

UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

TOLERÂNCIA E DESEMPENHO AGRONÔMICO DE CULTIVARES DE
SOJA A SUBDOSES DE FLUMIOXAZIN

GABRIEL DOS REIS

Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL

2026

GABRIEL DOS REIS

**TOLERÂNCIA E DESEMPENHO AGRONÔMICO DE CULTIVARES DE SOJA A
SUBDOSES DE FLUMIOXAZIN**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de
Rio Verde, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*

**RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL**

2026

Universidade de Rio Verde
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

R31t

Reis, Gabriel dos

Tolerância e desempenho agronômico de cultivares de soja a subdoses de flumioxazin. / Gabriel dos Reis. – 2026.
53 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Braga Pereira Braz.

Coorientador: Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza.

Coorientador: Prof. Dr. Fellipe Goulart Machado.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Rio Verde - UniRV, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Faculdade de Agronomia, 2026.

Inclui índice de figuras e tabelas.

1. Herbicida. 2. Flumioxazin. 3. *Glycine max* (L.). I. Braz, Guilherme Braga Pereira. II. Souza, Matheus de Freitas. III. Machado, Fellipe Goulart. VI. Título.

CDD: 632.954

Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158

GABRIEL DOS REIS

**TOLERÂNCIA E DESEMPENHO AGRONÔMICO DE CULTIVARES DE SOJA A
SUBDOSES DE FLUMIOXAZIN**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 01 de Julho de 2026



Documento assinado digitalmente

GUILHERME BRAGA PEREIRA BRAZ

Data: 01/07/2026 17:06:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Guilherme Braga Pereira Braz
Presidente da Banca Examinadora
PPGPV – UniRV



Documento assinado digitalmente

DENIS FERNANDO BIFFE

Data: 01/07/2026 16:46:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Denis Fernando Biffe
Membro externo – UEM



Documento assinado digitalmente

ALESSANDRO GUERRA DA SILVA

Data: 02/07/2026 09:00:12-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alessandro Guerra da Silva
Membro – PPGPV/UniRV



Documento assinado digitalmente

MATHEUS DE FREITAS SOUZA

Data: 01/07/2026 17:10:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza
Membro – PPGPV/UniRV

EPÍGRAFE

*“A fé e a razão são como as duas asas pelas quais
o espírito humano se eleva à contemplação da
verdade.”*

São João Paulo II

DEDICATÓRIA

A Deus, pois sem sua presença, força e amparo, esta conquista não seria possível.

A todas as pessoas, que me apoiaram, incentivaram e estiveram presentes ao longo desta jornada, contribuindo direta ou indiretamente para a realização deste sonho.

A minha mãe, pelo amor incondicional, pelo exemplo de luta, fé e perseverança, e por nunca deixar de me apoiar em todos os momentos, mesmo à distância.

A minha querida vozinha, que, embora não esteja mais presente, permanece viva em minha memória e em meu coração. Seus conselhos, especialmente aqueles que me incentivavam a estudar e buscar um futuro melhor, foram fundamentais para que eu continuasse firme nesta caminhada.

Aos meus familiares, que, apesar da distância, sempre me ofereceram apoio, carinho e incentivo para seguir em frente.

Por fim, dedico este trabalho a mim mesmo, por não ter desistido diante dos desafios, por conciliar os afazeres diários com a busca pelo conhecimento e por superar meus próprios limites na concretização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho de Mestrado.

A Deus, pela oportunidade de crescimento pessoal, acadêmico e profissional, por me conceder força, sabedoria e perseverança, e por nunca permitir que a fé se perdesse ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Guilherme Braga Pereira Braz, pela orientação, pelos valiosos conselhos e por todo o conhecimento compartilhado durante este processo. Sua experiência, dedicação e comprometimento foram fundamentais para que eu pudesse encarar este desafio com uma nova visão, contribuindo de forma decisiva para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza, pelo tempo concedido, pela disponibilidade em ajudar e pelas importantes contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador Pesquisador Dr. Fellipe Goulart Machado, que, mesmo diante de uma rotina intensa e de inúmeros compromissos, sempre se dispôs a colaborar e contribuir para a realização deste estudo.

Ao professor Dr. Márcio Rosa, pela disponibilidade, atenção e colaboração sempre que solicitado, contribuindo de maneira importante para este trabalho no que se relaciona às análises fisiológicas.

Ao professor Dr. Gustavo André Simon, pela participação essencial e pelo auxílio na condução das análises estatísticas, contribuindo significativamente, para o desenvolvimento e interpretação dos resultados.

Aos professores Dr. Alessandro Guerra da Silva e Dr. Denis Fernando Biffe, pela disponibilidade em participar da banca examinadora deste trabalho.

A toda a equipe do Grupo de Estudo em Fitossanidade do Cerrado - GEFIC, pela parceria, colaboração e disposição em ajudar em todas as etapas de condução do trabalho.

Aos meus amigos Diego Carvalho e Rafael Cabral, pela amizade, apoio, disponibilidade e pelas importantes contribuições, durante a condução do experimento, sempre ajudando e compartilhando experiências.

À equipe da CentroAgro, pela disponibilidade, apoio e colaboração na condução deste trabalho.

Ao meu gestor Gilberto Siqueira Filho, pelo apoio, compreensão e incentivo, durante a realização do mestrado, bem como pela disponibilidade concedida para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Aos colegas de curso e aos demais professores da instituição, pela convivência, troca de conhecimentos, experiências compartilhadas e contribuições ao longo desta jornada acadêmica.

Por fim, agradeço à Universidade de Rio Verde - UniRV, pela oportunidade de realizar o mestrado e por proporcionar um ambiente acadêmico favorável ao aprendizado, ao crescimento profissional e ao desenvolvimento pessoal.

Este trabalho representa o resultado de uma caminhada construída com o apoio de muitas pessoas. A todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta conquista, deixo minha mais profunda gratidão.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Importância econômica da soja e a problemática das plantas daninhas.....	2
2.2 Uso de herbicidas residuais: foco no flumioxazin.....	2
2.3 Presença de resíduos em pulverizadores e impactos agronômicos na soja.....	3
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	5
3.1 Estudo I: Efeitos deletérios de resíduos de flumioxazin no desenvolvimento inicial de cultivares de soja.....	5
3.2 Estudo II: Desempenho agronômico de cultivares de soja expostas à resíduos de flumioxazin.....	7
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
4.1 Estudo I: Efeitos deletérios de resíduos de flumioxazin no desenvolvimento inicial de cultivares de soja.....	9
4.2 Estudo II: Desempenho agronômico de cultivares de soja expostas à resíduos de flumioxazin.....	21
5 CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento em Rio Verde (GO), 2025.....	7
FIGURA 2	Porcentagem de fitointoxicação da soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	13
FIGURA 3	Altura de plantas de soja em função da subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	16
FIGURA 4	Índice relativo de clorofila b em plantas de soja a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura (4 DAA).....	18
FIGURA 5	Taxa de fotossíntese líquida (A) da soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	19
FIGURA 6	Porcentagem de fitointoxicação da soja função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	24
FIGURA 7	Índice relativo de clorofila a e b em plantas de soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	26
FIGURA 8	Altura de plantas de soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	27
FIGURA 9	Massa seca de parte aérea, número de ramos e número de nós em plantas de soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	28
FIGURA 10	Número de vagens total, massa de mil grãos e produtividade da soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.....	31

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Resumo da análise de variância (ANOVA) dos resultados do experimento conduzido em casa de vegetação em função de subdoses de flumioxazin em cultivares de soja. Rio Verde (GO), 2024/2025.....	11
TABELA 2	Resumo da análise de variância (ANOVA) dos resultados do experimento conduzido a campo função de subdoses de flumioxazin em cultivares de soja. Rio Verde (GO), 2024/2025.....	22

RESUMO

REIS, G. UniRV - Universidade de Rio Verde, julho de 2026. **Tolerância e desempenho agrônomo de cultivares de soja a subdoses de flumioxazin**. Dissertação de Mestrado em Produção Vegetal. Universidade de Rio Verde. 54p. 2026.

Com o aumento dos casos de resistência de plantas daninhas a herbicidas, o uso de herbicidas pré-emergentes voltou a ocupar posição estratégica nos programas de manejo. Entre essas moléculas, destaca-se o flumioxazin, herbicida inibidor da PROTOX que, em razão de suas características físico-químicas, pode apresentar dificuldade de remoção dos sistemas de pulverização, aumentando o risco de contaminação cruzada em aplicações subsequentes. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de subdoses de flumioxazin aplicadas em pós-emergência sobre o desenvolvimento inicial e o desempenho agrônomo de cultivares de soja, simulando condições de deriva ou presença de resíduos em pulverizadores. Foram conduzidos dois estudos. O Estudo I foi conduzido em esquema fatorial 3×5 , composto por três cultivares de soja, BMX Guepardo IPRO, BMX Tormenta CE e BMX Olimpo IPRO, e cinco subdoses de flumioxazin, correspondentes a 0,0; 2,5; 5,0; 10,0 e 20,0% da dose comercial de 50 g ha⁻¹. O Estudo II foi conduzido a campo, em delineamento de blocos completos ao acaso, com tratamentos dispostos em esquema fatorial 2×5 e seis repetições, sendo o primeiro fator constituído pelas cultivares BMX Guepardo IPRO e BMX Olimpo IPRO, e o segundo pelas mesmas subdoses de flumioxazin. Foram avaliadas variáveis relacionadas à fitointoxicação, crescimento vegetativo, respostas fisiológicas, componentes de rendimento e produtividade de grãos. No Estudo I, a exposição ao flumioxazin causou injúrias iniciais expressivas, alterações na altura de plantas, no índice relativo de clorofila b e na taxa de fotossíntese líquida, com respostas variáveis entre cultivares e doses. No Estudo II, houve efeito significativo da interação entre cultivares e subdoses para fitointoxicação, massa seca da parte aérea, número de ramos, número de nós, número de vagens totais e produtividade. A fitointoxicação foi mais intensa nas avaliações iniciais, especialmente entre 4 e 7 dias após a aplicação, com sintomas característicos de herbicidas inibidores da PROTOX, como necrose foliar e redução do crescimento. A altura de plantas e a massa de mil grãos foram reduzidas mesmo na menor subdose avaliada, indicando que pequenas quantidades de flumioxazin são suficientes para comprometer o desenvolvimento e o enchimento de grãos da soja. A produtividade foi severamente afetada, com respostas distintas entre os materiais genéticos. A cultivar BMX Guepardo IPRO apresentou redução linear e progressiva do rendimento com o incremento das subdoses, enquanto a BMX Olimpo IPRO exibiu queda acentuada em baixas subdoses, seguida de estabilização produtiva. Conclui-se que resíduos de flumioxazin em aplicações de pós-emergência são prejudiciais à soja, comprometendo o desenvolvimento inicial, o crescimento, os componentes de rendimento e a produtividade final. A magnitude dos efeitos varia conforme o material genético, reforçando a necessidade de limpeza criteriosa de pulverizadores e de práticas adequadas para prevenir deriva e contaminação residual por flumioxazin em sistemas de produção de soja.

Palavras-chave: Deriva; Fitointoxicação; *Glycine max* (L.); Resíduo em tanque.

ABSTRACT

REIS, G. UniRV - University of Rio Verde, July 2026. **Tolerance and agronomic performance of soybean cultivars exposed to flumioxazin sub-doses.** Master's Thesis in Plant Production. University of Rio Verde. 54 p. 2026.

With the increasing occurrence of herbicide-resistant weeds, the use of pre-emergence herbicides has once again become a strategic practice in weed management programs. Among these molecules, flumioxazin stands out as a PROTOX-inhibiting herbicide which, due to its physicochemical properties, may be difficult to remove from spraying systems, increasing the risk of cross-contamination in subsequent applications. In this context, the objective of this study was to evaluate the effects of flumioxazin subdoses applied in post-emergence on the initial development and agronomic performance of soybean cultivars, simulating drift conditions or the presence of residues in sprayers. Two studies were conducted. Study I was arranged in a 3×5 factorial scheme, consisting of three soybean cultivars, BMX Guepardo IPRO, BMX Tormenta CE and BMX Olimpo IPRO, and five flumioxazin subdoses, corresponding to 0.0, 2.5, 5.0, 10.0 and 20.0% of the commercial rate of 50 g ha^{-1} . Study II was conducted under field conditions in a randomized complete block design, with treatments arranged in a 2×5 factorial scheme and six replications. The first factor consisted of the cultivars BMX Guepardo IPRO and BMX Olimpo IPRO, and the second factor consisted of the same flumioxazin subdoses. Variables related to phytotoxicity, vegetative growth, physiological responses, yield components and grain yield were evaluated. In Study I, exposure to flumioxazin caused expressive initial injuries, changes in plant height, relative chlorophyll b index and net photosynthetic rate, with variable responses among cultivars and doses. In Study II, there was a significant interaction between cultivars and subdoses for phytotoxicity, shoot dry matter, number of branches, number of nodes, total number of pods and grain yield. Phytotoxicity was more intense in the initial evaluations, especially between 4 and 7 days after application, with symptoms typical of PROTOX-inhibiting herbicides, such as leaf necrosis and growth reduction. Plant height and thousand-grain weight were reduced even at the lowest flumioxazin subdose evaluated, indicating that small amounts of the herbicide are sufficient to impair soybean development and grain filling. Grain yield was severely affected, with distinct responses between genetic materials. The cultivar BMX Guepardo IPRO showed a linear and progressive yield reduction as subdoses increased, whereas BMX Olimpo IPRO showed a sharp yield reduction at low subdoses, followed by yield stabilization at higher levels. It is concluded that flumioxazin residues in post-emergence applications are harmful to soybean, compromising initial development, growth, yield components and final grain yield. The magnitude of these effects varies according to the genetic material, reinforcing the need for careful sprayer cleaning and adequate practices to prevent drift and residual contamination by flumioxazin in soybean production systems.

Keywords: Drift; Phytotoxicity; *Glycine max* (L.); Tank residue.

1 INTRODUÇÃO

A pulverização de defensivos agrícolas é uma tecnologia central para a manutenção da alta produtividade e segurança alimentar nos sistemas agrícolas. Contudo, a reutilização frequente de equipamentos em diferentes culturas sem protocolos de limpeza adequados estabelece um desafio crítico: o risco de contaminação residual. A retenção de moléculas de produtos fitossanitários nos componentes internos do pulverizador causa contaminação cruzada, resultando em fitointoxicação severa em culturas sensíveis. O efeito mais deletério é a fitointoxicação, causada pela exposição a concentrações mínimas, ou subdoses, do resíduo químico. Tal problemática é particularmente grave com herbicidas de alta persistência, cujas propriedades físico-químicas com baixa solubilidade em água, alta estabilidade e elevada capacidade de adsorção tornam ineficazes os protocolos convencionais de limpeza, a exemplo a tríplex lavagem.

Os herbicidas inibidores da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), especialmente o flumioxazin, destacam-se como uma molécula de elevado risco. O flumioxazin é amplamente utilizado no manejo de plantas daninhas em pré e pós-emergência, sendo de fundamental importância para a soja (*Glycine max* (L.) Merrill), a oleaginosa de maior relevância global. Suas características físico-químicas que conferem alta eficácia no controle também resultam em forte aderência e persistência residual nos equipamentos. A exposição da soja a subdoses de flumioxazin induz severos sintomas de fitotoxicidade como, necrose e redução do crescimento cuja intensidade é modulada pelo estágio fenológico da planta, sendo de maior sensibilidade em estádios iniciais, tolerância varietal e condições edafoclimáticas.

Apesar da relevância agronômica e econômica do tema, a literatura científica apresenta uma escassez notável de trabalhos que abordem esta problemática de forma integrada e quantitativa. As recomendações atuais de limpeza de pulverizadores são genéricas e não consideram as particularidades de herbicidas de alta persistência. Há lacunas críticas na quantificação da eficácia de diferentes protocolos de higienização em condições reais de campo e no conhecimento sobre os limites de tolerância de cultivares de soja à exposição acidental a subdoses em pós-emergência. Esta ausência de dados robustos impede a formulação de recomendações técnicas baseadas em evidências, expondo o produtor a perdas econômicas desnecessárias.

Diante do risco crescente de contaminações residuais em equipamentos de aplicação e dos efeitos variáveis que subdoses de herbicidas podem exercer sobre diferentes cultivares de

soja, torna-se essencial compreender os limites fisiológicos da cultura à exposição não intencional a moléculas como o flumioxazin. Embora a eficácia do flumioxazin em pré-emergência esteja bem estabelecida, há escassez de informações sobre os níveis seguros de resíduos em pulverizadores e a tolerância da soja à aplicação de subdoses em pós-emergência, simulando cenários de contaminação. O resultado desta pesquisa contribuirá significativamente para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais segura e eficientes, auxiliando produtores na tomada de decisões para mitigar os riscos de fitointoxicação e otimizar a produtividade da cultura da soja.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a tolerância inicial e o desempenho agrônomo de cultivares de soja submetidas à aplicação de diferentes subdoses de flumioxazin em pós-emergência, simulando condições reais de campo associada a resíduo de herbicida.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância econômica da soja e a problemática das plantas daninhas

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é a oleaginosa mais cultivada globalmente, respondendo por aproximadamente 60% da produção mundial de grãos oleaginosos. Com o Brasil liderando o ranking produtivo (USDA, 2025), a cultura da soja depende de seu potencial genético aliado a um manejo eficiente de plantas daninhas para alcançar altas produtividades. A interferência de espécies daninhas pode resultar em perdas de produtividade superiores a 80%, configurando-se como um dos principais desafios à eficiência dos sistemas produtivos (Silva *et al.*, 2009; Almarie, 2017).

A presença de resíduos de herbicidas no interior de tanques, mangueiras e bicos pulverizadores constitui uma das principais causas de falhas de seletividade e de contaminação não intencional de áreas agrícolas adjacentes (Werle *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2021).

2.2 Uso de herbicidas residuais: foco no flumioxazin

O uso extensivo e, por vezes, inadequado de herbicidas com ação em pós-emergência tem fomentado o aumento da resistência de diversas espécies aos diferentes mecanismos de ação (Zhu *et al.*, 2018; Gage *et al.*, 2019). Nesse cenário, a aplicação de herbicidas residuais em

pré-emergência emerge como uma estratégia fundamental para prolongar o período de controle e mitigar a pressão de seleção de biótipos resistentes (Colquhoun, 2006; Osterholt *et al.*, 2019).

Entre os herbicidas com ação pré-emergente, destaca-se o flumioxazin, pertencente ao grupo químico das N-fenilftalimidas, cujo mecanismo de ação consiste na inibição da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX). A inibição dessa enzima culmina na acumulação de protoporfirinogênio IX, que, na presença de luz e oxigênio, favorece a formação de espécies reativas de oxigênio, induzindo a peroxidação lipídica e a necrose dos tecidos vegetais (Dayan *et al.*, 1997; Oliveira Jr., 2001; Reed *et al.*, 2015). Além de suas características agronômicas, a redução no custo da molécula ao longo dos anos também contribuiu para a ampliação da utilização do flumioxazin nos sistemas agrícolas, favorecendo seu emprego em larga escala (Procópio *et al.*, 2024). O flumioxazin é amplamente empregado devido a sua comprovada eficácia no controle de plantas daninhas em pré e pós-emergência. Estudos indicam que, quando aplicado em pré-emergência, apresenta boa seletividade à cultura da soja, proporcionando excelente controle de plantas daninhas (Gazola *et al.*, 2021).

O flumioxazin possui características físico-químicas que favorecem sua persistência, uma vez que apresenta baixa solubilidade em água ($1,79 \text{ mg L}^{-1}$ a 25°C), log Kow de 2,55, pressão de vapor de $3,21 \times 10^{-4} \text{ mPa}$ a 25°C , ponto de fusão aproximado de 196°C , peso molecular de $354,34 \text{ g mol}^{-1}$ e densidade relativa de $1,51 \text{ g mL}^{-1}$ a 20°C (Shaner, 2014). Além disso, seu elevado coeficiente de adsorção ($K_{oc} \approx 7000$) e estabilidade em pH neutro são características que favorecem sua aderência às superfícies dos pulverizadores, dificultando a remoção completa durante o processo de limpeza (EASON *et al.*, 2022). Essas propriedades físico-químicas explicam a persistência do herbicida em equipamentos e sua capacidade de causar fitointoxicação mesmo após lavagens convencionais.

2.3 Presença de resíduos em pulverizadores e impactos agronômicos na soja

A contaminação residual em pulverizadores agrícolas representa um problema recorrente nas propriedades rurais e está diretamente associada à ausência de protocolos de limpeza eficientes. Em muitas situações, um único equipamento é utilizado para diferentes aplicações sem a devida limpeza entre elas, o que aumenta o risco de fitointoxicação em culturas subsequentes (Kalsing *et al.*, 2014). A persistência de resíduos nos sistemas internos de pulverização depende fortemente das propriedades físico-químicas dos herbicidas e dos materiais constituintes dos tanques e mangueiras. Materiais mais porosos e permeáveis tendem a reter maior quantidade de

compostos, enquanto superfícies mais densas e impermeáveis reduzem essa retenção (Cundiff *et al.*, 2017).

Apesar da existência de recomendações de limpeza em rótulos e manuais de fabricantes, há escassez de estudos que quantifiquem a eficiência desses procedimentos para herbicidas de alta persistência (Browne *et al.*, 2020). Pesquisas demonstram que resíduos como dicamba podem permanecer mesmo após a tríplice lavagem, provocando sintomas de fitotoxicidade em culturas sensíveis, como a soja (Werle *et al.*, 2018; Marques *et al.*, 2021). Pequenas quantidades desses herbicidas são suficientes para causar danos severos e reduzir a produtividade de culturas sensíveis. Em soja e algodão, baixas exposições a 2,4-D e dicamba podem ocasionar injúrias e perdas produtivas, com respostas variáveis em função da espécie, do herbicida e do estágio de desenvolvimento (Egan *et al.*, 2014). Além da deriva, resíduos remanescentes em pulverizadores representam importante fonte de contaminação cruzada, podendo causar injúrias em culturas sensíveis mesmo após procedimentos de limpeza do equipamento (Browne *et al.*, 2020). Esses efeitos reforçam a importância da adoção de boas práticas de limpeza e manejo, bem como a necessidade de estudos comparativos que avaliem a eficiência de diferentes protocolos de higienização em função do tipo de material do tanque, do intervalo entre aplicação e limpeza e da composição das soluções utilizadas.

Neste contexto, apesar da reconhecida eficácia do flumioxazin, há registros de casos de fitointoxicação em sojas decorrentes da aplicação involuntária de subdoses, frequentemente originadas de resíduos em tanques de pulverizadores. Herbicidas inibidores da PROTOX, como o flumioxazin, possuem potencial para deixar resíduos no tanque e em todo o sistema de pulverização, podendo ocasionar fitotoxicidade em culturas sensíveis em aplicações subsequentes, mesmo em concentrações muito baixas (Mendes *et al.*, 2024). Um estudo simulado com saflufenacil demonstrou que doses residuais inferiores a 2,17 g ha⁻¹ podem causar lesões visuais significativas e reduzir os componentes de produtividade (Gazola *et al.*, 2025). Essa problemática é central para a compreensão da tolerância inicial e do desempenho agrônomo de cultivares de soja.

A fitotoxicidade associada a herbicidas inibidores da PROTOX, como o flumioxazin, relaciona-se não apenas à dose aplicada, mas também ao estágio de desenvolvimento da soja no momento da exposição. Pesquisas de McNaughton *et al.* (2014), revelaram que a aplicação no estágio cotiledonar resultou em reduções significativas no crescimento e na produtividade, evidenciando maior sensibilidade da cultura em estágios iniciais. Da mesma forma, Stephenson *et al.* (2019), observaram que os sintomas de fitointoxicação decorrentes da aplicação de subdoses

de flumioxazin impactaram negativamente o desempenho agrônomo da soja, resultando em perdas significativas de produtividade.

Adicionalmente, a resposta da soja ao flumioxazin está ligada a cultivar utilizada. Belfry *et al.* (2016), constataram que a tolerância varia entre cultivares, com algumas apresentando maior resistência e outras sofrendo reduções de produtividade superiores a 30% após a exposição ao herbicida. Fatores edafoclimáticos também exercem influência significativa na intensidade da fitotoxicidade. Mahoney *et al.* (2014), identificaram que solos com menor teor de matéria orgânica e pH ácido intensificam os sintomas de injúria causados por inibidores da PROTOX. Esta interação complexa entre genética, solo e ambiente sublinha a necessidade de compreender a tolerância inicial e o desempenho agrônomo de diferentes cultivares de soja frente à aplicação de subdoses não intencionais de flumioxazin, visando otimizar o manejo da cultura desde seus estádios iniciais de desenvolvimento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estudo I: Efeitos deletérios de resíduos de flumioxazin no desenvolvimento inicial de cultivares de soja

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação no município de Rio Verde (Goiás), especificamente nas coordenadas geográficas de latitude 17°47'10"S, longitude 50°57'48"W, altitude média de 774 m. O experimento foi realizado no período de 25/10/2024 até 17/12/2024.

Para a composição das unidades experimentais, foram utilizados vasos plástico rígidos tipo PAD (propileno de alta densidade) com volume equivalente a 3,5 dm³. Para o preenchimento dos vasos, foi coletado solo em área agricultável, sendo que o material foi coletado oriundo de área em que o mesmo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018). Após a coleta do solo realizou-se a análise físico-química, que apresentou os seguintes valores para as diferentes propriedades analisadas: pH (CaCl₂) = 5,30; M.O. = 19,84 g dm⁻³; P = 20,42 mg dm⁻³; K = 365,00 mg dm⁻³; CTC efetiva = 7,01 cmol dm⁻³; argila = 48,7%; silte = 7,4%; e areia = 43,9% (textura argilosa).

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso (DBC), sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial (3x5) com 4 repetições. Os níveis do primeiro fator foram relacionados a cultivares de soja de ciclos distintos: Precoce (BMX Guepardo IPRO – 6.7); média (BMX Tormenta CE – 7.4) e tardia (BMX Olimpo IPRO – 8.0). Para a escolha

destes materiais, considerou-se a importância em termos de áreas de cultivo no Sudoeste goiano. Os níveis do segundo fator foram constituídos por subdoses de flumioxazin, considerando os percentuais de: 0,0; 2,5; 5,0; 10,0 e 20,0% da dose de 50g i.a ha⁻¹.

Para perfazer os tratamentos, foram semeadas duas sementes de soja em cada vaso. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico de V2/V3, realizou-se a aplicação dos percentuais de subdoses, utilizando pulverizador costal de pressão constante à base de CO₂ (35 lb pol⁻²) equipado com seis pontas de pulverização do tipo XR-110.015, espaçadas em 0,50 m, proporcionando taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹. O produto comercial utilizado foi o Sumyzin[®], 500 g L⁻¹, SC, Sumitomo Chemical.

Durante o experimento os vasos foram mantidos em casa-de-vegetação sob condições controladas, com volumes e turnos de irrigação ajustados conforme as exigências fisiológicas do desenvolvimento da soja. Não foram necessárias a realização de inseticidas e fungicidas, uma vez que o ambiente protegido impediu a ocorrência de pragas e patógenos.

Para mensurar os efeitos dos tratamentos sobre a soja foram realizadas avaliações de fitointoxicação, altura de planta, índice relativo de clorofila *a* e *b*, taxa fotossintética, além da massa seca da parte aérea. A fitointoxicação foi avaliada por meio da escala visual proposta pela Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD, 1995), com notas variando de 0 a 100, sendo 0 a ausência de sintomas e 100 a morte total da planta. As avaliações foram realizadas aos 1, 4, 7, 14 e 21 dias após a aplicação (DAA). A altura das plantas foi determinada aos 7, 14 e 21 DAA, utilizando-se uma régua graduada para medir a distância da superfície do solo até o meristema apical.

Os índices relativos de clorofila *a* e *b* foram obtidos com o equipamento ClorofiLOG[®] (Falker[®], Brasil), aos 1, 4, 7, 14 e 21 DAA, na primeira folha trifoliolada completamente expandida, localizada no terço superior das plantas, utilizando-se sempre o folíolo central como unidade amostral. As taxas de fotossíntese líquida (*A*), taxa de transpiração (*E*), condutância estomática (*GS*) e foram determinadas aos 1, 4 e 7 DAA, no período da manhã (9h às 12h), no folíolo central da primeira folha trifoliolada completamente expandida. As medições foram realizadas sob densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) de 1000 μmol m⁻² s⁻¹, utilizando-se um analisador portátil de gases por infravermelho (IRGA, modelo CI-340; CID Biosciences[®], EUA).

Aos 21 DAA, uma planta aleatoriamente de cada vaso de cada parcela experimental foi coletada, acondicionada em sacos de papel tipo Kraft e seca em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica de precisão para determinação da massa seca da parte aérea.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando constatadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR (Ferreira, 2019).

3.2 Estudo II: Desempenho agrônômico de cultivares de soja expostas à resíduos de flumioxazin

Este experimento foi conduzido a nível de campo no município de Rio Verde – Goiás, sob a latitude 17°44'55"S, longitude 50°51'12"W, altitude 700 m. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018), e apresentou as seguintes características físico-químicas: pH (CaCl₂) = 5,23; P = 37,80 mg dm⁻³; K = 50,67 mg dm⁻³; CTC efetiva = 8,13 cmol dm⁻³; argila = 45,0%; silte = 5,0%; e areia = 50,0% (textura argilosa). O experimento foi realizado no período de novembro de 2024 até março de 2025, correspondente a safra de verão, período de um ano agrícola.

O clima da localidade em que o experimento foi conduzido é tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Thorntwaite, 1948), que recebe o nome de clima tropical com a estação seca, caracterizado por apresentar chuvas mais intensas no verão em comparação com o inverno. Na Figura 1 estão apresentados os dados climatológicos relacionados à precipitação acumulada e temperatura do ar (máxima e mínima) durante o período de condução do experimento.

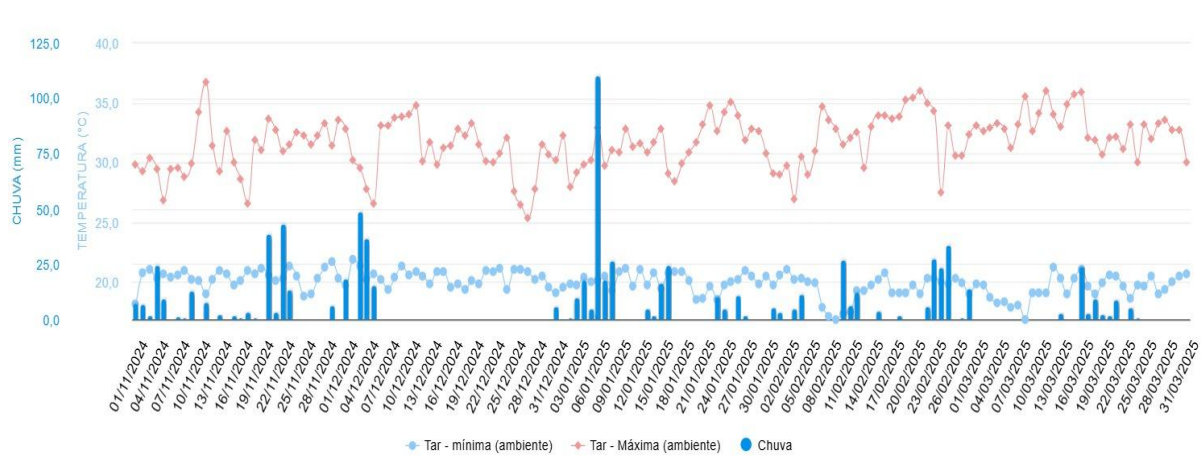


FIGURA 1 - Dados climatológicos coletados durante a condução do experimento em Rio Verde (GO), 2025.

Na composição das unidades experimentais, adotou-se o delineamento em blocos ao acaso (DBC) em esquema fatorial 2x5 com 6 repetições. O primeiro fator foi constituído de 2 cultivares de soja de ciclos distintos: Precoce (BMX Guepardo IPRO – 6.7); e tardia (BMX Olimpo IPRO – 8.0). Na escolha destes materiais, considerou-se a importância em termos de área de cultivo na região Sudoeste do Estado de Goiás. Os níveis do segundo fator foram constituídos por subdoses de flumioxazin, considerando os percentuais de: 0,0; 2,5; 5,0; 10,0 e 20,0% da dose de 50g i.a ha⁻¹.

Para perfazer os tratamentos, as sementes foram semeadas, conforme as exigências da cultivares para a região do sudoeste goiano. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico de V2/V3, procedeu-se a aplicação dos percentuais de subdoses, utilizando pulverizador costal de pressão constante à base de CO₂ (35 lb pol⁻²) equipado com seis pontas de pulverização do tipo XR-110.015AD, espaçadas em 0,50 m, proporcionando taxa de aplicação de 100 L ha⁻¹. O produto comercial utilizado foi o Sumyazin[®], 500 g L⁻¹, SC, Sumitomo Chemical.

Durante o desenvolvimento da soja, todos os tratos culturais foram realizados, conforme as recomendações técnicas, com o devido controle de pragas e doenças, evitando-se que interferissem no desenvolvimento da cultura (EMBRAPA SOJA, 2010). Após a aplicação das subdoses de flumioxazin, o controle das plantas daninhas foi realizado com pulverizador costal, utilizando-se barra equipada com chapéu de Napoleão, direcionada às entrelinhas da cultura, de modo a evitar o contato da calda com as plantas de soja. As demais aplicações de manutenção foram efetuadas por meio de pulverizador de arrasto, adotando-se volume de calda equivalente a 150 L ha⁻¹.

As avaliações realizadas neste estudo compreenderam: estande inicial e final, porcentagem de fitointoxicação, altura de plantas, índice relativo de clorofila *a* e *b*, componentes de produtividade, massa de mil grãos e produtividade. O estande inicial e final foi determinado por meio da contagem de plantas em dois pontos de 2 metros, dentro da parcela útil de cada tratamento, utilizando-se uma trena métrica. A avaliação visual da fitointoxicação das plantas de soja foi conduzida aos 1, 4, 7, 14 e 21 dias após a aplicação (DAA) dos tratamentos. As notas foram atribuídas conforme a escala percentual de injúrias proposta pela Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD, 1995), variando de 0% (ausência de sintomas visuais) a 100% (morte total das plantas).

A altura das plantas foi mensurada aos 7, 14 e 21 DAA, utilizando-se régua milimetrada, tomando-se como referência a distância entre o solo e o ápice do meristema apical. Em cada unidade experimental foram avaliadas três plantas representativas, e os valores médios foram expressos em centímetros (cm). O índice relativo de clorofila *a* e *b* foi determinado aos 4, 7, 14

e 21 DAA, com o auxílio do medidor eletrônico portátil ClorofiLOG® (Falker®, Brasil). As leituras foram realizadas na porção mediana do folíolo central da primeira folha trifoliolada completamente expandida, localizada no terço superior da planta, evitando-se as nervuras principais. Os resultados foram expressos em unidades de índice de clorofila (IRC).

Aos 21 DAA, coletou-se duas plantas aleatoriamente de cada parcela, acondicionadas em sacos de papel tipo Kraft e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado em balança analítica de precisão para determinação da massa seca da parte aérea.

A avaliação dos componentes de produtividade foi realizada a partir de três plantas escolhidas aleatoriamente por parcela. Foram quantificados o número de hastes laterais e o número total de vagens por planta, procedendo-se à separação das vagens de acordo com o número de grãos contidos em cada uma. Essa metodologia permitiu estimar a contribuição dos componentes morfológicos para o rendimento potencial da cultura. A produtividade foi determinada pela colheita de duas linhas de dois metros de comprimento dentro da área útil de cada parcela. O material colhido foi trilhado e pesado, sendo os valores em quilogramas por hectare (kg ha^{-1}), a fim de estimar a produtividade de cada tratamento. A massa de mil grãos (MMG) foi obtida por meio da contagem e pesagem de mil grãos provenientes de cada parcela, sendo os resultados expressos em gramas (g).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Quando constatadas diferenças significativas entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SISVAR (Ferreira, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estudo I: Efeitos deletérios de resíduos de flumioxazin no desenvolvimento inicial de cultivares de soja

Na Tabela 1 apresenta-se os resultados da análise de variância das variáveis-resposta avaliadas neste estudo, sendo os valores correspondentes a cada fator expressos pelo $F_{\text{Calculado}}$. Considerando que o experimento foi conduzido em esquema fatorial, a interpretação estatística

e a discussão dos resultados priorizaram a significância da interação entre os fatores (cultivar e subdoses). Quando não houve efeito significativo da interação, os fatores foram analisados separadamente, desde que apresentassem significância estatística individual. Com base nos resultados houve interação entre os fatores cultivares e subdoses de flumioxazin para as variáveis-resposta: fitointoxicação aos (1 e 7 DAA), altura de planta aos (7 e 21 DAA), índice relativo da clorofila *b* (4 DAA), condutância estomática (GS) (4 DAA). Demais observou-se os efeitos isolados de cada fator: para cultivares de soja, fitointoxicação aos (4 DAA), índice relativo de clorofila *a* (14 DAA), índice relativo de clorofila *b* (7DAA), taxa de fotossíntese líquida (PN) aos (1 e 4 DAA), condutância estomática (1 DAA), e massa seca da parte aérea. Por fim, os fatores isolados para subdoses simulada foram: fitointoxicação aos (4, 14 e 21 DAA) e taxa de fotossíntese líquida (7 DAA).

TABELA 1 - Resumo da análise de variância (ANOVA) dos resultados do experimento conduzido em casa de vegetação em função de subdoses de flumioxazin em cultivares de soja. Rio Verde (GO), 2024/2025

Fonte de variação	Grau de liberdade	F _{Calculado}																	
		Fitointoxicação					Altura			Índice relativo de clorofila <i>a</i>					Índice relativo de clorofila <i>b</i>				
		1	4	7	14	21	7	14	21	1	4	7	14	21	1	4	7	14	21
Cultivar (C)	2	3,19 ^{ns}	5,63*	4,82*	1,87 ^{ns}	0,36 ^{ns}	16,90*	1,27 ^{ns}	24,03*	0,28 ^{ns}	1,98 ^{ns}	7,37 ^{ns}	3,69*	0,96 ^{ns}	0,01 ^{ns}	8,97*	4,30*	1,21 ^{ns}	0,26 ^{ns}
Subdoses (S)	4	65,20*	131,83*	124,95*	102,47*	67,49*	10,70*	1,58 ^{ns}	6,59*	0,81 ^{ns}	1,33 ^{ns}	2,29 ^{ns}	0,96 ^{ns}	2,23 ^{ns}	1,06 ^{ns}	0,82 ^{ns}	1,50 ^{ns}	0,83 ^{ns}	1,90 ^{ns}
C x S	8	2,88*	0,94 ^{ns}	2,66*	1,18 ^{ns}	3,87 ^{ns}	2,49*	0,83 ^{ns}	2,74*	0,26 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1,88 ^{ns}	1,49 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,40 ^{ns}	2,54*	1,76 ^{ns}	1,59 ^{ns}	1,13 ^{ns}
Bloco	3	1,87	0,10	2,36	10,88	0,63	28,83	2,29	13,12	0,55	2,28	2,14 ^{ns}	4,42	0,34	0,79	2,57	0,23	1,38	0,16
Erro	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)		24,10	17,76	19,24	24,16	36,26	5,43	16,26	5,79	28,90	7,82	6,67	12,76	6,81	18,79	19,08	24,42	22,78	12,45
BMX Guepardo IPRO		1,78	24,40 b	34,2 ab	25,25	5,50	22,3 a	38,51	45,4 b	26,27	31,54	32,57	30,6 a	19,87	6,33	6,31 b	7,09 b	6,65	5,73
BMX Tormenta CE		1,94	33,65 a	36,05 a	27,75	5,90	20,3 b	38,18	51,0 a	27,99	31,96	33,87	30,4 a	19,91	6,34	7,36 a	8,57 a	6,62	5,89
BMX Olimpo IPRO		2,15	29,05 b	29,90 b	24,02	6,05	20,6 b	35,70	46,2 b	26,57	33,08	33,35	33,5 a	20,41	6,29	5,73 b	7,07 b	7,30	5,77

Fonte de variação	Grau de liberdade	A			E			GS			Massa Seca
		1	4	7	1	4	7	1	4	7	
Cultivar (C)	2	23,11*	3,54*	1,38 ^{ns}	3,06 ^{ns}	0,50 ^{ns}	1,29 ^{ns}	13,34*	1,11 ^{ns}	2,29 ^{ns}	4,20*
Subdoses (S)	4	1,15 ^{ns}	0,80 ^{ns}	2,77*	0,82 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,77 ^{ns}	1,43 ^{ns}	0,92 ^{ns}	1,01 ^{ns}
C x S	8	1,20 ^{ns}	1,11 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,67 ^{ns}	2,01 ^{ns}	0,64 ^{ns}	0,77 ^{ns}	2,27*	0,62 ^{ns}	0,86 ^{ns}
Bloco	3	8,46	0,07	1,41	1,08	7,49	1,96	1,57	7,14	0,63	0,46 ^{ns}
Erro	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)		25,43	25,42	26,98	131,57	52,62	66,02	54,50	50,86	67,74	16,63
BMX Guepardo IPRO		42,79 a	28,2 ab	15,39	3,08	0,85	0,73	67,40 a	22,63	21,07	9,27 a
BMX Tormenta CE		27,73 b	30,74 a	17,45	1,00	0,86	1,00	25,46 b	77,05	29,87	8,05 b
BMX Olimpo IPRO		27,06 b	24,79 b	15,55	1,98	0,99	0,78	48,74 a	28,70	19,97	8,27 ab

^{ns} e * Não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. A taxa de fotossíntese líquida; E taxa de transpiração; GS condutância estomática.

De maneira geral, os resultados demonstram que a tolerância inicial das cultivares de soja à subdoses de flumioxazin associa-se às particularidades genóticas de materiais com diferentes ciclos de desenvolvimento, refletindo diretamente sobre variáveis fisiológicas e bioquímicas, tais como fitointoxicação, índice relativo de clorofila, taxa de fotossíntese líquida, condutância estomática, rendimento quântico potencial, rendimento quântico de transporte, rendimento quântico de dissipação de energia e massa seca da parte aérea.

Ao analisar as cultivares individualmente, verificou-se que a BMX Guepardo IPRO apresentou desempenho superior em relação às demais apenas para a variável taxa de fotossíntese líquida aos (1 DAA). Paralelamente, essa cultivar apresentou semelhança estatisticamente das demais para o índice relativo de clorofila *a* aos (14 DAA), taxa de fotossíntese líquida aos (14 DAA), condutância estomática aos (1 DAA), rendimento quântico potencial, rendimento quântico de transporte, rendimento quântico de dissipação de energia e massa seca da parte aérea.

A cultivar BMX Tormenta CE destacou-se por apresentar maiores valores de fitointoxicação aos (4 DAA) e de índice relativo de clorofila *b* aos (1 DAA). Entretanto, para as demais variáveis-respostas, como índice relativo de clorofila *a* aos (14 DAA), taxa de fotossíntese líquida aos (4 DAA) e rendimento quântico de dissipação de energia, os resultados foram estatisticamente semelhantes aos observados nas demais cultivares.

Por fim, a cultivar BMX Olimpo IPRO apresentou comportamento estatisticamente semelhante às demais para índice relativo de clorofila *a* aos (14 DAA), condutância estomática aos (1 DAA), rendimento quântico potencial, rendimento quântico de transporte e massa seca da parte aérea (Tabela 1). De forma integrada, os resultados demonstram que a resposta das cultivares à subdoses de flumioxazin é dependente do genótipo, havendo diferenças tanto na intensidade dos efeitos iniciais quanto na capacidade de restabelecimento fisiológico das plantas, reforçando a importância da variabilidade genética na tolerância ao estresse causado pelo herbicida.

Na Figura 2, apresenta-se os resultados das avaliações de fitointoxicação da soja em função da simulação de doses crescentes de subdoses de flumioxazin em pós-emergência. Nas avaliações de 4, 14 e 21 dias após a aplicação (DAA), não houve diferenciação expressiva entre as cultivares quanto à resposta à subdoses, indicando comportamento semelhante entre os genótipos nesses períodos. Por outro lado, nas demais avaliações, observou-se comportamento diferenciado entre as cultivares, demonstrando que a intensidade da injúria pode variar em função do material genético e do momento de avaliação.

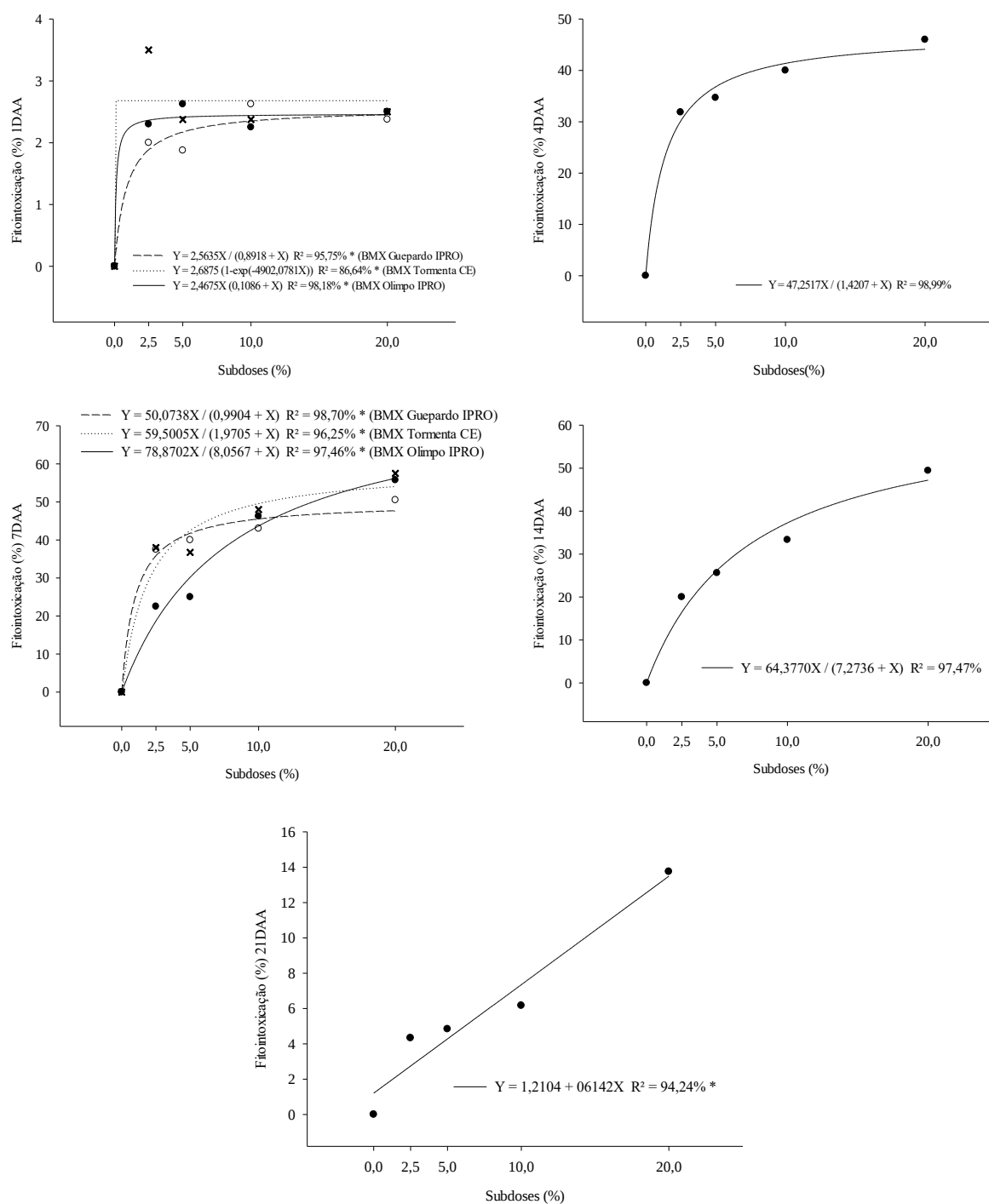


FIGURA 2 - Porcentagem de fitointoxicação da soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

De modo geral, os maiores percentuais de fitointoxicação foram observados entre 4, 7 e 14 DAA, período em que os sintomas provocados pelo flumioxazin foram mais expressivos. Esse comportamento está diretamente associado ao mecanismo de ação do herbicida, caracterizado pela inibição da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX). A inibição dessa enzima

favorece o acúmulo de compostos fotodinâmicos, que, na presença de luz, promovem a formação de espécies reativas de oxigênio, resultando em peroxidação de membranas, necrose dos tecidos e rápida manifestação de sintomas visuais de injúria. Assim, a maior intensidade dos sintomas nas avaliações iniciais e intermediárias confirma o elevado potencial fitotóxico do flumioxazin quando resíduos do herbicida são depositados diretamente sobre tecidos jovens da soja.

A sensibilidade da soja à exposição foliar ao flumioxazin tem sido relatada em estudos específicos com a cultura. Stephenson *et al.* (2019), verificaram que baixas doses de flumioxazin aplicadas em pós-emergência provocaram injúrias visuais em soja, especialmente nos estádios unifoliado e V2, demonstrando que pequenas quantidades do herbicida podem causar danos quando atingem diretamente a parte aérea. De forma semelhante, McNaughton *et al.* (2014), observaram maior potencial de injúria quando a aplicação de flumioxazin ocorreu no estágio de cotilédone, em comparação a aplicações realizadas antes ou durante a emergência, evidenciando que tecidos jovens expostos ao herbicida apresentam maior suscetibilidade.

A resposta diferenciada observada entre cultivares em algumas avaliações indica que os efeitos deletérios dos resíduos de flumioxazin não dependem exclusivamente da dose aplicada, mas também da capacidade de cada genótipo em tolerar e recuperar-se da injúria inicial. Essa variação pode estar relacionada às diferenças entre cultivares de distintos ciclos ou grupos de maturação. Cultivares precoces, por apresentarem menor duração do ciclo, tendem a dispor de menor janela temporal para recuperação após o estresse inicial, enquanto cultivares de ciclo médio ou tardio podem apresentar maior período para recomposição parcial da área foliar e compensação vegetativa. Esse comportamento é coerente com estudos que demonstram tolerância diferencial entre cultivares de soja submetidas a herbicidas inibidores da PROTOX, nos quais a resposta à fitointoxicação depende da interação entre dose, estágio fenológico, material genético, grupo de maturação e capacidade de recuperação da cultivar (Taylor-Lovell *et al.*, 2001; Belfry *et al.*, 2016).

Na avaliação realizada aos 21 DAA, observou-se redução dos níveis de injúria, indicando recuperação visual parcial das plantas ao longo do tempo. Entretanto, a resposta linear crescente nessa avaliação demonstra que o aumento das subdoses simuladas ainda manteve efeito negativo sobre o desenvolvimento inicial da soja. Esse resultado indica que a redução dos sintomas visuais não representa, necessariamente, completa recuperação fisiológica, uma vez que a planta pode ter perdido área foliar funcional e direcionado energia para processos de reparo e emissão de novos tecidos, em detrimento do crescimento vegetativo (Almarie, 2017).

De modo complementar, estudos conduzidos com outras leguminosas reforçam que a seletividade ao flumioxazin e a herbicidas inibidores da PROTOX não deve ser generalizada entre espécies, cultivares ou condições de aplicação. Em feijão-comum, Soltani *et al.* (2005), verificaram respostas distintas entre classes comerciais submetidas ao flumioxazin, enquanto Brusamarello *et al.* (2021), demonstraram que a tolerância de cultivares brasileiras de feijão a inibidores da PROTOX varia conforme a molécula e a cultivar. No feijão-caupi, Ribeiro Junior *et al.* (2018), relataram ausência de tolerância inicial satisfatória ao flumioxazin em pré-emergência. Embora esses estudos não substituam as evidências específicas em soja, eles reforçam biologicamente que a resposta a herbicidas inibidores da PROTOX é dependente do material genético, da espécie, do estágio de desenvolvimento e da forma de exposição.

Dessa forma, os resultados demonstram que resíduos de flumioxazin, simulados por subdoses aplicadas em pós-emergência, causam injúrias iniciais relevantes em cultivares de soja, com maior expressão entre 4 e 14 DAA. Embora tenha ocorrido recuperação visual parcial aos 21 DAA, a permanência da resposta crescente em função das subdoses evidencia que os efeitos deletérios do herbicida podem persistir, durante o desenvolvimento inicial da cultura, com intensidade variável conforme a dose, o genótipo e o estágio de desenvolvimento das plantas.

Na Figura 3 apresenta-se os resultados das avaliações de altura de plantas de soja em função da subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura. A altura de plantas de soja foi alterada pelas subdoses de flumioxazin em pós-emergência, com resposta variável entre as cultivares e entre as épocas de avaliação. Aos 7 DAA, a cultivar BMX Guepardo IPRO apresentou ajuste quadrático, com incremento inicial da altura em doses intermediárias proveniente causado por estiolamento e redução na maior subdose simulada. A BMX Tormenta CE também apresentou comportamento quadrático também proveniente de estiolamento, enquanto a BMX Olimpo IPRO demonstrou resposta linear decrescente, indicando redução progressiva da altura com o aumento das subdoses de flumioxazin.

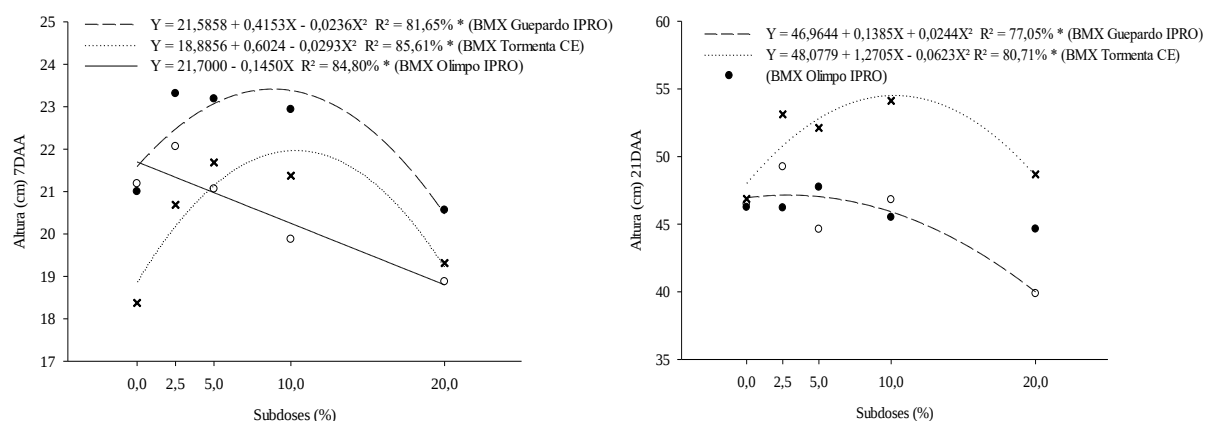


FIGURA 3 - Altura de plantas de soja em função da subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Aos 21 DAA, observou-se que os efeitos da subdoses permaneceram detectáveis sobre o crescimento das plantas. A BMX Guepardo IPRO apresentou tendência de redução da altura nas maiores subdoses, enquanto a BMX Tormenta CE manteve resposta quadrática, com maior crescimento em doses intermediárias e redução expressiva na maior concentração simulada. Esse comportamento evidencia que a exposição subletal ao flumioxazin pode comprometer o crescimento vegetativo da soja mesmo após o período inicial de injúria visual, sobretudo quando a dose simulada é elevada. Essa resposta é coerente com Stephenson *et al.* (2019), que observaram necrose e redução visível de altura e largura em soja submetida a baixas doses de flumioxazin em pós-emergência, com injúrias dependentes da dose e do estágio fenológico. Mesmo com redução da injúria visual ao longo do tempo, os autores verificaram perdas de rendimento, indicando que a recuperação aparente das plantas não necessariamente representa ausência de efeito agrônômico residual.

A redução da altura nas maiores subdoses pode ser explicada pelo mecanismo de ação do flumioxazin, herbicida inibidor da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX). A inibição dessa enzima favorece o acúmulo de compostos fotodinâmicos, especialmente protoporfirina IX (HAO *et al.*, 2011). Assim, mesmo quando os sintomas visuais diminuem ao longo do tempo, o crescimento pode permanecer limitado devido à perda inicial de tecido funcional e ao redirecionamento de energia para mecanismos de reparo celular.

A resposta diferencial entre cultivares também reforça que a tolerância da soja à exposição subletal a herbicidas inibidores da PROTOX é dependente do genótipo. Taylor-Lovell, Wax e Nelson (2001), ao avaliarem cultivares de soja tratadas com sulfentrazone ou flumioxazin, observaram variação entre materiais quanto à injúria visual e à redução de altura,

demonstrando que a seletividade de herbicidas PROTOX pode variar conforme a constituição genética da cultivar. Esse ponto é relevante para interpretar a diferença entre BMX Guepardo IPRO, BMX Olimpo IPRO e BMX Tormenta CE, pois indica que a resposta à subdoses não depende apenas da dose, mas também da capacidade diferencial de metabolização, recuperação vegetativa e compensação do crescimento entre genótipos.

Além disso, estudos com deriva simulada em soja demonstram que subdoses de herbicidas podem reduzir o crescimento vegetativo e comprometer o desempenho agrônomo, mesmo quando não há morte das plantas. Brochado *et al.* (2023), avaliaram herbicidas de diferentes mecanismos de ação, incluindo inibidores da PROTOX, em soja jovem não tolerante, e relataram que a deriva simulada pode causar injúrias em tecidos novos, alterações no crescimento e sintomas variáveis conforme o herbicida e a dose aplicada. De forma semelhante, Costa *et al.* (2020), avaliando subdoses de dicamba e 2,4-D em soja, observaram que a deriva simulada pode reduzir expressivamente a altura das plantas e a produtividade, reforçando que alterações precoces no crescimento são indicadores importantes do potencial de dano agrônomo.

Estudos recentes com saflufenacil, herbicida pertencente ao mesmo mecanismo de ação do flumioxazin, também corroboram essa interpretação. Galo *et al.* (2025) demonstraram que resíduos ou subdoses de saflufenacil, isolado ou associado ao glyphosate, podem causar fitointoxicação, alterações fisiológicas, redução da fotossíntese e perdas em componentes produtivos da soja. Embora se trate de outro ingrediente ativo, a similaridade do mecanismo de ação permite utilizar esse estudo como suporte complementar para discutir os efeitos fisiológicos de herbicidas inibidores da PROTOX em situações de contaminação de tanque ou exposição subletal.

Dessa forma, a altura de plantas mostrou-se uma variável sensível para detectar alterações no desenvolvimento vegetativo da soja submetida à subdoses de flumioxazin. A persistência de diferenças aos 21 DAA indica que o efeito do herbicida não se restringiu ao período imediatamente posterior à aplicação, podendo afetar a arquitetura da planta, a interceptação luminosa e a capacidade de compensação vegetativa. Portanto, os resultados reforçam o risco agrônomo associado à deriva ou à contaminação de tanques com flumioxazin, especialmente em situações de exposição pós-emergente da soja.

Na Figura 4 apresenta-se os resultados da avaliação de índice de clorofila *b* das cultivares de soja submetidas à subdoses de flumioxazin em pós-emergência. Na avaliação realizada aos 4DAA, observou-se resposta diferencial das cultivares quanto ao índice relativo de clorofila *b* em função das subdoses de flumioxazin. De modo geral, a cultivar BMX

Tormenta CE apresentou os maiores valores de clorofila *b* nas doses intermediárias, com destaque para a dose de 5,0%, seguida das doses de 10,0 e 20,0%. Esse comportamento indica uma resposta inicial de incremento do pigmento em condição de exposição subletal ao herbicida.

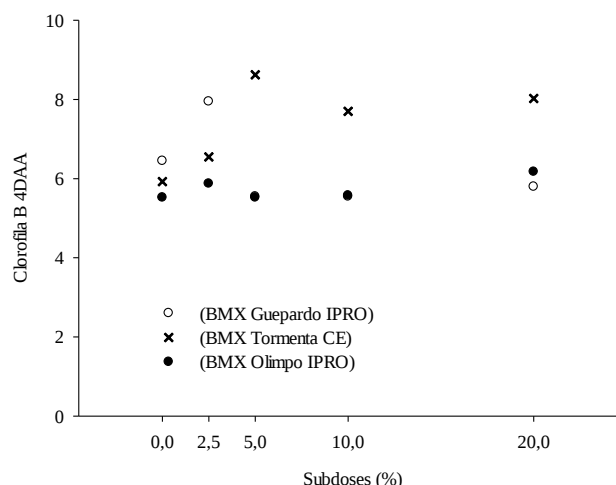


FIGURA 4 - Índice relativo de clorofila *b* em plantas de soja a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura (4 DAA).

A cultivar BMX Olimpo IPRO apresentou menor variação entre as doses, mantendo valores próximos ao longo da faixa avaliada, com leve incremento na maior dose simulada. Esse comportamento sugere maior estabilidade inicial do índice de clorofila *b* frente ao estresse imposto. Já a BMX Guepardo IPRO apresentou resposta mais pontual, com aumento expressivo na dose de 2,5%, sem manutenção clara desse comportamento nas demais doses avaliadas.

Esse incremento inicial da clorofila *b*, especialmente em doses subletais, pode ser interpretado como uma resposta fisiológica transitória da planta ao estresse herbicida. A clorofila *b* participa dos complexos coletores de luz associados ao Fotossistema II, contribuindo para a captação e transferência de energia luminosa. Assim, variações nesse pigmento podem indicar ajustes iniciais do aparato fotossintético a injúria subletal causada pelo herbicida.

Entretanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois o aumento isolado de clorofila *b* não caracteriza, por si só, hormese produtiva. Belz *et al.* (2011), destacam que respostas horméticas são dependentes do composto, da espécie, da variável avaliada, da dose e do tempo de avaliação, podendo ocorrer estímulo em determinados atributos fisiológicos sem necessariamente resultar em maior crescimento ou produtividade.

De forma semelhante, Meseldžija *et al.* (2020), avaliando doses subletais de glyphosate em soja, observaram alterações nos pigmentos fotossintéticos, incluindo clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides, mas sem confirmação de efeito hormético sobre os parâmetros de crescimento. Os autores ressaltam que mudanças nos pigmentos podem indicar estresse oxidativo e fitotoxicidade, mesmo em condições de exposição subletal.

Portanto, os resultados obtidos aos 4 DAA sugerem que a exposição inicial à subdoses simulada de flumioxazin promoveu alterações no aparato fotossintético das cultivares, com possível resposta compensatória inicial no teor de clorofila *b*, especialmente na BMX Tormenta CE. Contudo, a ausência de padrão matemático consistente entre todas as cultivares e doses indica que essa resposta está mais relacionada a um ajuste fisiológico inicial ao estresse subletal do que, a um efeito hormético consolidado.

Na Figura 5 apresenta-se os resultados da avaliação de taxa de fotossíntese líquida da soja em função subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura. A equação ajustada no modelo quadrático, indicando comportamento não linear da assimilação líquida de CO₂ em resposta ao aumento das subdoses do herbicida. Pelo modelo, verificou-se incremento inicial da fotossíntese líquida nas menores doses, com ponto de máxima resposta próximo a 5,9% da subdose, seguido de redução nas doses mais elevadas.

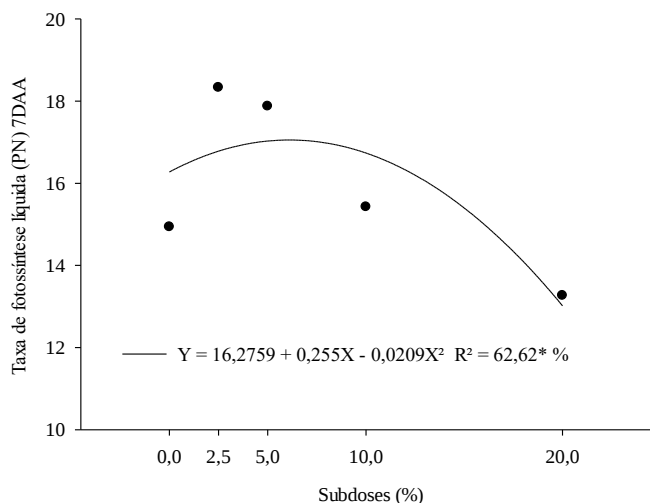


FIGURA 5 - Taxa de fotossíntese líquida (A) da soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

O aumento observado nas menores subdoses sugere que a exposição subletal ao flumioxazin não comprometeu imediatamente a assimilação de CO₂; ao contrário, promoveu estímulo pontual da atividade fotossintética. Esse comportamento é compatível com o

fenômeno da hormese, no qual baixas doses de agentes potencialmente tóxicos podem estimular temporariamente processos fisiológicos, enquanto doses superiores tendem a exercer efeito inibitório. Em herbicidas, esse padrão bifásico tem sido descrito como uma resposta dependente da dose, da espécie vegetal, do estágio de desenvolvimento e da variável fisiológica avaliada (Belz *et al.*, 2011; Belz; Duke, 2014).

A redução da taxa de fotossíntese líquida nas maiores subdoses, especialmente em 20% da dose comercial, indica que o aumento da intensidade do estresse superou a capacidade compensatória inicial das plantas. Saladin, Magné e Clément (2003), ao avaliarem os efeitos do flumioxazin em *Vitis vinifera*, observaram redução nas trocas gasosas e alterações no funcionamento fotossintético, associadas ao estresse provocado pelo herbicida. Embora o estudo tenha sido conduzido em outra espécie, seus resultados sustentam que o flumioxazin pode comprometer processos fisiológicos relacionados à assimilação de carbono, especialmente quando a intensidade da exposição é suficiente para causar dano ao aparato fotossintético (Osterholt *et al.*, 2019).

Do ponto de vista fisiológico, a fotossíntese líquida representa o balanço entre a fixação de CO₂ pelo ciclo de Calvin e as perdas respiratórias, sendo diretamente influenciada pela abertura estomática, pela disponibilidade interna de CO₂, pela integridade dos cloroplastos e pela eficiência das reações bioquímicas envolvidas na carboxilação (Taiz *et al.*, 2015). Assim, a queda observada nas maiores subdoses pode refletir limitações estomáticas e não estomáticas, incluindo menor difusão de CO₂ para o mesófilo, alterações no metabolismo fotossintético e redução da eficiência de assimilação de carbono.

Portanto, os resultados demonstraram que a taxa de fotossíntese líquida da soja apresentou resposta bifásica às subdoses de flumioxazin, com estímulo inicial em baixas subdoses e redução sob maior intensidade de exposição. O incremento pontual observado nas menores doses pode ser interpretado como resposta fisiológica compensatória associada à hormese; contudo, esse efeito não deve ser considerado necessariamente benéfico do ponto de vista agrônomo. A redução da fotossíntese líquida na maior subdose evidencia que o aumento da exposição ao herbicida comprometeu a capacidade de assimilação de CO₂, indicando sensibilidade do processo fotossintético ao estresse causado pelo flumioxazin.

4.2 Estudo II: Desempenho agronômico de cultivares de soja expostas à resíduos de flumioxazin

Na Tabela 1 apresenta-se os resultados da análise de variância das variáveis-respostas que foram avaliadas no presente trabalho, sendo os valores apresentados para cada fator relacionados ao $F_{\text{Calculado}}$. Ressalta-se que, por se tratar de um experimento com tratamentos dispostos em esquema fatorial, a interpretação estatística e a apresentação dos resultados basearam-se, prioritariamente, na significância da interação entre os fatores (cultivar e subdoses). Na ausência de efeito significativo da interação, os resultados foram apresentados de forma isolada para cada fator, desde que estes tenham apresentado significância estatística.

TABELA 2 - Resumo da análise de variância (ANOVA) dos resultados do experimento conduzido a campo em função de subdoses de flumioxazin em cultivares de soja. Rio Verde (GO), 2024/2025

Fonte de variação	Grau de liberdade	F _{Calculado}														
		Estande		Fitointoxicação				Índice relativo de clorofila <i>a</i>					Índice relativo de clorofila <i>b</i>			
		Inicial	Final	1	4	7	14	21	4	7	14	21	4	7	14	21
Cultivar (C)	1	1035,79*	851,58*	48,29*	5,17*	0,23 ^{ns}	61,10*	20,14*	3,02 ^{ns}	50,18*	7,20*	15,84*	4,45*	14,88*	3,47 ^{ns}	38,83*
Subdoses (S)	4	1,15 ^{ns}	0,21 ^{ns}	293,55*	386,50*	212,88*	275,77*	92,04*	0,43 ^{ns}	3,04*	1,32 ^{ns}	1,27 ^{ns}	1,11 ^{ns}	4,26*	1,09 ^{ns}	1,38 ^{ns}
C x S	4	0,17 ^{ns}	0,50 ^{ns}	6,67*	5,92*	0,97 ^{ns}	8,71*	4,69*	0,47 ^{ns}	1,75 ^{ns}	1,04 ^{ns}	2,06 ^{ns}	0,66 ^{ns}	0,44 ^{ns}	1,28 ^{ns}	0,73 ^{ns}
Bloco	5	0,29	0,38	1,42	0,61	1,71	1,55	0,73	0,07	1,23	2,50	0,77	0,18	0,78	1,10	1,51
Erro	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)		5,05	5,65	12,31	10,71	14,84	13,96	25,14	20,57	15,12	14,39	11,31	25,66	22,46	19,82	22,98
BMX Guepardo IPRO		14,70 a	14,53 a	12,23 a	43,67 b	42,26	13,37 b	4,35 b	35,40	36,86 a	33,52 a	37,72 a	8,22 a	8,31 a	8,49	10,56 a
BMX Olimpo IPRO		9,60 b	9,43 b	9,80 b	46,50 a	41,50	17,75 a	5,83 a	32,27	27,91 b	30,34 b	33,57 b	7,14 b	6,64 b	6,22	7,26 b

Fonte de variação	Grau de liberdade	Altura			Massa seca	Número de ramos	Número de nós	Número de vagens total	Massa de mil grãos	Produtividade
		7	14	21						
Cultivar (C)	1	127,80*	132,50*	64,29*	72,23*	406,33*	1017,97*	1434,13*	21,10*	861,52*
Subdoses (S)	4	25,69*	29,94*	38,16*	10,15*	8,71*	5,21*	43,99*	33,91*	33,95*
C x S	4	1,38 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,75 ^{ns}	3,17*	5,67*	2,63*	4,36*	1,34 ^{ns}	3,68*
Bloco	5	0,18	0,47	0,59	0,94	0,97	0,24	2,74	2,83	0,77
Erro	45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CV (%)		5,17	5,98	3,90	17,79	11,87	6,06	4,81	2,05	1,93
BMX Guepardo IPRO		24,36 a	42,29 a	77,96 b	29,01 b	1,98 b	21,54 b	52,88 b	170,58 a	80,75 b
BMX Olimpo IPRO		20,94 b	35,38 b	84,51 a	43,08 a	3,77 a	35,88 a	85,40 a	166,47 b	93,50 a

^{ns} e * Não significativo e significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Acerca dos resultados, observou-se efeito da interação entre os fatores cultivar e subdoses de flumioxazin para as seguintes variáveis-respostas: fitointoxicação da soja (aos 1, 4, 14 e 21 DAA), massa seca de parte aérea, número de ramos, nós e vagens total e produtividade de grãos (Tabela 2). Ademais, constatou-se efeito isolado para o fator cultivar de soja para estande de plantas (inicial e final), índice relativo de clorofila *a* (aos 7, 14 e 21 DAA) e *b* (aos 4, 7 e 21 DAA), altura de plantas (aos 7, 14 e 21 DAA) e massa de mil grãos. Por fim, para o fator subdose de flumioxazin, observou-se efeito isolado para as variáveis-respostas: fitointoxicação aos 7 DAA, índice relativo de clorofila *a* e *b* aos 7 DAA, altura de plantas aos 7, 14 e 21 DAA e massa de mil grãos.

De maneira geral, parte das diferenças visualizadas para determinadas variáveis-respostas entre as cultivares se referem às características agronômicas das mesmas (índice relativo de clorofila, altura de plantas e massa de mil grãos) ou ainda, ajustes fitotécnicos adotados na implantação da cultura (estande de plantas). Neste sentido, observou-se no presente trabalho que a cultivar BMX Guepardo IPRO apresentou maiores valores de estande de plantas (inicial e final) devido a densidade de semeadura, índice relativo de clorofila *a* e *b*, altura de plantas (7 e 14 DAA) e massa de mil grãos em comparação com a BMX Olimpo IPRO (Tabela 2). Em contraponto, para a avaliação de altura de plantas realizada aos 21 DAA, verificou-se valores superiores desta variável-resposta para a cultivar BMX Olimpo IPRO em comparação com a BMX Guepardo IPRO.

Na Figura 6 estão apresentados os resultados das avaliações de fitointoxicação da soja em subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura. Excluindo-se a avaliação realizada aos 7 DAA, na qual não constatou-se efeito diferenciado entre as cultivares de soja em termos de resposta a sensibilidade para o herbicida flumioxazin, em todas as demais épocas de avaliação, observou-se que cada material genético apresentou comportamento diferenciado em termos de sintomatologia provocada pelo acréscimo de subdoses de flumioxazin.

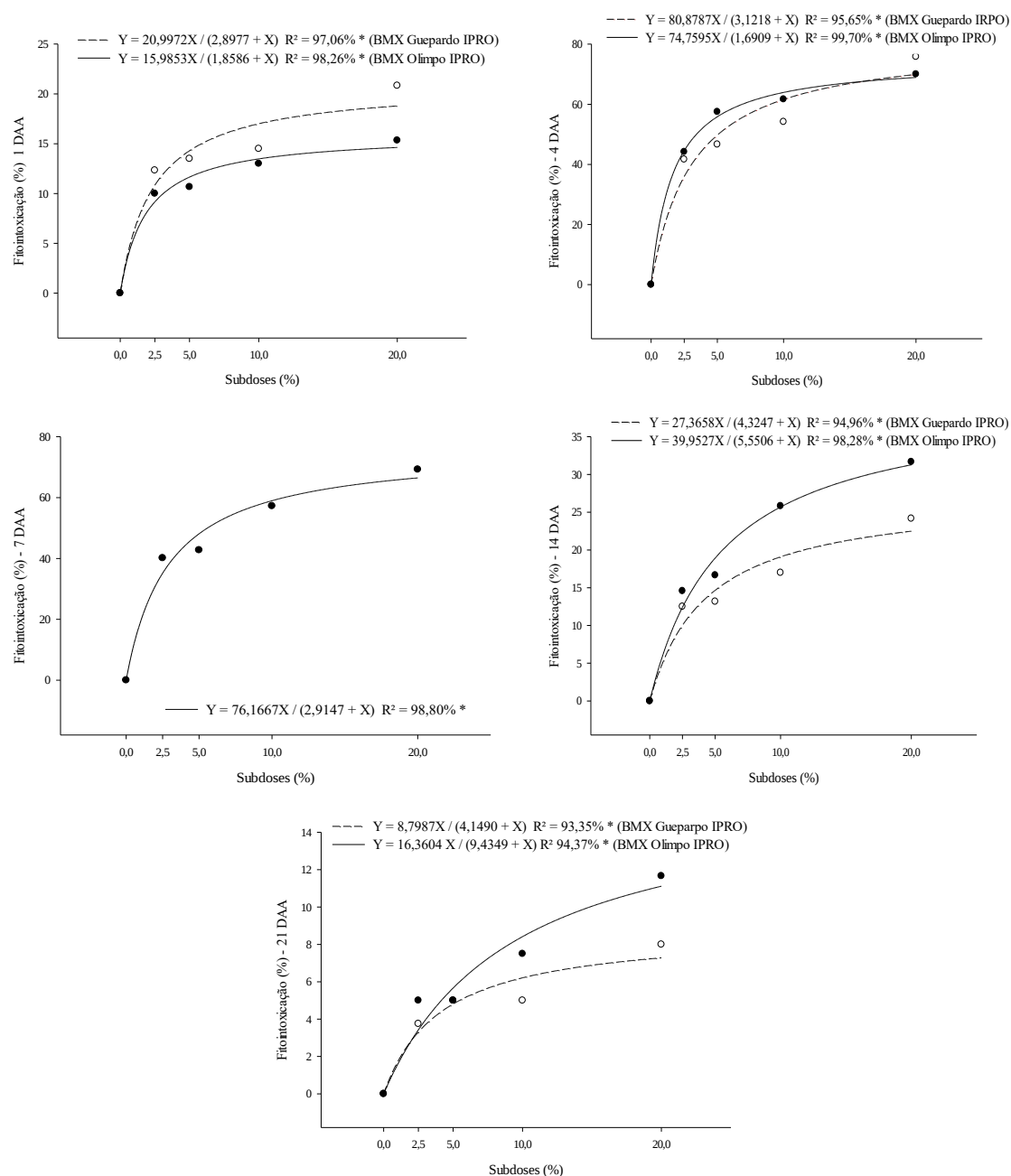


FIGURA 6 - Porcentagem de fitointoxicação da soja função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Ainda acerca da fitointoxicação, verificou-se que os maiores percentuais de injúrias na soja foram observados nas avaliações realizadas aos 4 e 7 DAA, com posterior recuperação das plantas à medida em que houve um distanciamento de tempo entre a aplicação e a data que a avaliação foi realizada. Esse padrão temporal é coerente com o mecanismo de ação do flumioxazin, herbicida inibidor da protoporfirinogênio oxidase. Herbicidas desse grupo promovem acúmulo de protoporfirina IX, que, na presença de luz e oxigênio, atua como agente fotodinâmico, induzindo formação de espécies reativas de oxigênio, peroxidação lipídica e

desorganização de membranas celulares (HAO *et al.*, 2011). Por essa razão, a intoxicação tende a se manifestar de forma rápida e intensa nos tecidos diretamente expostos, especialmente em folhas jovens e metabolicamente ativas.

Esse comportamento não constitui evento isolado do flumioxazin, mas integra um padrão fisiológico mais amplo dos herbicidas inibidores de PROTOX. Taylor-Lovell *et al.* (2001), demonstraram que a resposta da soja ao flumioxazin e ao sulfentrazone varia entre genótipos, com diferenças em injúria visual, altura e rendimento. De forma semelhante, Belfry *et al.* (2016), observaram que cultivares de soja apresentaram tolerância distinta a herbicidas desse mesmo grupo, evidenciando que a seletividade aos inibidores de PROTOX depende tanto da molécula quanto da base genética do material cultivado.

Além disso, McNaughton *et al.* (2014), verificaram que a tolerância da soja ao flumioxazin também é influenciada pelo momento de aplicação, sendo maiores os prejuízos quando o herbicida atinge a cultura em estádios mais sensíveis. Esse aspecto é particularmente relevante para a interpretação dos resultados aqui obtidos, pois reforça que a exposição em pós-emergência, ainda que em subdoses, eleva a probabilidade de injúria, limitação do crescimento e perda de rendimento. Em complemento, Stephenson *et al.* (2019), demonstraram que baixas doses de flumioxazin em pós-emergência causam necrose, redução de altura e perdas econômicas em soja, mesmo quando parte da injúria visual diminui ao longo do tempo.

Sob a perspectiva fisiológica, a redução posterior da injúria visual sugere que parte das plantas foi capaz de retomar o crescimento por meio da emissão de novos tecidos após o dano inicial. Esse comportamento também foi relatado por Stephenson *et al.* (2019), que verificaram aumento inicial da injúria visual em soja submetida a baixas doses de flumioxazin em pós-emergência, seguido de atenuação dos sintomas. No entanto, a redução da fitointoxicação visual não deve ser interpretada como reversão completa do dano, uma vez que os resultados de crescimento, componentes estruturais e produtividade indicam que a recuperação morfológica parcial não foi acompanhada de recuperação agrônômica plena.

Na Figura 7 estão apresentados os índices relativos de clorofila *a* e *b* aos 7 DAA das doses crescentes de subdoses de flumioxazin em pós-emergência da soja. Embora tenham sido observadas oscilações nas doses intermediárias, não se verificou tendência consistente de decréscimo nos pigmentos fotossintéticos. A ausência de resposta negativa clara em curto prazo indica que, nas condições avaliadas, a exposição das cultivares ao herbicida não comprometeu diretamente o aparato fotossintético aos 7 DAA.

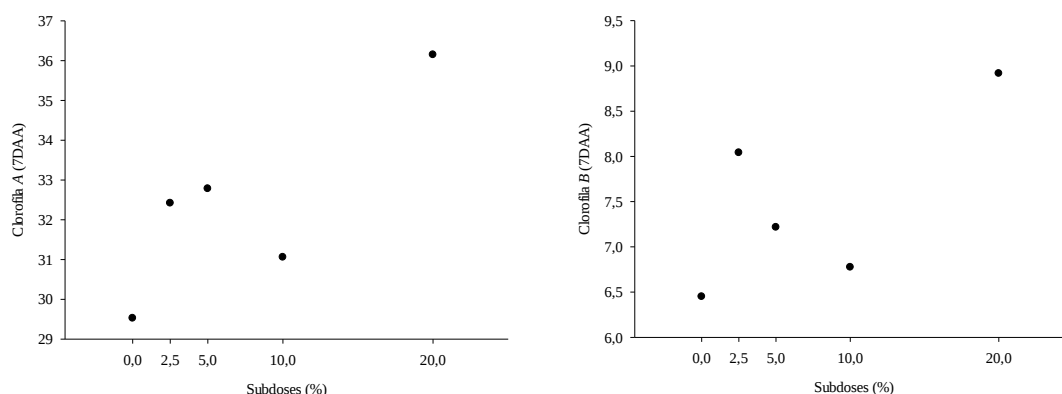


FIGURA 7 - Índice relativo de clorofila *a* e *b* em plantas de soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Esse comportamento sugere que os efeitos iniciais da flumioxazin em subdoses nas cultivares de soja, não estão primariamente associados à degradação direta da clorofila, mas possivelmente a processos fisiológicos subsequentes, relacionados ao crescimento e à integridade celular, característicos de herbicidas inibidores da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX). Embora tenha sido observado efeito da subdose sobre os índices relativos de clorofila, a ausência de tendência dose-resposta consistente indica que a resposta dos pigmentos não acompanhou linearmente o aumento das doses de flumioxazin.

Esse resultado é biologicamente plausível, pois o flumioxazin não atua primariamente pela degradação imediata da clorofila já formada, mas pelo colapso oxidativo de tecidos expostos, com efeitos iniciais mais pronunciados sobre a integridade celular do que sobre o conteúdo relativo de pigmentos. Em outras palavras, o aparato fotossintético pode não apresentar redução proporcional imediata nos índices de clorofila, embora a planta já esteja submetida à intensa desorganização funcional em nível de membranas e à perda de área foliar efetiva. Assim, a relativa estabilidade desses índices não contradiz com os níveis elevados de fitointoxicação visual observados, mas reforça que o dano inicial do flumioxazin se relaciona mais diretamente ao estresse oxidativo e à necrose localizada do que à simples diminuição quantitativa dos pigmentos fotossintéticos (HAO *et al.*, 2011).

Na Figura 8 estão apresentados os resultados das avaliações de altura de plantas de soja em função da subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura. Embora não tenha sido constatado efeito significativo da interação entre os fatores cultivar e subdoses de flumioxazin, apresentou efeito significativo isolado, evidenciando a sensibilidade das cultivares ao herbicida. A altura de plantas de soja foi significativamente afetada pela subdoses de flumioxazin

apresentando redução progressiva à medida que intensificaram as doses aplicadas, em todas as épocas de avaliação.

Aos 7 DAA, observou-se acentuada redução inicial da altura mesmo sob baixas porcentagens do herbicida, evidenciando elevada sensibilidade da soja a exposição subletal a flumioxazin logo após a aplicação.

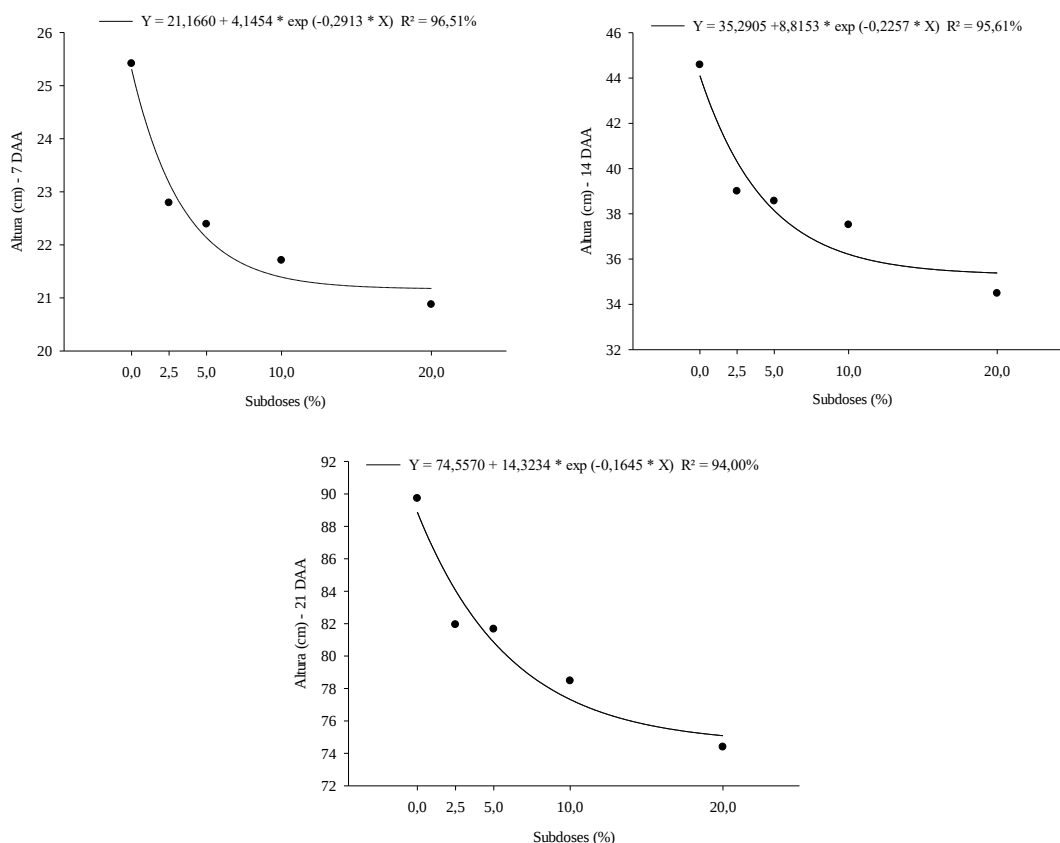


FIGURA 8 - Altura de plantas de soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Afinal, nas avaliações de 14 e 21DAA, a redução manteve-se consistente e proporcional às subdoses demonstrando a persistência dos efeitos de fitointoxicação ao longo do tempo. Tal resposta indica que danos induzidos pelo herbicida, mesmo em pequenas quantidades, promovem alterações estruturais de caráter duradouro, comprometendo de forma contínua o desenvolvimento das plantas.

A redução progressiva da altura em todas as épocas avaliadas demonstra que a subdoses de flumioxazin teve repercussões persistentes sobre o crescimento vegetativo da soja. Mesmo na ausência de interação significativa entre cultivar e subdose para essa variável, o efeito isolado das doses confirma que o herbicida comprometeu o desenvolvimento estrutural da

cultura independentemente do material genético. Esse resultado converge com Stephenson et al. (2019), que também observaram redução da altura de plantas de soja após exposição a baixas doses de flumioxazin em pós-emergência.

Do ponto de vista biológico, essa limitação do crescimento pode ser atribuída à destruição de tecidos fotossinteticamente ativos, à redução da assimilação líquida de carbono e ao redirecionamento metabólico para reparo celular e emissão de novos tecidos, em detrimento da expansão vegetativa. Assim, ainda que a planta sobreviva ao estresse, seu crescimento tende a permanecer limitado, comprometendo a interceptação luminosa, o fechamento do dossel e o acúmulo de biomassa.

Os resultados das variáveis-respostas massa seca de parte aérea, número de ramos e nós produtivos de plantas de soja submetidas subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura estão apresentados na Figura 9. O efeito da flumioxazin em pós-emergência da soja promoveu efeitos negativos expressivos sobre o desenvolvimento das plantas, evidenciados pela redução de massa seca da parte aérea, números de ramos e nós produtivos à medida que houve incremento das subdoses.

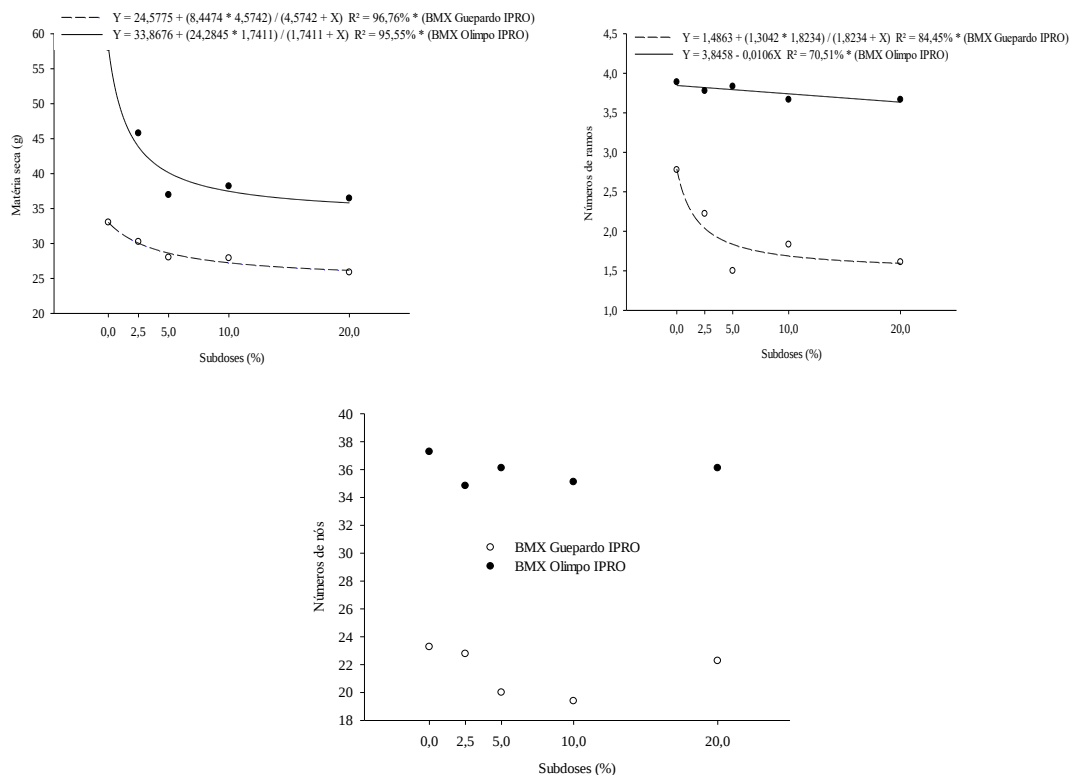


FIGURA 9 - Massa seca de parte aérea, número de ramos e número de nós em plantas de soja submetidas a subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Constatou-se uma redução acentuada da massa seca da parte aérea já nas menores subdoses, caracterizando elevada sensibilidade da soja ao herbicida flumioxazin. Contudo, as maiores perdas ocorreram nas doses iniciais, seguidas por uma tendência de estabilização nas doses mais elevadas. Esse padrão sugere que pequenas quantidades do herbicida são suficientes para comprometer significativamente o acúmulo de biomassa ainda que a intensidade da resposta possa não aumentar proporcionalmente nas maiores doses.

Essa interpretação é reforçada pelo caráter integrativo da massa seca da parte aérea. O decréscimo observado com o aumento das doses indica que a exposição ao flumioxazin afetou diretamente o acúmulo de biomassa, o qual representa o balanço entre interceptação de luz, eficiência fotossintética, integridade tecidual e alocação de assimilados. Portanto, sua redução demonstra que os efeitos da subdose não se restringiram a sintomas visuais transitórios, mas alteraram o desempenho metabólico da planta de forma suficientemente intensa para comprometer o desenvolvimento da planta.

Nesse contexto, Priess *et al.* (2020), destacam que injúrias herbicidas iniciais podem atrasar o fechamento do dossel e reduzir a eficiência de crescimento, com reflexos agronômicos persistentes. Assim, os resultados obtidos reforçam que mesmo exposições subletais ao flumioxazin são capazes de comprometer a formação da arquitetura e limitar o desenvolvimento pleno da soja.

O número de ramos também foi negativamente afetado pela subdoses, apresentando redução progressiva com o aumento das doses. Observou-se que o efeito do herbicida variou em função do ciclo das cultivares, evidenciando respostas diferenciadas ao estresse químico. Na cultivar BMX Guepardo IPRO, pequenas subdoses já foram suficientes para reduzir o número de ramos, mantendo-se relativamente estável com o aumento das porcentagens de doses subsequentes, o que indica uma resposta inicial mais sensível seguida de estabilização. Por outro lado, a cultivar BMX Olimpo IPRO apresentou tendência linear decrescente, indicando que, à medida que as subdoses de flumioxazin foi incrementada, houve redução contínua no número de ramos, caracterizando maior sensibilidade progressiva ao herbicida.

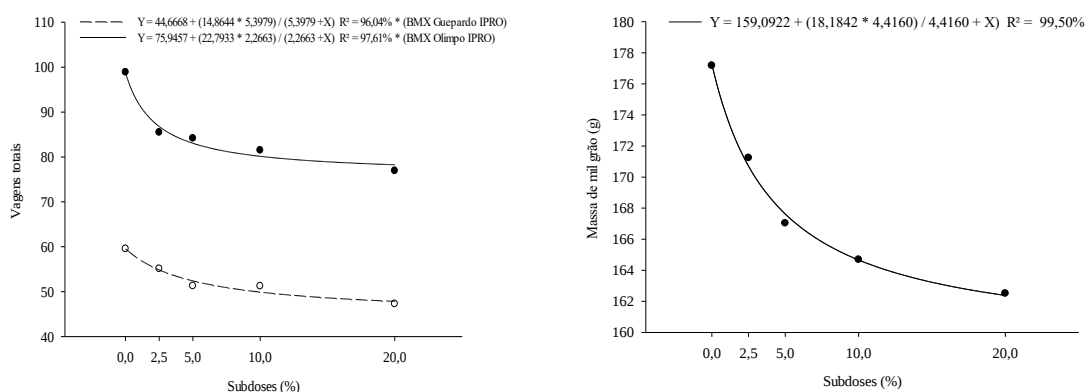
Para o número de ramos, entretanto, a resposta das cultivares não deve ser interpretada de forma generalizada. O comportamento observado evidenciou que a resposta diferencial entre os materiais variou conforme a variável analisada, reforçando a necessidade de interpretar separadamente os componentes vegetativos e produtivos. Nesse sentido, a literatura demonstrou que a seletividade a herbicidas inibidores da protoporfirinogênio oxidase associa-se não apenas ao estágio de desenvolvimento da planta, mas também aos atributos genéticos

relacionados à absorção, detoxificação, compartimentalização e sensibilidade dos tecidos ao estresse oxidativo (Taylor-Lovell *et al.*, 2001; Belfry *et al.*, 2016).

De forma semelhante, o número de nós produtivos apresentou decréscimo significativo, refletindo no impacto direto da subdose de flumioxazin sobre os componentes do rendimento da soja. Embora não tenha sido observado ajuste satisfatório aos modelos de regressão, a distribuição dos dados indicou tendência de redução dessa variável com o aumento das doses simuladas. A redução do número de nós produtivos indicou que os efeitos fitotóxicos do herbicida não se restringiram apenas à fase vegetativa, mas se estenderam ao potencial reprodutivo da cultura.

Os efeitos negativos sobre o número de ramos e de nós produtivos demonstraram que a subdose de flumioxazin comprometeu não apenas o crescimento vegetativo, mas também a formação de estruturas associadas ao potencial reprodutivo da soja. Essas variáveis exerceram papel importante na definição do número potencial de estruturas reprodutivas e, consequentemente, no rendimento da cultura. Assim, a redução observada indicou que os efeitos do herbicida se estenderam além da injúria visual inicial, interferindo no desenvolvimento morfológico das plantas e limitando sua capacidade de formação e sustentação de estruturas produtivas.

Na Figura 10 apresenta-se os dados das variáveis-respostas número de vagens total, massa de mil grãos e produtividade da soja em função de subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura. Observou-se uma redução consistente e progressiva no número de vagens totais em ambas as cultivares de soja à medida que a intensidade da subdose de flumioxazin foi elevada, evidenciando a sensibilidade da cultura mesmo à exposição a subdoses do herbicida em pós-emergência. Embora os dois materiais genéticos tenham apresentado resposta negativa ao incremento das doses, verificou-se diferença na magnitude das perdas, indicando comportamento diferencial entre as cultivares quanto à resposta ao estresse químico.



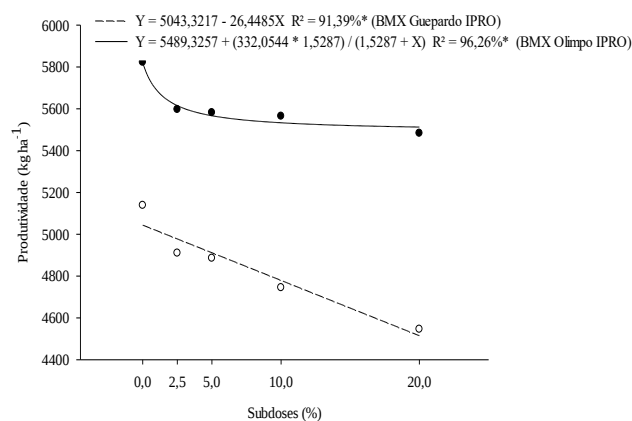


FIGURA 10 - Número de vagens total, massa de mil grãos e produtividade da soja em função das subdoses de flumioxazin em pós-emergência da cultura.

Esse raciocínio é corroborado pela redução no número total de vagens e na produtividade de grãos. A queda progressiva dessas variáveis com o aumento das doses demonstrou que a exposição ao flumioxazin gerou prejuízos agrônômicos efetivos. O dado é especialmente relevante porque evidenciou que a recuperação visual parcial observada após os primeiros dias não foi suficiente para restabelecer completamente o potencial produtivo da cultura.

Em situações desse tipo, os tecidos novos emitidos após a injúria não compensaram integralmente a perda de área foliar funcional, a limitação do crescimento inicial e a menor formação de estruturas reprodutivas. Assim, a subdoses converteu o dano inicial em perda de rendimento, consolidando o entendimento de que injúrias visualmente transitórias podem produzir efeitos permanentes sobre a produtividade. Stephenson *et al.* (2019), também registraram perdas econômicas em soja exposta às baixas doses de flumioxazin, mesmo com diminuição posterior da injúria visual, reforçando a coerência externa dos achados deste estudo.

Para a massa de mil grãos, observou-se que o aumento das subdoses de flumioxazin, independentemente do material genético avaliado, ocasionou redução no peso dos grãos. Esse comportamento evidenciou que a exposição à subdose do herbicida afetou negativamente o enchimento e, conseqüentemente, o peso final dos grãos de soja.

A redução da massa de mil grãos complementou essa interpretação, demonstrando que os efeitos do herbicida não se limitaram ao número de estruturas reprodutivas formadas, mas também, comprometeram o enchimento dos grãos. Isso indica que as subdoses afetou tanto a definição ou o suprimento de assimilados aos drenos reprodutivos. Em outras palavras, além de formar menos vagens, as plantas submetidas ao estresse apresentaram menor capacidade de

sustentar o enchimento final dos grãos, o que ampliou o impacto do flumioxazin sobre os componentes do rendimento.

A produtividade de grãos foi expressivamente afetada pelas subdoses de flumioxazin, com respostas distintas entre os materiais genéticos avaliados. A cultivar BMX Guepardo IPRO demonstrou maior vulnerabilidade produtiva, apresentando comportamento linear de redução do rendimento à medida que houve incremento das doses simuladas. Para essa cultivar, a produtividade reduziu de aproximadamente 5.139 kg ha⁻¹ na testemunha para cerca de 4.546 kg ha⁻¹ na dose de 20%, representando perda próxima de 0,593 kg ha⁻¹ no intervalo avaliado. Em termos médios, esse comportamento corresponde a uma redução de 26,4488 kg ha⁻¹ para cada 1% de subdose de flumioxazin, evidenciando que o aumento da exposição ao herbicida comprometeu progressivamente o desempenho produtivo da cultivar.

Por outro lado, a cultivar BMX Olimpo IPRO apresentou comportamento distinto, com a redução da produtividade mais pronunciada nas menores subdoses de flumioxazin e posterior tendência de estabilização com o incremento das subdoses. A produtividade estimada foi de aproximadamente 5.821 kg ha⁻¹ na ausência do herbicida e de 5.513 kg ha⁻¹ na subdose de 20%, correspondendo a uma redução estimada de 308 kg ha⁻¹. O elevado coeficiente de determinação do modelo ($R^2 = 96,26\%$) indicou adequada representação da relação entre as subdoses e a produtividade, evidenciando que a maior variação da resposta ocorreu nas menores exposições, enquanto incrementos subsequentes na subdose promoveram reduções de menor magnitude.

Essa divergência nas curvas de resposta indica que o impacto produtivo da subdose não foi determinado exclusivamente pela dose aplicada, mas também pela capacidade diferencial de cada cultivar em tolerar e compensar o estresse inicial imposto pelo herbicida. Dessa forma, os resultados sugerem que a BMX Guepardo IPRO apresentou menor capacidade de compensação produtiva frente à injúria causada pelo flumioxazin, enquanto a BMX Olimpo IPRO demonstrou maior estabilidade relativa após a redução inicial do rendimento. Resultados semelhantes foram relatados por Stephenson *et al.* (2019), que observaram redução na produtividade da soja após aplicações em pós-emergência de baixas doses de flumioxazin, mesmo com redução parcial da injúria visual ao longo do tempo.

A resposta diferencial entre BMX Guepardo IPRO e BMX Olimpo IPRO também pode ser interpretada à luz das diferenças de ciclo fenológico entre os materiais. A BMX Guepardo IPRO, por apresentar ciclo mais precoce, dispõe de menor janela temporal para recomposição vegetativa e reprodutiva após a injúria, o que torna biologicamente plausível a redução linear da produtividade com o aumento das doses. Em contrapartida, a BMX Olimpo IPRO, de ciclo

mais tardio, possui maior tempo fisiológico para recuperação parcial e redistribuição de assimilados, o que pode explicar a estabilização produtiva observada após a queda inicial.

Contudo, o ciclo fenológico não deve ser considerado o único fator explicativo, uma vez que a literatura demonstra que a seletividade de herbicidas inibidores da PROTOX em soja também é influenciada por características genéticas relacionadas à absorção, detoxificação, compartimentalização e sensibilidade dos tecidos ao estresse oxidativo (Taylor-Lovell *et al.*, 2001; Belfry *et al.*, 2016). Portanto, a diferença produtiva entre as cultivares provavelmente resultou da interação entre ciclo fenológico, plasticidade compensatória e atributos intrínsecos de tolerância ao herbicida.

Dessa forma, a recuperação visual das plantas não deve ser interpretada como restabelecimento completo do potencial produtivo, pois danos iniciais decorrentes da ação de herbicidas inibidores da PROTOX podem comprometer o crescimento vegetativo, a formação de estruturas reprodutivas e o enchimento de grãos, culminando em perdas efetivas de rendimento (Silva *et al.*, 2009).

Essa interpretação é reforçada por estudos conduzidos com herbicidas do mesmo mecanismo de ação em culturas leguminosas. Soltani *et al.* (2010), ao avaliarem a sensibilidade de espécies leguminosas ao saflufenacil, observaram ampla variação de tolerância entre os materiais estudados, com a soja posicionando-se entre as espécies relativamente mais tolerantes, embora ainda com injúrias mensuráveis. De forma semelhante, Brusamarello *et al.* (2021), demonstraram que a tolerância a inibidores de PROTOX em feijão varia amplamente entre cultivares e doses, reforçando que a seletividade a esse mecanismo de ação é fortemente dependente do genótipo. Adicionalmente, Hurdle *et al.* (2025), em amendoim, verificaram que o atraso na aplicação de flumioxazin pode intensificar a injúria e reduzir a produtividade, reforçando que o momento de exposição e as condições ambientais também interferem na seletividade do herbicida.

Embora esses trabalhos não tenham sido conduzidos especificamente com flumioxazin em soja em pós-emergência, eles fornecem suporte conceitual relevante à interpretação dos resultados aqui obtidos. Em conjunto, indicam que a resposta a herbicidas inibidores de PROTOX resulta da interação entre características genéticas, intensidade da exposição, estágio fenológico e capacidade fisiológica de suportar o estresse oxidativo desencadeado após a aplicação.

Outro aspecto relevante diz respeito ao estágio de desenvolvimento da soja no momento da exposição. A literatura mostra que estádios iniciais tendem a apresentar maior sensibilidade a subdoses de herbicidas, uma vez que as plantas dispõem de menor área foliar, menor reserva

estrutural e menor capacidade de diluir ou compensar o dano provocado pela intoxicação. Stephenson *et al.* (2019) demonstraram que aplicações de baixa dose de flumioxazin em estádios iniciais da soja causam maiores níveis de injúria e maior impacto sobre o crescimento do que aplicações em estádios mais avançados.

Isso confere maior robustez agronômica aos resultados, pois evidenciou que a injúria inicial constitui apenas a primeira expressão de um processo mais amplo de comprometimento do desempenho da planta (Colquhoun, 2006).

A relevância agronômica dos resultados tornou-se ainda mais evidente quando comparada ao comportamento da soja exposta, por subdoses, a herbicidas de outros mecanismos de ação. Brochado *et al.* (2023), avaliando diferentes grupos de herbicidas em soja não tolerante, demonstraram que a sintomatologia, a intensidade da injúria e o impacto sobre biomassa variam conforme o mecanismo de ação, mas que a redução do crescimento é uma consequência recorrente da exposição subletal. Nesse estudo, herbicidas auxínicos, inibidores do Fotossistema, PROTOX e de outros mecanismos provocaram respostas morfofisiológicas distintas, porém todas agronomicamente relevantes.

No caso dos herbicidas auxínicos, a soja apresentou reconhecida sensibilidade à deriva de 2,4-D e dicamba. Nunes *et al.* (2023), demonstraram que subdoses desses herbicidas causam injúria visual, redução da altura e perda de produtividade. Resultados semelhantes foram reportados por Alves *et al.* (2021), em condições tropicais, nas quais a deriva simulada de dicamba reduziu o rendimento da soja, evidenciando que pequenas frações da dose comercial podem produzir prejuízos mensuráveis.

Embora os sintomas dos herbicidas inibidores da PROTOX sejam tipicamente dominados por necrose, colapso oxidativo e destruição de membranas, enquanto os auxínicos se expressam por epinastia, enrugamento e desordens morfológicas, ambos os cenários convergem para um mesmo desfecho agronômico: limitação do crescimento e comprometimento do rendimento. Essa convergência reforçou que a deriva e subdoses de herbicidas deve ser interpretada menos pela aparência isolada dos sintomas e mais por sua capacidade de interferir na construção do potencial produtivo da cultura.

A resposta diferencial entre cultivares observada neste estudo também encontra paralelo em trabalhos com outros mecanismos de ação, o que sugere que a variabilidade genotípica na tolerância a herbicidas é um fenômeno amplo, e não restrito aos inibidores de PROTOX. Vieira *et al.* (2022), mostraram que genótipos de soja apresentam respostas contrastantes à exposição fora do alvo a dicamba, com diferenças importantes na severidade dos sintomas e nas perdas de produtividade. Em continuidade, Vieira *et al.* (2023), demonstraram que essa variabilidade

possui base genética complexa, associada a regiões cromossômicas relacionadas à detoxificação e ao transporte de herbicidas.

Esses achados reforçam a interpretação de que a resposta contrastante entre BMX Guepardo IPRO e BMX Olimpo IPRO não deve ser atribuída apenas à diferença de ciclo. Ainda que a precocidade da BMX Guepardo IPRO provavelmente reduza sua janela temporal de recuperação, é plausível admitir que mecanismos fisiológicos intrínsecos de tolerância também tenham contribuído para o comportamento diferencial observado entre os materiais.

Em termos práticos, os resultados possuem relevância direta para o manejo agrícola. O flumioxazin é uma molécula de grande importância no controle de plantas daninhas, especialmente em programas de manejo de resistência, em razão de sua eficácia residual e amplo espectro de ação. No entanto, os dados obtidos neste estudo evidenciaram que o benefício agrônomo dessa ferramenta depende do uso rigorosamente correto, pois sua movimentação não intencional para a soja em pós-emergência pode resultar em prejuízos expressivos (Shaner, 2014).

Esse raciocínio assume ainda maior importância no cenário atual de intensificação do uso de herbicidas residuais e de programas mais complexos de manejo. Nessas condições, eleva-se o risco de deriva, contaminação cruzada e exposição acidental de culturas sensíveis. Estudos com deriva simulada de outros herbicidas em soja também apontam que mesmo subdoses podem causar injúrias relevantes, redução de biomassa e perdas de produtividade, confirmando que o risco agrônomo não pode ser subestimado apenas por se tratar de frações da dose comercial (Nunes *et al.*, 2023; Brochado *et al.*, 2023).

Em síntese, os resultados deste estudo demonstram que as subdoses de flumioxazin em pós-emergência desencadeia injúria inicial severa, compromete o crescimento vegetativo, reduz a formação de estruturas reprodutivas e culmina em perdas de produtividade, com magnitude modulada pela cultivar. A coerência desses achados com estudos prévios envolvendo flumioxazin e outros inibidores de PROTOX em soja e leguminosas reforça a consistência fisiológica e agrônoma da interpretação proposta (Taylor-Lovell *et al.*, 2001; Soltani *et al.*, 2010; Mcnaughton *et al.*, 2014; Belfry *et al.*, 2016; Stephenson *et al.*, 2019; Brusamarello *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a comparação com trabalhos conduzidos com herbicidas de outros mecanismos de ação evidenciou que, embora a expressão sintomatológica varie conforme o sítio de ação, a exposição subletal por deriva representa risco concreto ao desenvolvimento e ao rendimento da soja (Alves *et al.*, 2021; Vieira *et al.*, 2022; Nunes *et al.*, 2023; Brochado *et al.*, 2023; Vieira *et al.*, 2023). Sob essa perspectiva, o presente estudo contribuiu não apenas

para o entendimento da sensibilidade da soja ao flumioxazin, mas também para a compreensão mais ampla dos efeitos agrônômicos da exposição não intencional a herbicidas, em sistemas de produção intensivos.

5 CONCLUSÃO

Diante da pesquisa bibliográfica realizada e dos resultados observados, durante a condução dos estudos, destaca-se as seguintes conclusões:

As subdoses de flumioxazin em pós-emergência causou injúrias visuais, alterações fisiológicas e redução no crescimento e no desempenho agrônômico da soja. Embora tenha ocorrido recuperação parcial dos sintomas de fitointoxicação ao longo do tempo, os efeitos do herbicida persistiram sobre variáveis fisiológicas, vegetativas e produtivas.

As subdoses reduziram altura, massa seca, número de ramos, nós produtivos, número de vagens, massa de mil grãos e produtividade, demonstrando que a recuperação visual não correspondeu à completa recuperação funcional das plantas.

A magnitude das respostas variou entre cultivares, evidenciando diferenças de sensibilidade ao flumioxazin, com maior redução produtiva para a BMX Guepardo IPRO e maior estabilidade relativa para a BMX Olimpo IPRO.

Portanto, a exposição da soja a subdoses de flumioxazin em pós-emergência pode comprometer seu desenvolvimento e reduzir o potencial produtivo, mesmo quando os sintomas visuais de injúria diminuem ao longo do ciclo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMARIE, A. A. Período crítico para a competição de plantas daninhas na soja *Glycine max* (L.) Merr. em áreas irrigadas no Iraque. **Journal of Agricultural and Biological Science**, [S. l.], v. 12, nº. 4, p. 128-132, 2017. Disponível em: http://www.arnjournals.org/jabs/research_papers/rp_2017/jabs_0417_855.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

ALVES, G. S. *et al.* Phytotoxicity in soybean crop caused by simulated dicamba drift. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 56, e 01764, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.26912>. Disponível em: Acesso em: 27 fev. 2026.

BELFRY, K. D. *et al.* Identity-preserved soybean tolerance to protoporphyrinogen oxidase-inhibiting herbicides. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 30, nº. 1, p. 137-147, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00082.1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BELZ, R. G.; CEDERGREEN, N.; DUKE, S. O. *et al.* Herbicide hormesis: can it be useful in crop production? *Weed Research*, **Oxford**, v. 51, nº. 4, p. 321-332, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2011.00862.x>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BELZ, R. G.; DUKE, S. O. *et al.* Herbicides and plant hormesis. *Pest Management Science*, **Sussex**, v. 70, nº. 5, p. 698-707, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ps.3726>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BROCHADO, M. G. da S. *et al.* Can herbicides of different mode of action cause injury symptoms in non-herbicide-tolerant young soybean due to simulated drift? **Journal of Environmental Science and Health**, Part B, [S. l.], v. 58, nº. 12, p. 726-743, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2275512>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BROWNE, F. B. *et al.* Dicamba retention in commercial sprayers following triple rinse cleanout procedures and soybean response to contamination concentrations. **Agronomy**, **Basel**, v. 10, nº. 6, art. 772, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060772>. Acesso em: 25 jul. 2025.

BRUSAMARELLO, A. P. *et al.* Tolerance of Brazilian bean cultivars to protoporphyrinogen oxidase inhibiting-herbicides. **Journal of Plant Protection Research**, Poznań, v. 61, nº. 2, p. 117-126, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.24425/jppr.2021.137018>. Acesso em: 25 jul. 2025.

COLQUHOUN, J. **Herbicide persistence and carryover**. Madison: University of Wisconsin-Extension, 2006. 12 p.

COSTA, E. M. *et al.* Simulated drift of dicamba and 2,4-D on soybeans: effects of application dose and time. **Bioscience Journal, Uberlândia**, v. 36, n°. 3, p. 857-864, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n3a2020-47742>. Acesso em: 25 jul. 2025.

CUNDIFF, G. T.; REYNOLDS, D. B.; MUELLER, T. C. *et al.* Evaluation of dicamba persistence among various agricultural hose types and cleanout procedures using soybean (Glycine max) as a bio-indicator. *Weed Science*, **Cambridge**, v. 65, n°. 2, p. 305-316, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wsc.2016.29>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DAYAN, F. E. *et al.* Effects of isoxazole herbicides on protoporphyrinogen oxidase and porphyrin physiology. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 45, n°. 3, p. 967-975, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jf9607019>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EASON, K. *et al.* Assessment of flumioxazin soil behavior and thermal stability in aqueous solutions. *Chemosphere*, **Oxford**, v. 288, pt. 2, e132477, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132477>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EGAN, J. F. *et al.* A meta-analysis on the effects of 2,4-D and dicamba drift on soybean and cotton. *Weed Science*, **Cambridge**, v. 62, n°. 1, p. 193-206, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00025.1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja: Região Central do Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2010.

EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. ARENA, M. *et al.* Updated peer review of the pesticide risk assessment of the active substance flumioxazin. **EFSA Journal, Parma**, v. 18, n°. 9, e06246, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6246>. Acesso em: 25 jul. 2025.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, [S. l.], v. 37, n°. 4, p. 529-535, 2019. Disponível em:

GAGE, K. L.; KRAUSZ, R. F.; WALTERS, S. A. *et al.* Emerging challenges for weed management in herbicide-resistant crops. **Agriculture, Basel**, v. 9, n°. 8, e180, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9080180>. Acesso em: 25 jul. 2025.

GALO, L. *et al.* Soybean response to saflufenacil doses, alone or combined with glyphosate, simulating tank contamination. **Agronomy, Basel**, v. 15, n°. 8, e1758, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081758>. Acesso em: 25 jul. 2025.

GAZOLA, T. *et al.*, Selectivity and residual weed control of pre-emergent herbicides in soybean crop. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 68, n°. 3, p. 219-229, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168030008>. Acesso em: 25 jul. 2025.

HAO, Ge-Fei. *et al.* Protoporphyrinogen oxidase inhibitor: an ideal target for herbicide discovery. *Chimia, Aarau*, v. 65, nº. 12, p. 961-969, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2533/chimia.2011.961>. Acesso em: 25 jul. 2025. Acesso em: 25 jul. 2025.

HURDLE, N. L. *et al.* Response of non-irrigated peanut to multiple rate delayed flumioxazin applications. *Agronomy, Basel*, v. 15, nº. 1, artigo 64, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy15010064>. Acesso em: 25 jul. 2025.

KALSING, A. *et al.*, Efeito da contaminação do tanque de pulverização com 2,4-D e dicamba sobre soja resistente ao glifosato. [S. l.]: **SBCPD**, 2014. Disponível em: <https://www.sbcpd.org/uploads/trabalhos/efeito-da-contaminacao-do-tanque-de-pulverizacao-com-24-d-e-dicamba-sobre-soja-resistente-ao-glifosato-835.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MAHONEY, K. J. *et al.* Tolerance of soybean (*Glycine max* L.) to protoporphyrinogen oxidase inhibitors and very long chain fatty acid synthesis inhibitors applied preemergence. *American Journal of Plant Sciences*, [S. l.], v. 5, nº. 8, p. 1117-1124, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajps.2014.58124>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MARQUES, M. G. *et al.* Dicamba residues in sprayers: phytotoxicity on non-dicamba tolerant soybean. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 25, nº. 8, p. 573-579, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p573-579>. Acesso em: 25 jul. 2025.

McNAUGHTON, K. E. *et al.* Soybean (*Glycine max*) tolerance to timing applications of pyroxasulfone, flumioxazin, and pyroxasulfone + flumioxazin. *Weed Technology, Cambridge*, v. 28, nº. 3, p. 494-500, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-14-00016.1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

MENDES, R. R. *et al.* **Inibidores da protoporfirino-oxidase (PROTOX)**. Santo Ângelo: Metrics, 2014. cap. 8, p. 215-238.

MESELDŽIJA, M. *et al.* Is there a possibility to involve the hormesis effect on the soybean with glyphosate sub-lethal amounts used to control weed species *Amaranthus retroflexus* L.? *Agronomy, Basel*, v. 10, nº. 6, e850, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060850>. Acesso em: 25 jul. 2025.

NUNES, R. T. *et al.* Soybean injury caused by the application of subdoses of 2,4-D or dicamba, in simulated drift. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, [S. l.], v. 58, nº. 4, p. 327-333, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.2173927>. Acesso em: 25 jul. 2025.

OLIVEIRA JR., R. S. de. **Mecanismos de ação de herbicidas: Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. cap. 7, p. 232-235.

OSTERHOLT, M. J. *et al.* Overlay of residual herbicides in rice for improved weed management. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 33, nº. 3, p. 426-430, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2019.22>. Acesso em: 25 jul. 2025.

PRIESS, G. L. *et al.* Effects on soybean canopy formation and soil-borne pathogen presence. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 34, nº. 5, p. 711-717, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2020.43>. Acesso em: 25 jul. 2025.

PROCÓPIO, S. O. *et al.* Impacts of weed resistance to glyphosate on herbicide commercialization in Brazil. **Agriculture**, v. 14, nº. 12, p. 2315, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122315>. Acesso em: 25 jul. 2025.

REED, T. V. *et al.* Flumioxazin tank-mixtures with six herbicides for annual bluegrass (*Poa annua*) control in bermudagrass. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 29, nº. 3, p. 561-569, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-D-14-00109.1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

RIBEIRO JUNIOR, L. F. *et al.* Tolerância inicial de feijão-caupi a herbicidas aplicados em pré-emergência. **Revista Brasileira de Herbicidas, Londrina**, v. 17, nº. 3, p. 1-8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.7824/rbh.v17i3.603>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SALADIN, G.; MAGNÉ, C.; CLÉMENT, C. Stress reactions in *Vitis vinifera* L. following soil application of the herbicide flumioxazin. *Chemosphere*, **Oxford**, v. 53, nº. 3, p. 199-206, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00515-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00515-0). Acesso em: 25 jul. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

SHANER, D. L. **Herbicide handbook**. 10ª. ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2014. 513 p.

SILVA, A; F. *et al.* Período anterior à interferência na cultura da soja-RR em condições de baixa, média e alta infestação. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 27, nº. 1, p. 57-66, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000100009>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SOLTANI, N.; BOWLEY, S. R.; SIKKEMA, P. H. *et al.* Responses of dry beans to flumioxazin. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 19, nº. 2, p. 351-358, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-04-146R1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SOLTANI, N.; SHROPSHIRE, C.; SIKKEMA, P. H. *et al.* Sensitivity of leguminous crops to saflufenacil. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 24, nº. 2, p. 143-146, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1614/WT-09-029.1>. Acesso em: 25 jul. 2025.

STEPHENSON, D. O. *et al.* Effects of low-dose flumioxazin and metribuzin postemergence applications on soybean. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 33, n°. 1, p. 87-94, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/wet.2018.101>. Acesso em: 25 jul. 2025.

TAIZ, L.; ZEIGER. *et al.* **Plant physiology and development**. 6ª. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015. 761 p.

TAYLOR-LOVELL, S. WAX, L. M.; NELSON, R. L. Phytotoxic response and yield of soybean (*Glycine max*) varieties treated with sulfentrazone or flumioxazin. *Weed Technology*, **Cambridge**, v. 15, n°. 1, p. 95-102, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2001\)015\[0095:PRAYOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2001)015[0095:PRAYOS]2.0.CO;2). Acesso em: 25 jul. 2025.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n°. 1, p. 55-94, 1948. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19481700896> Acesso em: 25 jul. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. World Agricultural Supply and Demand Estimates (WASDE). Washington, DC: **USDA**, n°. 650, jul. 2024. Disponível em: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/3t945q76s/h702rx54z/6395xz09z/wasde0724.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2025.

VIEIRA, C. C. *et al.* Pengyin. Differential responses of soybean genotypes to off-target dicamba damage. *Crop Science*, **Madison**, v. 62, p. 1472-1483, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/csc2.20757>. Acesso em: 25 jul. 2025.

VIEIRA, C. C. *et al.* Grover. Genetic architecture of soybean tolerance to off-target dicamba. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 14, artigo 1230068, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1230068>. Acesso em: 25 jul. 2025.

WERLE, R; PROOST, R; BOERBOOM, C. *et al.* Soybean injury from dicamba. Madison: **University of Wisconsin-Extension, Cooperative Extension**, 2018. 4 p. Disponível em: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0145/8808/4272/files/A4161.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

ZHU, J. *et al.* Weed research status, challenges, and opportunities in China. **Crop Protection**, Amsterdam, v. 134, e104449, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.02.001>. Acesso em: 25 jul. 2025.