

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL GOIANO – CAMPUS URUTAÍ**

LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA BARROS

**RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO
HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA:
MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO**

**URUTAÍ - GOIÁS
2025**

LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA BARROS

**RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO
HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA:
MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO**

Trabalho de Curso apresentado ao IF Goiano
Campus Urutaí como parte das exigências do
Curso de Graduação em Agronomia para
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Igor de
Azevedo Pereira.

URUTAÍ - GOIÁS
2025

LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA BARROS

**RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO
HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA:
MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO**

Monografia apresentada ao IF
Goiano Campus Urutaí como parte
das exigências do Curso de
Graduação em Agronomia para
obtenção do título de Bacharel em
Agronomia.

Aprovada em 22 de dezembro de 2025



Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira
(Orientador e Presidente da Banca Examinadora)
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí.



Profª. Drª. Carmen Rosa da Silva Curvêlo
Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí



Dr. João Batista Coelho Sobrinho
Bolsista Pós-Doc
Centro de Excelência em Bioinsumos
CEBIO

URUTAÍ - GOIÁS
2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

B277	<p>BARROS, LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA: MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO / LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA BARROS. Urutai 2025.</p> <p>25f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira. Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0120024 - Bacharelado em Agronomia - Urutai (Campus Urutai).</p> <p>I. Título.</p>
------	--

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

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

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA BARROS

Matrícula:

2019101200240327

Título do trabalho:

RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA: MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 31 / 01 / 2026

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

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

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

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

Urutaí, Goiás

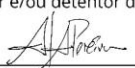
Local

13 / 01 / 2026

Data


Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Urutai - Código INEP: 52063909
Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, CEP 75790-000, Urutai (GO)
CNPJ: 10.651.417/0002-59 - Telefone: (64) 3465-1900

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **Resistência de plantas daninhas à molécula do herbicida glifosato na cultura da soja: mecanismos, ocorrência e estratégias de manejo**, sob orientação de Alexandre Igor de Azevedo Pereira, apresentada pelo aluno **Luiz Felipe de Oliveira Barros (2019101200240327)** do Curso **Bacharelado em Agronomia (Campus Urutai)**. Os trabalhos foram iniciados às 09:30 pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Alexandre Igor de Azevedo Pereira** (Presidente)
- **Carmen Rosa da Silva Curvelo** (Examinadora Interna)
- **João Batista Coelho Sobrinho** (Examinador Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

[X] Aprovado

[] Reprovado

Nota (quando exigido): 9,0

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Alexandre Igor de Azevedo Pereira** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Carmen Rosa da Silva Curvelo

Carmen Rosa da Silva Curvelo

URUTAI / GO, 22 de dezembro de 2025.

Alexandre Igor de Azevedo Pereira

Alexandre Igor de Azevedo Pereira

João Batista Coelho Sobrinho

João Batista Coelho Sobrinho

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e família, que me apoiaram e me deram suporte no decorrer do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder saúde e força para superar os desafios enfrentados. Meu reconhecimento vai também para meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira, pelo apoio nas correções e pelos incentivos recebidos. Ao IF Goiano pelo suporte institucional e acadêmico que foi crucial durante o meu percurso. A todos professores pelos valiosos ensinamentos compartilhados. A minha família pelo amor, apoio e encorajamento incondicional; sem vocês, esta conquista não teria sido possível. Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	11
REVISÃO DE LITERATURA	12
CONCLUSÃO.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20

RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS À MOLÉCULA DO HERBICIDA GLIFOSATO NA CULTURA DA SOJA: MECANISMOS, OCORRÊNCIA E ESTRATÉGIAS DE MANEJO

Luiz Felipe de Oliveira Barros¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: luiz.barros@estudante.ifgoiano.edu.br

RESUMO - A soja *Glycine max* (L.) Merr.), se tornou uma das commodities mais importante para o Brasil, sendo símbolo da economia na geração de emprego e renda. O seu cultivo exige práticas agrícolas que vão desde o preparo do solo ao controle de plantas daninhas. O uso da molécula de glifosato no controle de plantas daninhas é um dos principais métodos adotados para manejo na soja, principalmente em soja (RR – Roundup Ready), que é resistente ao glifosato. Entretanto o uso contínuo e intensificado desse herbicida através do processo de seleção exerceu forte pressão seletiva sobre as populações de plantas daninhas, o que causou um aumento explosivo de espécies resistentes em certas regiões do mundo. Compreender os mecanismos de evolutivos, genéticos e bioquímicos que conferem a resistência ao glifosato é fundamental para tomada de decisão no cultivo e manejo da soja. Diante do exposto objetivou-se com essa pesquisa de revisão, aprofundar a caracterização dos mecanismos moleculares de resistência (TSR e NTSR) em espécies-chave na cultura da soja, fornecendo subsídios científicos para o desenvolvimento de estratégias robustas de Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD). Os resultados da pesquisa demonstraram que a resistência de algumas espécies de plantas daninhas presentes na cultura da soja é uma realidade crescente. Fatores como uso repetido do mesmo modo de ação, e falta de rotação de culturas favoreceram o desenvolvimento da resistência, o que gera impactos tanto ambientais como econômicos. Adoção de práticas agrícolas como rotação de culturas, uso de bioinsumos, diversificação de herbicidas são as alternativas para atenuar o desenvolvimento e disseminação da resistência ao glifosato.

Palavras-chave: Tecnologia; matologia; manejo integrado, sudeste goiano, agronomia.

WEED RESISTANCE TO THE HERBICIDE MOLECULE GLYPHOSATE IN SOYBEAN CROPS: MECHANISMS, OCCURRENCE, AND MANAGEMENT STRATEGIES

Luiz Felipe de Oliveira Barros¹

⁽¹⁾ Instituto Federal Goiano Campus Urutaí, Rodovia Prof. Geraldo Silva Nascimento, Km 2,5, CEP 75790-000 Urutaí, GO, Brasil. E-mail: luiz.barros@estudante.ifgoiano.edu.br

ABSTRACT - Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) has become one of Brazil's most important commodities, serving as a symbol of the economy through the generation of jobs and income. Its cultivation requires agricultural practices ranging from soil preparation to weed control. The use of the herbicide glyphosate for weed management is one of the main methods adopted in soybean production, especially in glyphosate-resistant soybean (RR – Roundup Ready). However, the continuous and intensified use of this herbicide, through the selection process, has exerted strong selective pressure on weed populations, leading to an explosive increase in resistant species in certain regions of the world. Understanding the evolutionary, genetic, and biochemical mechanisms that confer glyphosate resistance is essential for decision-making in soybean cultivation and management. Therefore, this review study aimed to deepen the characterization of the molecular mechanisms of resistance (TSR and NTSR) in key weed species affecting soybean, providing scientific support for the development of robust Integrated Weed Management (IWM) strategies. The results showed that resistance in some weed species present in soybean fields is a growing reality. Factors such as repeated use of the same mode of action and lack of crop rotation have favored the development of resistance, generating both environmental and economic impacts. The adoption of agricultural practices such as crop rotation, the use of bioinputs, and herbicide diversification are alternatives to mitigate the development and spread of glyphosate resistance.

Key-words: Technology; weed science; integrated management; southeastern Goiás; agronomy.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) tornou-se uma das principais culturas agrícolas do mundo e a espinha dorsal da economia brasileira. No ambiente agrícola sulamericano, a ampla adoção de cultivares geneticamente modificadas resistentes ao glifosato (GR) elevou significativamente a produtividade (GARCÍA et al., 2019).

Segundo Duke e Powles (2008) o glifosato é o herbicida que modificou o manejo de plantas daninhas, apresentando amplo espectro e baixo custo, sua eficiência está ligada principalmente na rota do chiquimato, inibindo a enzima 5enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), que sintetiza aminoácidos aromáticos cruciais para a sobrevivência vegetal. Contudo essa eficácia vem perdendo força, principalmente pelo uso repetitivo e exclusivo da molécula de glifosato para controle de daninhas, o que impôs uma pressão seletiva, levando a resistência de algumas espécies a ação do herbicida. Segundo Heap (2025), essa resistência a molécula de glifosato já foi registrada em várias partes do mundo.

No cenário da sojicultura, hoje no Brasil existe uma gama de espécies de daninhas que já apresentam resistência ao glifosato incluindo as espécies do gênero *Conyza* (buva, como *C. bonariensis* e *C. sumatrensis*) e do gênero *Amaranthus* (caruru, como *A. palmeri* e *A. tuberculatus*), além da gramínea *Digitaria insularis* (capim-amargoso). A expansão de *A. palmeri* é particularmente preocupante devido ao seu crescimento rápido e alta competitividade, o que representa uma ameaça direta à produtividade. Além disso, populações de *Conyza* spp. frequentemente exibem resistência múltipla ao glifosato e a outros herbicidas, como os inibidores de ALS (Acetolactato Sintase) (KASPARY et al., 2025).

O ponto chave da resistência ao glifosato reside em dois grandes grupos de mecanismos: Resistência de Sítio-Alvo (TSR) e Resistência de Não-Sítio-Alvo (NTSR). Entre os mecanismos TSR mais relevantes, destaca-se a amplificação gênica do EPSPS (aumento do número de cópias do gene) (FONSECA et al., 2020). Gaines et al. (2010) foram pioneiros ao reportar que essa amplificação confere resistência em *A. palmeri*. Estudos posteriores revelaram que, nesta espécie, essa amplificação está frequentemente associada à presença e transmissão de DNA circular extracromossomal (eccDNA), caracterizado como um "EccDNA Replicon" (MOLIN et al., 2020).

Outro mecanismo TSR crucial envolve mutações pontuais na enzima EPSPS. Em populações de *Amaranthus hybridus* no Brasil, Resende et al. (2022) e Sulzbach et al. (2024) confirmaram a presença da mutação tripla TAP-IVS (T102I, A103V, P106S), uma alteração relatada por García et al. (2019) que confere alto nível de resistência. No que tange aos mecanismos NTSR, eles incluem a redução da absorção e translocação do herbicida e o sequestro vacuolar, um processo onde a molécula é isolada, amplamente documentado em espécies de *Conyza* (GE et al., 2010; KLEINMAN E RUBIN, 2017). Em *C. sumatrensis*, Schneider et al. (2021) observaram a superexpressão de genes de transportadores ABC (m7 e m11) que podem estar envolvidos nesse sequestro vacuolar.

Diante dessa complexidade, torna-se essencial a consolidação do conhecimento recente sobre os mecanismos evolutivos, genéticos e bioquímicos que conferem a resistência ao glifosato. Este trabalho de revisão visa, portanto, aprofundar a caracterização dos mecanismos moleculares de resistência (TSR e NTSR) em espécies-chave na cultura da soja, fornecendo subsídios científicos para o desenvolvimento de estratégias robustas de Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD), conforme recomendado por Norsworthy et al. (2012).

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa consiste em uma revisão narrativa da literatura fundamentada na literatura científica e técnica publicada entre 2015 e 2025. A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados nacionais e estrangeiras, como SciELO, Scopus e Web of Science, utilizando palavras-chave em português e inglês, que são: resistência ao glifosato, gene EPSPS, plantas daninhas de soja, resistência a herbicidas, *Conyza*, *Amaranthus* e *Digitaria*. Foram selecionados apenas artigos de pesquisa originais, revisões. Foram considerados, os critérios de exclusão como itens não diretamente relacionados ao tópico ou sem dados científicos conhecidos. A análise das fontes buscou lidar com tendências, desenvolvimentos científicos e melhores abordagens no contexto atual em relação à resistência de plantas daninhas ao glifosato.

REVISÃO DE LITERATURA

O GLIFOSATO E SEU MODO DE AÇÃO

O glifosato (N-(fosfonometil) glicina) é um herbicida organofosforado de amplo espectro mais relevante e amplamente utilizado na agricultura devido ao seu baixo custo e alta eficiência, atua como inibidor da enzima 5-enoilpiruvil-chiquimato 3'fosfato sintase (EPSPS), essencial para a biossíntese de aminoácidos aromáticos nas plantas. Portanto, o glifosato inibe o acúmulo de aminoácidos, levando ao bloqueio da síntese proteica e da produção de metabólitos secundários nas plantas (TANI et al. 2015).

Segundo Resende et al. (2025), o glifosato atua na rota do ácido chiquímico bloqueando a biossíntese de aminoácidos aromáticos essenciais, tais como fenilalanina, tirosina e triptofano e também metabolitos secundários que são importantes para defesa dos vegetais, a inibição da enzima (EPSPS) leva a interrupção do crescimento e eventual morte da planta.

O glifosato atua como um inibidor competitivo do substrato natural da enzima (EPSPS), o fosfoenolpiruvato (PEP). Ele mimetiza o substrato, inibindo dessa forma a catálise enzimática. Levando a supressão da produção de aminoácidos aromáticos e, consequentemente, na interrupção do desenvolvimento da planta (GARCIA et al., 2019). Após a aplicação, o glifosato é rapidamente absorvido pelas folhas e translocado via floema para as regiões meristemáticas, onde exerce sua ação herbicida. Sua eficiência, associada à baixa toxicidade para animais e ao custo reduzido, fez do glifosato o herbicida mais utilizado no mundo (NALIN et al., 2023).

CONCEITO DE RESISTÊNCIA E EVOLUÇÃO DO PROBLEMA

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é a capacidade hereditária de uma população de plantas sobreviver e se reproduzir após a exposição a doses do produto que seriam tóxicas para membros suscetíveis da mesma espécie (HEAP, 2023). O fenômeno se dá por meio de processos evolutivos regulados pela seleção natural, que favorecem indivíduos com mutações genéticas, atividades metabólicas ou características fisiológicas que reduzem a sensibilidade ao herbicida (DÉLYE et al., 2013; POWLES e YU, 2010).

Para o glifosato, a resistência é talvez o problema mais significativo no controle químico de plantas daninhas na agricultura moderna. A aplicação extensiva e exclusiva

desse herbicida, particularmente na tecnologia de soja transgênica resistente ao glifosato (Roundup Ready), exerceu forte pressão seletiva sobre as populações de plantas daninhas, o que causou um aumento explosivo de espécies resistentes em certas regiões do mundo (GAINES et al., 2020; HEAP, 2023).

Desde que a primeira resistência ao glifosato em *Lolium rigidum* foi relatada na Austrália em 1996, o número de espécies resistentes tem aumentado constantemente. Mais de 50 espécies de plantas daninhas foram relatadas como portadoras de resistência confirmada ao glifosato, algumas das quais incluem espécies importantes associadas à cultura da soja, como *Conyza bonariensis*, *Conyza canadensis*, *Amaranthus palmeri* e *Digitaria insularis* (HEAP, 2023).

Os mecanismos de resistência evoluíram de forma diferente em diferentes espécies. Enquanto em algumas espécies são observadas mutações no gene que codifica a enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), que reduz a afinidade do glifosato pelo seu sítio de ligação (YU et al., 2021), outras desenvolveram mecanismos não direcionados, como sequestro vacuolar, superexpressão de EPSPS e redução da translocação do herbicida dentro da planta (GAINES et al., 2020; PALBERG et al., 2024). O desenvolvimento da resistência tem sido facilitado pela falta de rotação dos mecanismos de ação, pela recorrência no uso do glifosato e pela baixa diversidade nas práticas de manejo. Essa dependência excessiva tem facilitado a disseminação de populações resistentes em todo o mundo, desafiando a sustentabilidade do controle químico e aumentando os custos de produção (FERNÁNDEZ-MORENO et al., 2017; DUKE, 2021). Portanto, é de suma importância compreender a dinâmica evolutiva da resistência na formulação de esquemas de manejo integrado e no uso racional de herbicidas.

MECANISMOS DE RESISTÊNCIA

De acordo com Fernandez-Moreno et al. (2017) e Resende et al. (2023), a resistência ao glifosato em plantas daninhas se deve a vários mecanismos, que são classificados como mecanismos-alvo e não-alvo. Tais mecanismos envolvem alterações genéticas, bioquímicas e fisiológicas que reduzem a eficácia do herbicida, favorecendo sua persistência em campos agrícolas.

Mecanismos de resistência em mecanismos-alvo estão relacionados a mutações no gene EPSPS (5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase), uma enzima crítica na via do

ácido chiquímico, o principal alvo do glifosato. Diversos estudos comprovaram que mutações únicas e múltiplas da enzima do sítio ativo reduzem a afinidade do herbicida, inibindo seu efeito tóxico. Resende et al. (2023) explicaram que a alteração estrutural no sítio ativo do EPSPS, revelada pela mudança de posição e energia de interação, contribui significativamente para a resistência de *Amaranthus hybridus*.

Perotti et al. (2019) também já haviam observado a tripla substituição TAP-IVS (Thr102Ile, Ala103Val, Pro106Ser) no gene EPSPS, conferindo alta resistência ao glifosato em populações de *A. hybridus*. Tais mutações alteram o domínio de ligação ao glifosato, mantendo a atividade enzimática e garantindo o crescimento da planta, apesar de altas dosagens de herbicidas.

Outro mecanismo de direcionamento amplamente relatado é a amplificação do gene EPSPS, resultando na superexpressão enzimática. Gaines et al. (2019) e Molin et al. (2020) confirmaram que populações resistentes de *Amaranthus palmeri* possuem cópias adicionais do gene EPSPS, frequentemente em conjunto com a presença de DNA circular extracromossômico (eccDNA), um tipo de herança não mendeliana que acelera a disseminação da resistência. Jalaludin et al. (2021) e Koo et al. (2023) confirmaram que o eccDNA existe como um veículo extranuclear que abriga múltiplas cópias do gene EPSPS, conferindo resistência de forma estável ao longo de gerações e até mesmo por meio de espécies híbridas.

Em mecanismos de resistência não alvo, a resistência é provocada por mecanismos que impedem a chegada do glifosato ao seu local de ação, como absorção reduzida, compartimentalização ou degradação metabólica. FernándezMoreno et al. (2017) e Pan et al. (2021) acrescentaram que plantas daninhas como *Conyza bonariensis* e *C. canadensis* possuem sequestro vacuolar e translocação reduzida do floema, mecanismos que limitam o transporte do herbicida para os tecidos meristemáticos.

Estudos como de De Carvalho et al. (2020) relatam resistência em *Digitaria insularis*, associando polimorfismos no gene EPSPS a vias de desintoxicação metabólica. Essa diversidade de mecanismos de resistência demonstra que a evolução do fenômeno é dinâmica e pode ocorrer em paralelo por meio de mutação do gene alvo e amplificação gênica mediada por eccDNA. Tais mecanismos de adaptação tornam o controle químico cada vez mais difícil e exigem estratégias de manejo integradas (GAINES et al., 2023; KOO et al., 2023).

ESPÉCIES RESISTENTES EM SOJA NO BRASIL E NO MUNDO

A adoção no controle de plantas daninhas pelo uso do glifosato em plantações de soja, em especial as que usam a tecnologia (RR – Roundup Ready), que é resistente ao glifosato, fez com que a pressão de seleção sob os indivíduos alvos aumentasse e consequentemente resultou no aparecimento de várias espécies resistente ao herbicida em diferentes regiões e países (HEAP, 2024). Atualmente, mais de 50 espécies de plantas daninhas estabeleceram resistência ao glifosato em mais de 40 países, afetando diretamente a produtividade da soja e aumentando os custos de manejo (GAINES et al., 2023; PEROTTI et al., 2019).

Na cultura da soja existem espécies que devido o uso exacerbado e constante de glifosato criaram mecanismo de resistência de forma evolutiva sendo as principais, as que fazem parte do gênero *Amaranthus*, especificamente *Amaranthus palmeri*, *A. hybridus* e *A. tuberculatus*, que apresentam ampla distribuição e mecanismos complexos de resistência. Corroborando com essas informações Gaines et al. (2019) e Molin et al. (2020) relataram que populações de *A. palmeri* dos Estados Unidos e da América do Norte desenvolveram amplificação do gene EPSPS, frequentemente mediada por DNA circular extracromossômico (eccDNA) — uma forma de herança não mendeliana que permite a rápida transmissão de resistência. Jalaludin et al. (2021) demonstraram que o mesmo mecanismo ocorre em híbridos interespecíficos de *Amaranthus*, o que aumenta ainda mais a adaptabilidade da espécie em ambientes agrícolas.

Na América do Sul, *Amaranthus hybridus* tornou-se uma das principais espécies resistentes em culturas de soja argentinas e brasileiras. Resende et al. (2023) descrevem que mutações no sítio ativo da enzima EPSPS, associadas à tripla substituição TAP-IVS descrita por Perotti et al. (2019), conferem alta resistência ao glifosato. Esses mecanismos, juntamente com a taxa de cruzamento e a dispersão de sementes, tornam o controle químico extremamente difícil, tornando imperativas estratégias de manejo integrado.

Outras espécies com ampla ocorrência em campos de soja são as do gênero *Conyza*, como *C. bonariensis*, *C. canadensis* e *C. sumatrensis*. Fernández-Moreno et al. (2017) demonstraram em seus estudos que populações dessas espécies, encontradas em pomares e campos de soja na América do Sul e do Norte, possuem resistência múltipla ao glifosato e aos inibidores de ALS devido a uma combinação de mecanismos de sítio-alvo (mutação Pro106Ser) e mecanismos de sítio-alvo, como sequestro vacuolar e translocação reduzida do floema. No México, Pan et al. (2021) também confirmaram a mutação

Pro106Ser em *C. canadensis*, que está associada à mobilidade reduzida de herbicidas no tecido foliar.

No Brasil, o cenário é agravado pela presença de *Digitaria insularis* (capimamargoso), que desenvolveu resistência múltipla ao glifosato e aos inibidores de ACCase por meio de polimorfismos em genes-alvo e alterações metabólicas (DE CARVALHO et al., 2020). Esta espécie é atualmente uma das principais ameaças ao cultivo da soja no Cerrado e no Sul do Brasil devido ao seu alto potencial de rebrota e propagação vegetativa.

Na Europa também foi relatada a presença de *Amaranthus palmeri* resistente a molécula de glifosato, também foi relatada populações de *Amaranthus tuberculatus* que apresentaram amplificações do gene EPSPS conferindo desta forma resistência ao glifosato, esses dados reafirmam a importância e a evolução dos mecanismos de resistências das plantas daninhas não apenas no Brasil mais em todo o resto mundo tornando se um problema global (KOO et al., 2023; MOLIN et al., 2020).

A resistência ao glifosato é altamente favorecida por circunstâncias agronômicas que expõem as populações de plantas daninhas a intensa pressão seletiva. A taxa de aplicação recorrente de glifosato como única prática de controle em tecnologias de soja geneticamente modificada conferiu seleção a indivíduos resistentes, particularmente em espécies de alto valor reprodutivo, como *Amaranthus palmeri*, *A. hybridus* e *Conyza* spp. (RESENDE et al., 2023; PEROTTI et al., 2019; FERNÁNDEZ-MORENO et al., 2017). Práticas como monocultura, falta de rotação de culturas e herbicidas com dois ou mais modos de ação, ou aplicação em taxas subletais, são algumas das razões que contribuíram para a alta frequência de biótipos resistentes (PAN et al., 2021; DE CARVALHO et al., 2020)

Além disso, mecanismos como a amplificação mediada por eccDNA do gene EPSPS em *Amaranthus palmeri* e híbridos interespecíficos (JALALUDIN et al., 2021; MOLIN et al., 2020; KOO et al., 2023) permitem que a resistência se transmita rapidamente, independentemente da reprodução sexuada, acelerando a evolução para acelerar o problema. A grande capacidade de dispersão de sementes, combinada com a presença de populações perenes no solo e a eficácia do glifosato no tecido meristemático, piora a sobrevivência de plantas resistentes e aumenta o problema de manejo (VILA-AIUB et al., 2019; RESENDE et al., 2023). Portanto, a ocorrência de resistência é resultado não apenas de fatores genéticos, mas também de manejo e escolha agronômicos.

IMPACTOS AGRONÔMICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS

As Plantas daninhas resistentes ao glifosato influenciam diretamente a produtividade da soja e a sustentabilidade do sistema agrícola. A infestação de espécies resistentes, como *Amaranthus palmeri*, *A. hybridus*, *Conyza bonariensis* e *Digitaria insularis*, compete vigorosamente por luz, umidade e nutrientes, com potencial para reduzir a produtividade em até 50% em áreas não controladas (RESENDE et al., 2023; DE CARVALHO et al., 2020). Em termos econômicos, a resistência obriga os produtores a utilizar combinações de herbicidas, altos volumes e frequências de aplicação mais elevadas, o que aumenta os custos operacionais e os riscos de perda de controle (GAINES et al., 2020; FERNÁNDEZ-MORENO et al., 2017).

Nos cultivos de soja no Brasil, o aumento da frequência de *Digitaria insularis* e *Conyza bonariensis* tem exigido controle integrado por meio de aplicações sequenciais e controles mecânicos, o que eleva o custo de produção (DE CARVALHO et al., 2020). Os impactos ambientais estão ligados ao aumento do uso de herbicidas alternativos e combinações de produtos químicos mais duradouras, que podem contaminar o solo e os corpos d'água e afetar espécies não alvo (DUKE e POWLES, 2008; VILA-AIUB et al., 2019). A utilização recorrente do glifosato favorece a adaptação fisiológica e metabólica em plantas daninhas resistentes, como o desvio do fluxo de metabólitos e a geração de resposta antioxidante, reforçando o imperativo de práticas sustentáveis (MOLIN et al., 2020; RESENDE et al., 2023).

ESTRATÉGIAS DE MANEJO INTEGRADO E ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS

Após a expansão das formas resistentes, o controle integrado de plantas daninhas (MIP) foi identificado como um método fundamental que combina métodos químicos, culturais, mecânicos e biológicos (POWLES e YU, 2010; GAINES et al., 2020). Nos métodos químicos, é desejável rotacionar herbicidas com diferentes modos de ação e utilizá-los em doses e estágios fenológicos apropriados para reduzir a persistência das formas resistentes (PAN et al., 2021; FERNÁNDEZ-MORENO et al., 2017).

Essas abordagens de controle cultural, incluindo rotação de culturas, datas de plantio escalonadas e utilização de plantas de cobertura, servem para reduzir a pressão seletiva, bem como combater o acúmulo de espécies resistentes, particularmente *Amaranthus* spp. e *Conyza* spp. (RESENDE et al., 2023; HEAP, 2023). Ferramentas de

controle mecânico, como capina e roçada localizada, interrompem as fases reprodutivas em populações resistentes (DE CARVALHO et al., 2020; JALALUDIN et al., 2021).

Além disso, a integração do uso de alternativas biológicas e ecológicas, como bioherbicidas, micróbios antagonistas e cultivos consorciados, pode ajudar a gerenciar a aplicação de herbicidas químicos de forma eficaz (MOLIN et al., 2020; KOO et al., 2023). A integração desses métodos com o monitoramento populacional contínuo de plantas daninhas é fundamental para ajudar a manter o título de glifosato, mitigar os efeitos econômicos e ambientais, bem como aumentar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (GAINES et al., 2020; VILA-AIUB et al., 2019).

CONCLUSÃO

A resistência de plantas daninhas à soja é uma realidade crescente no Brasil e no mundo, com diversas espécies já apresentando resistência a herbicidas. Fatores como o uso repetido de herbicidas de mesmo modo de ação e a falta de práticas agrícolas diversificadas favorecem o desenvolvimento da resistência. Os impactos agronômicos, econômicos e ambientais são significativos, exigindo a adoção urgente de estratégias de manejo integrado e alternativas sustentáveis. A implementação de práticas como rotação de culturas, uso de bioinsumos e preservação ambiental são essenciais para garantir a sustentabilidade da produção de soja.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE CARVALHO, L. B. et al. Multiple-resistance evolution to ACCase inhibitors and glyphosate in *Digitaria insularis* is attributed to diverse polymorphisms in the herbicide target sites. *Scientific Reports*, v.10, p.14532, 2020.

DÉLYE, C.; JASIENIUK, M.; LE CORRE, V. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, v.29, p.649-658, 2013.

DUKE, S. O. Glyphosate: environmental fate and impact on non-target species. *Pest Management Science*, v.77, p.2669-2685, 2021.

DUKE, S.O., Powles, S.B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. *Pest Manag. Sci.* 64, 319–325. 2008.

FERNÁNDEZ-MORENO, P. T. et al. Resistance to glyphosate in *Conyza bonariensis* and *Conyza canadensis*: alternative herbicide management and molecular basis. *Frontiers in Plant Science*, v.8, p.1977, 2017.

FONSECA, E. C.M et al. Investigation of the target-site resistance of EPSP synthase mutants P106T and T102I/P106S against glyphosate. *RSC advances*, v. 10, n. 72, p. 44352-44360, 2020.

GAINES, T. A. et al. Can non-Mendelian inheritance of extrachromosomal circular DNA-mediated EPSPS gene amplification provide an opportunity to reverse resistance to glyphosate? *Frontiers in Plant Science*, v.14, 1132157, 2023.

GAINES, T. A. et al. Defence by duplication: The relation between phenotypic glyphosate resistance and EPSPS gene copy number variation in *Amaranthus palmeri*. *The Plant Journal*, v.97, p.615–626, 2019.

GAINES, T. A. et al. Gene amplification confers glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107, n. 3, p. 10291034, 2010.

GAINES, T. A. et al. Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*, v.295, p.10307-10330, 2020.

GARCÍA, M. J. et al. The triple amino acid substitution TAP-IVS in the EPSPS gene confers high glyphosate resistance to the superweed *Amaranthus hybridus*. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 20, n. 10, p. 2396, 2019.

GE, Xia et al. Rapid vacuolar sequestration: the horseweed glyphosate resistance mechanism. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, v. 66, n. 4, p. 345-348, 2010.

HEAP, I. International survey of herbicide resistant weeds. *WeedScience.org*, 2024. Disponível em: <https://www.weedscience.org>.

Heap, I., 2025. The international herbicide-resistant weed database. Online. Monday. Available. www.weedscience.org.

JALALUDIN, A. et al. Extrachromosomal circular DNA-mediated spread of herbicide resistance in interspecific hybrids of pigweed. *Nature Communications*, v.12, p.5700, 2021.

KASPARY, T. E. et al. *Conyza bonariensis* resistance to glyphosate and ALS inhibitors involves target and non-target site resistance. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, p. 106501, 2025.

KLEINMAN, Z.; RUBIN, B. Non-target-site glyphosate resistance in *Conyza bonariensis* is based on modified subcellular distribution of the herbicide. *Pest Management Science*, v. 73, n. 1, p. 246-253, 2017.

KOO, D. H. et al. The EccDNA replicon: A heritable, extranuclear vehicle that enables gene amplification and glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *PNAS*, v.120, e2203125120, 2023.

MOLIN, W. T. et al. The EccDNA replicon: a heritable, extranuclear vehicle that enables gene amplification and glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. *The Plant Cell*, v. 32, n. 7, p. 2132-2140, 2020.

NALIN, D. et al. Absorption, translocation, and metabolism of glyphosate and imazethapyr in smooth pigweed with multiple resistance. *Agronomy*, v. 13, n. 7, p. 1720, 2023.

NORSWORTHY, J. K. et al. Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations. *Weed science*, v. 60, n. SP1, p. 31-62, 2012.

PALBERG, K. et al. Uptake, translocation, and distribution of glyphosate in plants. *BMC Plant Biology*, v.24, p.178, 2024.

PAN, L. et al. Reduced glyphosate movement and mutation of the EPSPS gene (Pro106Ser) endow resistance in *Conyza canadensis* harvested in Mexico. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v.175, 104865, 2021.

PEROTTI, V. E. et al. The triple amino acid substitution TAP-IVS in the EPSPS gene confers high glyphosate resistance to the superweed *Amaranthus hybridus*. *Pest Management Science*, v.75, p.2578–2587, 2019.

Peterson, M. A., Collavo, A., Ovejero, R., Shivrain, V., & Walsh, M. J. (2018). The challenge of herbicide resistance around the world: a current summary. *Pest Management Science*, 74(10), 2246–2259.

POWLES, S. B.; YU, Q. Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annual Review of Plant Biology*, v.61, p.317-347, 2010.

RESENDE, L. S. et al. Alterations in EPSPS enzyme active site: Changes in position and reduced interaction energy contributing to glyphosate resistance in *Amaranthus hybridus*. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, v.125, p.108354, 2023.

RESENDE, L. S. et al. Glyphosate-resistant smooth-pigweed (*Amaranthus hybridus*) in Brazil. *Advances in Weed Science*, v. 40, p. e20210022, 2022.

SCHNEIDER, T. et al. Expression of genes related to the mechanism of resistance of *Conyza sumatrensis* to glyphosate. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 43, p. e44824, 2020.

SULZBACH, E. et al. Smooth pigweed (*Amaranthus hybridus*) and unresolved *Amaranthus* spp. from Brazil resistant to glyphosate exhibit the EPSPS TAP-IVS substitution. *Weed Science*, v. 72, n. 1, p. 48-58, 2024.

TANI E, Chachalis D, Travlos IS. A glyphosate resistance mechanism in *Conyza canadensis* involves synchronization of EPSPS and ABC-transporter genes. *Plant Mol Biol Report* 33:1105–1115, 2015.

VILA-AIUB, M. M., Goh, S. S., Gaines, T. A., Han, H., Busi, R., Yu, Q., & Powles, S. B. (2019). No fitness cost of glyphosate resistance endowed by massive EPSPS gene amplification in *Amaranthus palmeri*. *Planta*, 249(6), 1933–1943.

YU, Q. et al. Evolution of target-site resistance to glyphosate in *Amaranthus hybridus*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v.176, p.104871, 2021.

FERNÁNDEZ-MORENO, P. T. et al. *Conyza bonariensis* resistance to glyphosate and ALS inhibitors involves target and non-target site resistance. *Frontiers in Plant Science*, v.8, p.1977, 2017.