technology**, v. 19, n. 3, p. 664-668, 2005.
- CALDAS, J. V. S.; SILVA, A. G.; BRAZ, G. B. P.; PROCÓPIO, S. O.; TEIXEIRA, I. R.; SOUZA, M. F. Weed competition on soybean varieties from different relative maturity groups. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 1-12, 2023.
- CHUAH, T. S.; TWH, H. H.; CHA, T. S.; ISMAIL, B. S. Antagonismo da atividade do glufosinato de amônio causado pelo glifosato nas misturas de tanque usadas para o controle de capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica* Gaertn.). **Plant Protection Quarterly**, v. 23, n. 3, p. 116-119, 2018.
- CORREIA, N. M.; MATHIONI, S. M.; MIGUEL, L. M.; MIRANDA, Z. J.; LEMES, L. N. Morphological and molecular identification of buttonweed species in Brazil. **Advances in Weed Sciences**, v. 44, p. e020252061, 2026.

DAYAN, F. E.; CANTRELL, C. L.; DUKE, S. O. Natural products in crop protection. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, n.17, p. 4022-4034, 2009.

DAYAN, F. E.; DUKE, S. O. Natural compounds as next generation herbicides. **Plant Physiology**, v. 166, n. 3, p. 1090-1105, 2014.

DAYAN, F. E. Current Status and Future Prospects in Herbicide Discovery. **Plants**, v. 8, n. 9, p. 341, 2019.

DE GOES MACIEL, C. D. *et al.* Potencialization of mesotrione efficiency in tank mixture with inhibiting of Photosystem II by distinct absorption pathways of crabgrass. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 3, p. 210-219, 2013.

DE OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Curitiba, PR. Omnipax. 1 ed. 348 p. 2011.

FADIN, D. A.; TORNISIELO, V. L.; BARROSO, A. A. M; RAMOS, S; dos REIS, F. C; MONQUERO, P. A. Absorption and translocation of glyphosate in *Spermacoce verticillata* and alternative herbicide control. **Weed Research**, v. 58, n. 5, p. 389-396, 2018.

GANIE, Z. A.; JHALA, A. J. Interaction of 2,4-D or dicamba with glufosinate for control of glyphosate-resistant giant ragweed (*Ambrosia trifida* L.) in glufosinate-resistant maize (*Zea mays* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1207, 2017.

GAZZIERO, D. L. P. Misturas de agrotóxicos em tanque nas propriedades agrícolas do Brasil. **Planta Daninha**, v. 33, n. 1, p. 83-92, 2015.

HEAP, I. **The International Herbicide-Resistant Weed Database**. 2026. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 20 jun. 2026.

HESS, F. D. Review: Light-dependent herbicides: an overview. **Weed Science**, v. 48, n. 2, p. 160-170, 2000.

JONES, E. A. L.; LEON, R. G.; EVERMAN, W. J. Control of pervasive row crop weeds with dicamba and glufosinate applied alone, mixed, or sequentially. **Weed Technology**, v. 36, n. 5, p. 733-739, 2022.

JOSEPH, D. D.; MARSHALL, M. W.; SANDERS, C. H. Efficacy of 2,4-D, dicamba, glufosinate and glyphosate combinations on selected broadleaf weed heights. **American Journal of Plant Sciences**, v. 9, p. 1321-1333, 2018.

KRENCHINSKI, F. H.; CESCO, V. J. S.; CASTRO, E. B.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Ammonium glufosinate associated with post-emergence herbicides in corn with the *CP4-EPSPS* and *Pat Genes*. **Planta Daninha**, v. 37, p. e019184453, 2019.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**: Tomo III. 2. ed. São Paulo: Basf, 2000. 725 p.

LEE, D. L.; PRISBYLLA, M. P.; CROMARTIE, T. H.; DAGARIN, D. P.; HOWARD, S. W.; PROVAN, W. M.; ELLIS, M. K.; FRASER, T.; MUTTER, L. C. The discovery and structural requirements of inhibitors of p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase. **Weed Science**, v. 45, n. 5, p. 601-609, 1997.

LIMA, C. C.; SILVA, R. P.; JERONIMO, A. V.; HIRATA, A. C. S.; MONQUERO, P. A. Estágios fenológicos associados ao controle químico no manejo de *Spermacoce densiflora* originada de sementes e rebrota. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 18, n. 3. 2019.

LU, Y.; LI, Y.; YANG, Q.; ZHANG, Z.; CHEN, Y.; ZHANG, S.; PENG, X.-X. Suppression of glycolate oxidase causes glyoxylate accumulation that inhibits photosynthesis through deactivating Rubisco in rice. **Physiologia Plantarum**, v. 150, n. 3, p. 463–476, 2014.

MARKWELL, J.; NAMUTH, D.; HERNÁNDEZ-RIOS, I. Herbicidas que Actúan A través de la Fotosíntesis. 2019. Disponível em: <<https://passel2.unl.edu/view/lesson/89c19f73669f>> Acesso em:15 de maio de 2026.

MARTINS, B. A. B. **Biologia e manejo da planta daninha *Borreria densiflora* DC.** 2008. Tese (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 169p. 2008.

MARTINS, B. A. B.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Herbicide efficacy on *Borreria densiflora* control in pre-and post-emergence conditions. **Planta daninha**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 817-825, 2014.

MATRINGE, M.; SAILLAND, A.; PELISSIER, B.; ROLLAND, A.; ZINK, O. p-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitor-resistant plants. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, v. 61, n. 3, p. 269-276, 2005.

MINOZZI, G. B. **Eficácia, absorção e translocação de glifosato e 2, 4-D em *Spermacoce verticillata* (L.).** 2022. Tese de Doutorado (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2022.

MITCHELL, G.; BARTLETT, D. W.; FRASER, T. E. M.; HAWKES, T. R.; HOLT, D. C.; TOWNSON, J. K.; WICHERT, R. A. Mesotrione: a new selective herbicide for use in maize. **Pest Management Science**, n. 57, p. 120–128, 2001.

MONQUERO, P. A.; SILVA, A. C.; HIRATA, A. C. S. Eficácia de herbicidas aplicados em diferentes épocas e espécies daninhas em área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente. **Planta Daninha**, v. 27, n. 2, p. 309-317, 2009.

MORELAND, D. E. Mechanisms of action of herbicides. Annual review. **Plant Physiology**, Rockville, p. 610, 1980.

PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A.; VARGAS, L.; FERREIRA, F. A. **Manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar**. Viçosa: UFV, 150 p., 2003.

RUDELL, E. C.; PETROLI, I. D. S.; SANTOS, F. M.; FRANDALOSO, D.; SILVA, D. R. O. Weed interference capacity on soybean yield. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 74, n. 2, p. 9541-9547, 2021.

SAUER, H.; WILD, A.; RÜHLE, W. The effect of phosphinotricin (glufosinate) on photosynthesis. II. The causes of inhibition of cell photosynthesis. **Verlag der Zeitschrift für Naturforschung**, v. 42, n. 3, p. 270-278, 1987.

SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: UFV, 1 ed. 367p.2007.

SILVEIRA, R. F. *et al.* Interacting effects on absorption and translocation of 14 C-mesotrione and 14 C-atrazine mixture for morning glory (*Ipomoea hederifolia*) control. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, p. 563-573, 2020.

SOLTANI, N.; SHROPSHIRE, C.; SIKKEMA, P. H. Weed control in dicamba-resistant soybean with glyphosate/dicamba applied at various doses and timings. **International Journal of Agronomy**, v. 2020, p. 8903941, 2020.

SOUZA, M. F.; HENCKES, J. R.; ZOBIOLE, L. H. S.; OLIVEIRA JR., R. S.; BRAZ, G. B. P.; CONSTANTIN, J. Competitive response of maize against glyphosate-resistant *Digitaria insularis* and *Eleusine indica*. **Crop Protection**, v. 183, p. 106760, 2024.

TAKANO, H. K.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; BRAZ, G. B. P.; GHENO, E. A. Growth, Development and Seed Production of Goosegrass. **Planta Daninha**, v. 34, n. 2, p. 249-258, 2016.

TAKANO, H. K.; OLIVEIRA, JR. R. S.; CONSTANTIM, J.; SILVA, V. F. V.; MENDES, R. R. Chemical control of glyphosate-resistant goosegrass. **Planta Daninha**, v. 36, p. e018176124, 2018.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Reactive oxygen species trigger the fast action of glufosinate. **Planta Daninha**, v. 2449, p. 1837-1849, 2019.

TAKANO, H. K.; DAYAN, F. E. Glufosinate-ammonium: a review of the current state of knowledge. **Pest Management Science**, v. 76, p. 3911–3925, 2020.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. Physiological factors affecting uptake and translocations of glufosinate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 68, p. 3026-3032, 2020a.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. A novel insight into the mode of action of glufosinate: how reactive Oxygen species are formed. *Photosynthesis Research*, v. 144, p. 361-372, 2020b.

TAKANO, H. K.; BEFFA, R.; PRESTON, C.; WESTRA, P.; DAYAN, F. E. Glufosinate enhances the activity of protoporphyrinogen oxidase inhibitors. **Weed Science**, v. 68, n. 4, p. 324-332, 2020c.

TREBST, A.; DEPKA, B.; HOLLÄNDER-CZYTKO, H. A specific role for tocopherol and of chemical singlet oxygen quenchers in the maintenance of photosystem II structure and function in *Chlamydomonas reinhardtii*. **FEBS Letters**, v. 516, n. 1-3, p. 156–160, 2002.

WILD, A.; WENDLER, C. Inhibitory action of glufosinate on photosynthesis. **Zeitschrift für Naturforsch**, v. 48, n. 3-4, p. 369–373, 1993.

ZHANG, J.; HAMILL, A. S.; WEAVER, S. E. Antagonism and synergism between herbicides: trends from previous studies. **Weed Technology**, n. 9, v. 1, p. 86-90, 1995.