

RNA DE INTERFERÊNCIA NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS RESISTENTES A HERBICIDAS: POTENCIAL, LIMITES E PERSPECTIVAS

Modalidade: Artigo Completo

Samya Silva Ishii*

Amanda Bombana Pasa;

Laryssa Gabrielly Ribeiro Pinto;

Paulo Henrique da Silva

*samyasilva11ishii@gmail.com

RESUMO: As plantas daninhas comprometem a produtividade agrícola por competirem com as culturas por água, luz e nutrientes, sendo o controle químico uma das principais estratégias utilizadas para reduzir sua interferência. Entretanto, o uso repetitivo de herbicidas com os mesmos mecanismos de ação favorece a seleção de populações resistentes, cenário evidenciado pelos mais de 500 casos únicos de resistência registrados mundialmente. Este trabalho teve como objetivo analisar os desafios do manejo de plantas daninhas resistentes a herbicidas, com ênfase no potencial, nas limitações e nas perspectivas da interferência por RNA (RNAi) como ferramenta biotecnológica. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura, contemplando publicações científicas dos últimos dez anos, consultadas nas bases ScienceDirect, PubMed/PMC, Springer, Wiley, MDPI, Frontiers e SciELO, além do banco de dados internacional de plantas daninhas resistentes a herbicidas. Os estudos analisados evidenciaram o acúmulo de mecanismos de resistência relacionados e não relacionados ao sítio de ação, destacando-se a metabolização aumentada pela dificuldade de previsão e pelo potencial de conferir resistência a diferentes herbicidas. Quanto ao RNAi, os resultados demonstraram que a aplicação exógena de RNA de dupla fita (dsRNA) pode promover o silenciamento parcial de genes-alvo e alterações no crescimento de espécies daninhas, como *Mikania micrantha* e *Digitaria insularis*. Em *M. micrantha*, foram observadas reduções de 48,5% no número de raízes adventícias e de 30,4% na altura das plantas, enquanto, em *D. insularis*, houve redução de 44% na massa seca da parte aérea e de 75% no número de perfilhos. Apesar desses resultados, o silenciamento pode ser transitório, e a literatura ainda apresenta poucos estudos com plantas daninhas, predominantemente realizados em condições controladas. A baixa estabilidade do RNA, as barreiras à sua absorção e ao transporte nos tecidos vegetais, os custos de produção, os possíveis efeitos fora do alvo e a ausência de validação suficiente em campo constituem limitações importantes. Conclui-se que o RNAi apresenta potencial para ampliar as estratégias de controle de plantas daninhas resistentes, mas sua aplicação prática ainda depende de avanços tecnológicos e de validações experimentais. Nesse sentido, sua utilização deve ser considerada uma ferramenta complementar ao manejo integrado de plantas daninhas, e não um substituto imediato dos herbicidas convencionais.

1 INTRODUÇÃO

A área de produção agrícola depende quase que inteiramente da capacidade de aproveitar de forma inteligente os recursos limitados da natureza, tais como água, luz natural e nutrientes. Quando duas plantas de diferentes espécies passam a ocupar o mesmo espaço, passam a competir pelo acesso a esses recursos, prejudicando simultaneamente a produtividade e desenvolvimento da agricultura. Sendo assim, as

plantas daninhas se enquadram como um dos vários interferentes que existem em meio às plantações, são responsáveis por fazer competição direta com outras espécies, prejudicar as colheitas, e ocasionalmente atraem pragas e patógenos, além de gerarem aumento de custos voltados à proteção do campo (MACLAREN *et al.*, 2020; HORVATH *et al.*, 2023).

Visando reduzir o impacto dessa interferência, os produtores agrícolas contam com diversos métodos, tais quais mecânicos, culturais, biológicos e químicos. Sabe-se que, nas últimas décadas, os meios químicos tiveram grande destaque devido à sua praticidade, baixo custo e capacidade de aplicação em grandes áreas. Entretanto, aplicações intensas e repetidas das mesmas moléculas e compostos químicos resultaram em enorme resistência das plantas daninhas, como pode ser observado em levantamentos e pesquisas internacionais. HEAP (2026) divulgaram registros de cerca de 548 casos únicos de resistência, envolvendo 275 espécies e 21 dos 31 mecanismos de ação conhecidos, distribuídos em 102 culturas e 76 países.

Além da resistência, o uso intensivo de herbicidas também gera impactos ambientais, pois resíduos dessas moléculas alteram comunidades microbianas associadas às plantas e ao solo (RUUSKANEN *et al.*, 2023). Nesse contexto, a forte dependência do controle químico abre espaço para a inovação e para novos mecanismos de controle. Entre as tecnologias estudadas está a interferência por RNA (RNAi), um processo natural de silenciamento gênico que pode ser ativado pela aplicação de RNA dupla fita (dsRNA) sobre a planta. A efetividade do reconhecimento de alvo depende do nível de complementaridade de sequência gênica, logo, a RNAi possibilita a intervenção sobre genes específicos de uma espécie daninha, incluindo genes diretamente ligados à resistência (ZABALA-PARDO *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo revisar os principais desafios relacionados ao controle de plantas daninhas e à evolução da resistência aos herbicidas, com ênfase no potencial da interferência por RNA como ferramenta biotecnológica para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais específicas e sustentáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Plantas daninhas e impactos na produção agrícola

Plantas daninhas são todas as plantas que se estabelecem onde não são desejadas e interferem nos objetivos de quem conduz a área. A definição depende do ambiente e da cultura: espécies como *Sorghum halepense* e *Echinochloa crus-galli* são problemas sérios em lavouras anuais, enquanto outras plantas têm papel positivo em margens de talhão. Por isso o manejo não busca a ausência total de plantas daninhas, mas a redução da interferência a níveis que não comprometam a cultura (MACLAREN *et al.*, 2020).

O maior prejuízo vem da competição por água, luz e nutrientes. Trabalhos recentes, indicam que parte da perda ocorre antes dos recursos se tornarem limitantes: a cultura percebe a presença das plantas vizinhas por sinais luminosos e altera seu desenvolvimento, de forma que a redução de produtividade pode se manter mesmo quando as daninhas são removidas depois (HORVATH *et al.*, 2023). Esse achado reforça a importância do controle nos estágios iniciais.

Há ainda efeitos indiretos. Plantas daninhas servem de hospedeiro e de abrigo para insetos vetores e patógenos: levantamentos com sequenciamento de pequenos RNAs identificaram vírus de cereais em espécies espontâneas dentro e na borda das lavouras, muitas vezes em infecções persistentes e sem sintomas claros (GALBÁCS *et al.*, 2024).

Infestações elevadas também dificultam a colheita, aumentam impurezas no produto e elevam o custo com operações e insumos.

2.2 Manejo de plantas daninhas e impactos ambientais

O controle mecânico reduz a população de daninhas, mas consome energia, demanda mão de obra e, em sistemas conservacionistas, conflita com a manutenção da palhada. O controle cultural atua de forma preventiva, por rotação de culturas, plantas de cobertura e ajuste de espaçamento e densidade de semeadura. O controle biológico emprega inimigos naturais e microrganismos, com uso restrito a situações específicas. Já o controle químico oferece amplo espectro e rapidez, o que explica sua posição central nos sistemas atuais (MACLAREN et al., 2020).

O problema não é o herbicida em si, e sim a repetição. Quando o mesmo mecanismo de ação é aplicado sucessivamente sobre populações numerosas e geneticamente variáveis, a seleção de sobreviventes torna-se praticamente inevitável. Paralelamente, resíduos dessas moléculas são encontrados em solo, água e organismos não alvo: Ruuskanen et al. (2023) reuniram evidências de que agrotóxicos alteram comunidades microbianas do solo e associadas a plantas e animais, com possíveis consequências para a ciclagem de nutrientes e para interações tróficas. O desafio prático é duplo, portanto, e consiste em reduzir a interferência das daninhas sem eliminar funções ecológicas do sistema e sem acelerar a seleção de resistência.

2.3 Resistência de plantas daninhas aos herbicidas

Resistência é a capacidade herdável de uma população sobreviver a uma dose de herbicida que seria letal para a população original. Não deve ser confundida com tolerância, que é uma característica natural da espécie, presente antes de qualquer exposição ao produto. Na resistência, o agrotóxico não cria a mutação: ele apenas favorece indivíduos que já apresentavam alguma variante genética capaz de permitir a sobrevivência. Cada aplicação elimina os suscetíveis e aumenta a frequência dos resistentes na geração seguinte (GAINES et al., 2020).

Os mecanismos envolvidos costumam ser agrupados em duas categorias. Na resistência relacionada ao sítio de ação (*target-site resistance*, TSR), ocorre alteração na própria proteína-alvo. Mutações pontuais no gene da ALS e da ACCase estão entre os casos mais documentados, assim como a deleção do códon Gly-210 no gene *PPO2* de *Amaranthus palmeri*. A superexpressão do alvo produz o mesmo efeito prático por outra via: há mais enzima do que o defensivo agrícola consegue inibir na dose de campo, situação descrita para cópias do gene *ALS* em espécies de *Echinochloa* e para a amplificação do gene *EPSPS* associada à resistência ao glifosato (TORRA; ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, 2022).

Na resistência não relacionada ao sítio de ação (*non-target-site resistance*, NTSR), a proteína-alvo permanece sensível, mas a quantidade de herbicida que chega até ela é insuficiente. Isso ocorre por redução da absorção foliar, por translocação limitada, por compartimentalização do produto em vacúolos e, sobretudo, pelo aumento da metabolização. Enzimas das famílias citocromo P450 e glutatona-S-transferase degradam ou conjugam o produto antes que ele atue. Esse é o mecanismo mais preocupante, porque é generalista: ao contrário da TSR, que é específica para um mecanismo de ação, a metabolização aumentada pode conferir resistência cruzada a moléculas quimicamente distintas, inclusive a produtos nunca usados na área (GAINES et al., 2020; TORRA; ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, 2022).

O acúmulo desses mecanismos em uma mesma população caracteriza a resistência múltipla. Espécies como *Lolium rigidum*, *Amaranthus palmeri* e *Conyza sumatrensis* estão entre as de maior número de mecanismos de ação envolvidos (PANOZZO et al., 2025). No Brasil, a resistência ao glifosato em *Digitaria insularis* ilustra a consequência prática: controle mais caro, uso de misturas e aplicações sequenciais e, em alguns casos, redução das opções a produtos mais antigos e menos seletivos (CINTRA et al., 2025). Como a reposição de ferramentas não acompanha a velocidade da seleção, a pressão sobre os mecanismos ainda eficazes aumenta.

2.4 RNA interferência e mecanismo de silenciamento gênico

A interferência por RNA é um mecanismo natural de regulação e defesa presente em eucariotos, descrito de forma experimental por Fire et al. (1998) em *Caenorhabditis elegans*. Trata-se de um silenciamento gênico pós-transcricional: o gene continua sendo transcrito, mas o RNA mensageiro correspondente é degradado ou tem sua tradução bloqueada antes de gerar proteína.

O processo começa com a presença de RNA dupla fita (dsRNA) no citoplasma. Esse dsRNA é reconhecido e cortado por ribonucleases do tipo Dicer, chamadas DCL em plantas, originando pequenos RNAs de interferência (siRNA) com cerca de 21 a 24 nucleotídeos. Uma das fitas do siRNA é incorporada ao complexo RISC (*RNA-induced silencing complex*), cujo componente central é a proteína Argonauta. Guiado por essa fita, o complexo percorre o citoplasma e localiza moléculas de mRNA com sequência complementar, promovendo sua clivagem ou impedindo sua tradução. O efeito final é a redução da expressão do gene-alvo (ZABALA-PARDO et al., 2022; CINTRA et al., 2025).

Dois pontos interessam diretamente ao manejo de plantas daninhas: o reconhecimento depende de complementaridade de sequência, o que permite selecionar regiões específicas de uma espécie; e o dsRNA pode ser fornecido de fora da planta, sem transformação genética, desde que chegue íntegro ao citoplasma das células-alvo.

2.5 Aplicações do RNAi no manejo de plantas daninhas

A aplicação tópica de dsRNA sobre a folha, conhecida como silenciamento gênico induzido por pulverização (*spray-induced gene silencing*, SIGS), é a via mais estudada para uso agrícola. A proposta é operacionalmente semelhante à de um herbicida: pulverizar a área e obter controle seletivo, porém com um mecanismo baseado em sequência e sem produzir plantas geneticamente modificadas (ZABALA-PARDO et al., 2022).

Os genes candidatos a alvo se enquadram em três grupos. O primeiro reúne genes que já são alvo dos agrotóxicos, como *EPSPS* e *ALS*. O segundo inclui genes essenciais ao crescimento e ao desenvolvimento, cuja redução de expressão gera fenótipos letais ou fortemente debilitantes. O terceiro envolve genes ligados à própria resistência: silenciar cópias superexpressas do alvo ou enzimas de detoxificação poderia, em tese, devolver sensibilidade a insumos que deixaram de funcionar. Essa possibilidade é uma das mais citadas na literatura, embora ainda careça de demonstrações robustas em condições de campo (ZABALA-PARDO et al., 2022; PANOZZO et al., 2025).

Resultados experimentais já existem. Mai et al. (2021) selecionaram genes de proteínas ligantes de clorofila a/b em *Mikania micrantha* e pulverizaram três tipos de moléculas de RNA sobre as folhas; as plantas tratadas amareleciam e murchavam, com redução significativa da expressão dos alvos. Ou et al. (2024) aplicaram dsRNA contra o

gene *MmMP*, ligado ao desenvolvimento radicular, na mesma espécie, obtendo redução de 48,5% no número de raízes adventícias e de 30,4% na altura das plantas, sem afetar arroz e tomate usados como não alvo. Em *Digitaria insularis*, Cintra et al. (2025) aplicaram dsRNA desenhado para o gene *EPSPS* e registraram queda de 44% na massa seca da parte aérea e de 75% no número de perfilhos, com supressão parcial dos transcritos confirmada por qRT-PCR.

2.6 Desafios e perspectivas das tecnologias baseadas em RNA

O obstáculo mais citado é a entrega. Para ativar a maquinaria de silenciamento, o RNA aplicado precisa atravessar a cutícula, escapar da degradação por nucleases e ultrapassar a parede celular e a membrana plasmática. Bennett et al. (2020) demonstraram que coformulantes e métodos de aplicação conseguem contornar parcialmente essas barreiras, mas observaram silenciamento sistêmico de gene endógeno apenas em situações particulares, o que limita as aplicações voltadas ao controle de plantas daninhas.

Carreadores têm sido testados para melhorar a estabilidade e penetração. Nanopartículas de argila do tipo hidróxido duplo lamelar, com cerca de 40 nm, foram internalizadas por células foliares intactas e entregaram siRNA capaz de reduzir a expressão do gene-alvo (YONG et al., 2022). Rank e Koch (2021) apontam a durabilidade do RNA frente à radiação ultravioleta e à chuva como ponto crítico da transição do laboratório para o campo.

Outros limitantes são igualmente relevantes. A proximidade genética entre daninhas e culturas dificulta encontrar regiões realmente exclusivas da espécie-alvo, o que mantém o risco de efeitos fora do alvo; faltam genomas e transcriptomas anotados para muitas espécies daninhas; o custo de produção de síntese em larga escala é enorme e o enquadramento regulatório de produtos à base de RNA segue em construção (ZABALA-PARDO et al., 2022; RANK; KOCH, 2021). Há também a questão da durabilidade: em insetos, Khajuria et al. (2018) selecionaram uma população de *Diabrotica virgifera virgifera* resistente a dsRNA, com herança recessiva e resistência cruzada a outras sequências, o que mostra que tecnologias baseadas em RNA também estão sujeitas à seleção.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho se trata de uma revisão literária sem intervenção experimental ou coleta de dados primários. Toda a pesquisa foi realizada em inglês, considerando fontes como ScienceDirect, PubMed/PMC, Springer, Wiley, MDPI, Frontiers e SciELO, além do banco de dados internacional de plantas daninhas resistentes (weedscience.org). Foram selecionadas publicações dos últimos 10 anos (2016–2026), sendo referências anteriores mantidas para fim de sustentar conceitos fundamentais, como a descrição original do mecanismo de RNAi.

Foram utilizados os termos, isolados e combinados: "weed", "weed management", "herbicide resistance", "target-site resistance", "non-target-site resistance", "RNA interference", "RNAi", "dsRNA", "gene silencing", "spray-induced gene silencing", "RNA-based herbicides" e "sustainable weed control".

A seleção considerou quatro critérios: relação direta com resistência a herbicidas ou RNAi aplicado a plantas; atualidade; disponibilidade do texto completo ou do resumo detalhado; e relevância científica, avaliada pela natureza do estudo. Materiais sem revisão por pares foram descartados. Por não envolver protocolo com critérios de elegibilidade

pré-registrados, triagem por pares e avaliação de risco de viés, a revisão não é caracterizada como sistemática.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A leitura conjunta dos trabalhos revela que a documentação sobre a evolução da resistência é extensa e quantitativamente robusta, ao passo que a literatura sobre RNAi aplicado a plantas daninhas ainda é formada por poucos estudos, quase todos em ambiente controlado. Sobre a resistência, há convergência entre as fontes. Gaines et al. (2020) e Torra e Alcántara-de la Cruz (2022) descrevem os mesmos grupos de mecanismos e atribuem à metabolização aumentada o maior potencial de dano, por seu caráter generalista e pela dificuldade de previsão. A diferença entre os textos é de ênfase: o primeiro percorre de forma ampla as classes de herbicidas, enquanto o segundo destaca que mecanismos de natureza poligênica continuam mal caracterizados, mesmo sendo os mais frequentes em campo. Os dados de Heap (2026) dão a dimensão do processo, com 548 casos únicos registrados, e Panozzo et al. (2025) mostram que esses casos se concentram em poucas espécies, o que torna razoável priorizar alvos específicos em vez de buscar soluções universais.

Quanto ao RNAi, a divergência entre os estudos é maior e merece atenção. Os trabalhos que relatam efeitos fenotípicos relevantes obtiveram silenciamento apenas parcial e, em geral, transitório. Ou et al. (2024) observaram queda de 43,3% na expressão do alvo no primeiro dia após o tratamento, com retorno aos níveis normais por volta do sétimo dia. Cintra et al. (2025) também descrevem supressão parcial dos transcritos de *EPSPS*. Já Bennett et al. (2020), analisando especificamente as barreiras de absorção, concluem que o silenciamento sistêmico de genes endógenos ainda não foi obtido de forma consistente. Não se trata exatamente de contradição: os estudos de efeito fenotípico usam aplicações repetidas, concentrações altas e plantas jovens em ambiente controlado, condições distintas das que seriam encontradas em campo.

As tecnologias de entrega concentram o maior esforço recente. Yong et al. (2022) e Rank e Koch (2021) apontam na mesma direção ao destacar nanocarreadores como caminho para proteger o RNA e aumentar a internalização celular, mas esses resultados vieram sobretudo de espécies-modelo e, muitas vezes, de infiltração, e não de pulverização. A Tabela 1 resume os principais estudos analisados.

Tabela 1 – Estudos recentes sobre aplicação exógena de RNA em plantas e organismos relacionados ao manejo agrícola

Autor/ano	Espécie ou sistema	Alvo/estratégia	Principal resultado	Limitação
Mai et al. (2021)	<i>Mikania micrantha</i>	Genes de proteínas ligantes de clorofila a/b; dsRNA, nanomicroesfera e shRNA, pulverizados	A redução de expressão dos alvos mediada pelo shRNA mais eficiente coincidiu com o surgimento e murchamento das folhas	Ensaio em folhas conduzido sob condições controladas, necessita validação em campo
Ou et al. (2024)	<i>Mikania micrantha</i>	Gene <i>MmMP</i> (fator de resposta à auxina); dsRNA aplicado às raízes	Redução de 43,3% na expressão do alvo no 1º dia; redução de 48,5% no número de raízes adventícias e de 30,4% na altura das plantas.	Silenciamento transitório, com retorno aos níveis por volta do 7º dia

			Sem efeito em arroz e tomate	
Cintra et al. (2025)	<i>Digitaria insularis</i>	Gene dsRNA em aplicação foliar	Supressão dos transcritos (qRT-PCR) reduziu em 44% na massa seca da parte aérea e 75% nos perfilhos	Silenciamento gênico foi alcançado de forma parcial com bioensaio conduzido em ambiente controlado
Bennett et al. (2020)	<i>N. benthamiana</i> , <i>A. thaliana</i> , <i>Amaranthus cruentus</i>	dsRNA foliar com coformulantes e abrasão	Barreiras impostas pela cutícula, parede celular e atividade de nucleases parcialmente superadas, porém silenciamento permaneceu restrito ao nível local	Não foi obtido o silenciamento sistêmico do gene endógeno avaliado
Yong et al. (2022)	<i>Nicotiana benthamiana</i>	siRNA entregue por nanopartículas de argila (LDH, ~40 nm)	Nanopartículas foram internalizadas por células foliares intactas, resultando em silenciamento do alvo	Metodologia restrita à espécie-modelo via infiltração foliar, não foi avaliada em plantas daninhas ou por meio de pulverização
Khajuria et al. (2018)	<i>Diabrotica virgifera virgifera</i> (inseto)	dsRNA DvSnf7 (seleção em laboratório e campo)	Estabeleceu-se uma população resistente caracterizada por herança monogênica e recessiva, a qual manifestou resistência cruzada a outros dsRNAs	Dados obtidos de organismo não vegetal, impossibilitando a extrapolação direta dos mecanismos para o sistema de plantas.

Fonte: Elaborada pelos autores com base na literatura consultada.

O conjunto da Tabela 1 evidencia três lacunas. A primeira é a escassez de espécies daninhas testadas: as demonstrações mais completas envolvem *Mikania micrantha* e *Digitaria insularis*, enquanto espécies com maior número de mecanismos de resistência, como *Lolium rigidum* e *Amaranthus palmeri*, aparecem como candidatas prioritárias em revisões, mas com poucos dados experimentais publicados (PANOZZO et al., 2025). A segunda é a ausência de ensaios a campo, onde radiação, chuva e variação de estágio fenológico atuam sobre a estabilidade do RNA. A terceira é a distância entre o silenciamento parcial obtido e o nível de controle exigido de um produto comercial.

Um ponto favorável aparece de forma consistente: a avaliação de especificidade. Ou et al. (2024) verificaram que o dsRNA desenhado para *Mikania micrantha* não alterou a expressão dos genes ortólogos em arroz e tomate nem o crescimento dessas espécies, o que é coerente com a baixa identidade de sequência na região-alvo. O resultado sustenta a expectativa de maior seletividade, mas foram testadas apenas duas espécies não alvo, em ambiente controlado, o que está longe de um estudo de biossegurança completo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controle de plantas daninhas permanece desafiador porque exige equilibrar dois objetivos que nem sempre caminham juntos: manter a produtividade da cultura e reduzir, ao mesmo tempo, a pressão de seleção sobre as populações de daninhas e os impactos sobre o ambiente. A revisão mostrou que a dependência de poucos mecanismos de ação levou a um cenário em que mecanismos de resistência relacionados e não relacionados ao sítio de ação se acumulam nas mesmas populações, reduzindo progressivamente as opções químicas disponíveis.

A interferência por RNA apresenta potencial por depender de complementaridade de sequência, permite selecionar regiões gênicas da espécie-alvo, incluindo genes ligados à sobrevivência, ao desenvolvimento e à própria resistência, e os estudos analisados confirmam que a aplicação exógena de dsRNA reduz a expressão de genes endógenos em daninhas e provoca efeitos fenotípicos mensuráveis. Esses resultados, porém, ainda são parciais. A entrega eficiente do RNA aos tecidos, a estabilidade da molécula no ambiente, o custo de produção, a avaliação de efeitos fora do alvo, as exigências regulatórias e a falta de validação em condições reais de cultivo impedem tratar o RNAi como substituto imediato dos herbicidas convencionais. A seleção de resistência a dsRNA já observada em insetos indica ainda que a tecnologia não está livre do mesmo problema evolutivo que hoje limita o controle químico.

O caminho mais consistente é o manejo integrado. Novas ferramentas biotecnológicas tendem a ser mais úteis quando combinadas de forma racional com práticas culturais, mecânicas, biológicas e químicas, distribuindo a pressão de seleção em vez de concentrá-la. Sob essa lógica, o RNAi deve ser avaliado como mais um componente do sistema, e não como substituição de uma única ferramenta por outra.

REFERÊNCIAS

BENNETT, M.; DEIKMAN, J.; HENDRIX, B.; IANDOLINO, A. Barriers to efficient foliar uptake of dsRNA and molecular barriers to dsRNA activity in plant cells. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, art. 816, 2020. DOI: 10.3389/fpls.2020.00816.

CINTRA, L. A.; DA ROSA, J.; DE ASSIS, R.; MARIN, S. R. R.; ADEGAS, F. S.; RECH, E. L.; NEPOMUCENO, A. L.; MERTZ-HENNING, L. M. RNAi spray-induced gene silencing of EPSPS by topical application of dsRNA in the weed *Digitaria insularis*. *Frontiers in Plant Science*, v. 16, art. 1688755, 2025. DOI: 10.3389/fpls.2025.1688755.

FIRE, A.; XU, S.; MONTGOMERY, M. K.; KOSTAS, S. A.; DRIVER, S. E.; MELLO, C. C. Potent and specific genetic interference by double-stranded RNA in *Caenorhabditis elegans*. *Nature*, v. 391, p. 806-811, 1998. DOI: 10.1038/35888.

GAINES, T. A.; DUKE, S. O.; MORRAN, S.; RIGON, C. A. G.; TRANEL, P. J.; KÜPPER, A.; DAYAN, F. E. Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*, v. 295, n. 30, p. 10307-10330, 2020. DOI: 10.1074/jbc.REV120.013572.

GALBÁCS, Z. N.; AGYEMANG, E. D.; PÁSZTOR, G.; TAKÁCS, A. P.; VÁRALLYAY, É. Viromes of monocotyledonous weeds growing in crop fields reveal infection by several viruses suggesting their virus reservoir role. *Plants*, v. 13, n. 18, art. 2664, 2024. DOI: 10.3390/plants13182664.

HEAP, I. *The international herbicide-resistant weed database*. Disponível em: www.weedscience.org.

HORVATH, D. P.; CLAY, S. A.; SWANTON, C. J.; ANDERSON, J. V.; CHAO, W. S. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. *Trends in Plant Science*, v. 28, n. 5, p. 567-582, 2023. DOI: 10.1016/j.tplants.2022.12.014.

KHAJURIA, C.; IVASHUTA, S.; WIGGINS, E.; FLAGEL, L.; MOAR, W.; PLEAU, M.; MILLER, K.; ZHANG, Y.; RAMASESHADRI, P.; JIANG, C.; HODGE, T.; JENSEN, P.; CHEN, M.; GOWDA, A.; MCNULTY, B.; VAZQUEZ, C.; BOLOGNESI, R.; HAAS, J.; HEAD, G.; CLARK, T. Development and characterization of the first dsRNA-resistant

insect population from western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte. *PLoS ONE*, v. 13, n. 5, e0197059, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0197059.

MACLAREN, C.; STORKEY, J.; MENEGAT, A.; METCALFE, H.; DEHNEN-SCHMUTZ, K. An ecological future for weed science to sustain crop production and the environment. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 40, art. 24, 2020. DOI: 10.1007/s13593-020-00631-6.

MAI, J.; LIAO, L.; LING, R.; GUO, X.; LIN, J.; MO, B.; CHEN, W.; YU, Y. Study on RNAi-based herbicide for *Mikania micrantha*. *Synthetic and Systems Biotechnology*, v. 6, n. 4, p. 437-445, 2021. DOI: 10.1016/j.synbio.2021.11.005.

OU, Z.; ZHANG, Y.; WU, Q.; WANG, K.; ZHANG, G.; QIAO, X.; YAN, Y.; QIAN, W.; WAN, F.; LIU, B. Silencing of the MP gene via dsRNA affects root development and growth in the invasive weed *Mikania micrantha*. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 23, art. 12678, 2024. DOI: 10.3390/ijms252312678.

PANOZZO, S.; MILANI, A.; BORDIGNON, S.; SCARABEL, L.; VAROTTO, S. RNAi technology development for weed control: all smoke and no fire? *Pest Management Science*, v. 81, n. 7, p. 3430-3436, 2025. DOI: 10.1002/ps.8729.

RANK, A. P.; KOCH, A. Lab-to-field transition of RNA spray applications – how far are we? *Frontiers in Plant Science*, v. 12, art. 755203, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.755203.

RUUSKANEN, S.; FUCHS, B.; NISSINEN, R.; PUIGBÒ, P.; RAINIO, M.; SAIKKONEN, K.; HELANDER, M. Ecosystem consequences of herbicides: the role of microbiome. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 38, n. 1, p. 35-43, 2023. DOI: 10.1016/j.tree.2022.09.009.

TORRA, J.; ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, R. Molecular mechanisms of herbicide resistance in weeds. *Genes*, v. 13, n. 11, art. 2025, 2022. DOI: 10.3390/genes13112025.

YONG, J.; WU, M.; ZHANG, R.; BI, S.; MANN, C. W. G.; MITTER, N.; CARROLL, B. J.; XU, Z. P. Clay nanoparticles efficiently deliver small interfering RNA to intact plant leaf cells. *Plant Physiology*, v. 190, n. 4, p. 2187-2202, 2022. DOI: 10.1093/plphys/kiac430.

ZABALA-PARDO, D.; GAINES, T.; LAMEGO, F. P.; AVILA, L. A. RNAi as a tool for weed management: challenges and opportunities. *Advances in Weed Science*, v. 40, n. spe1, e020220096, 2022. DOI: 10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five006.