

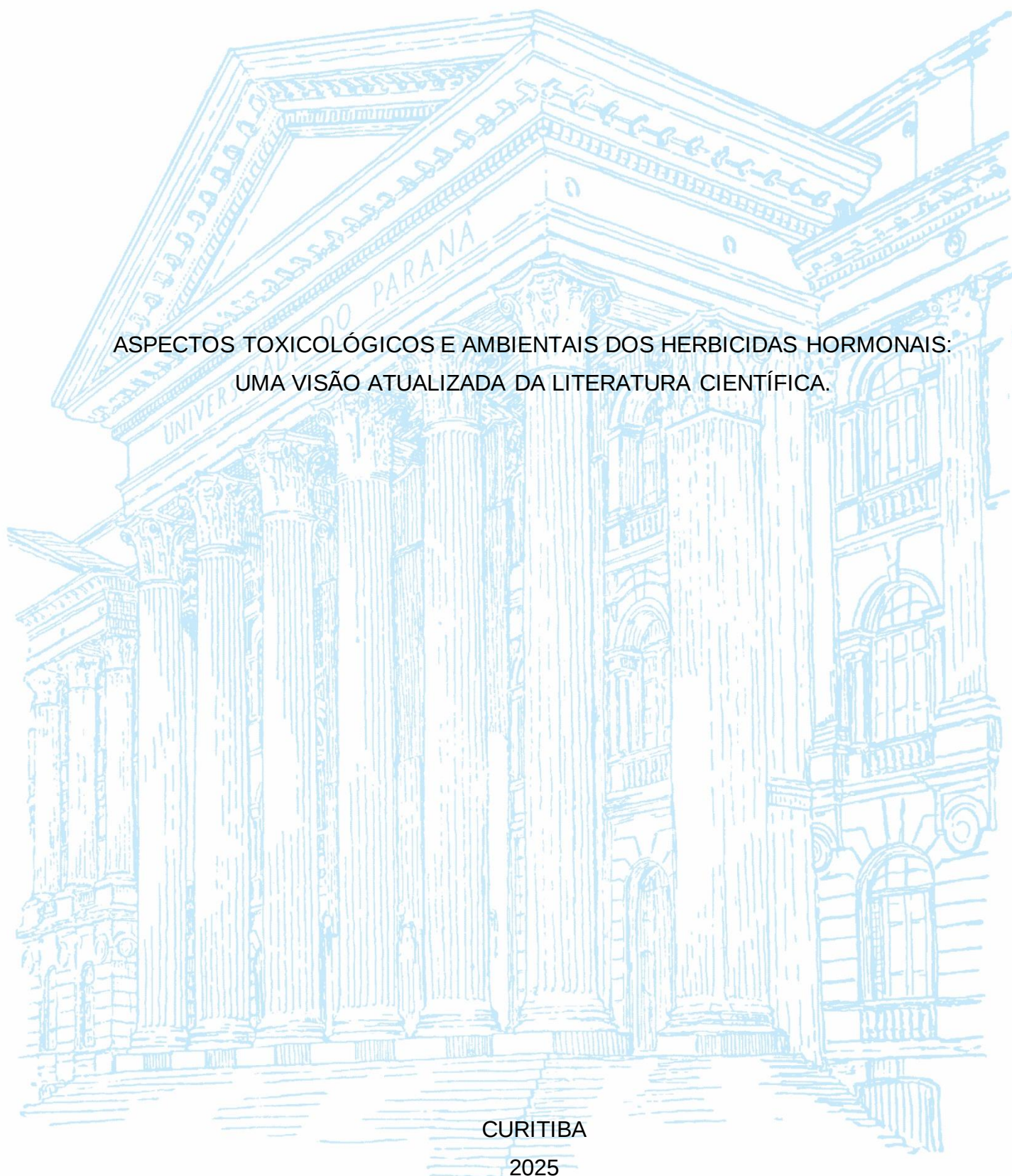
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL PRETTO

ASPECTOS TOXICOLÓGICOS E AMBIENTAIS DOS HERBICIDAS HORMONAIS:
UMA VISÃO ATUALIZADA DA LITERATURA CIENTÍFICA.

CURITIBA

2025



RAFAEL PRETTO

ASPECTOS TOXICOLÓGICOS E AMBIENTAIS DOS HERBICIDAS HORMONAIS:
UMA VISÃO ATUALIZADA DA LITERATURA CIENTÍFICA.

Trabalho de Conclusão apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Fitossanidade, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Fitossanidade.

Orientador: Prof. Me. Adenilson de Souza da Silva

CURITIBA

2025

Dedico este trabalho aos meus pais Moacir e Sueli, ao meu irmão Diego e a minha namorada Emilly pela força e incentivo de continuar sempre estudando, também pelo amor, carinho, orações, compreensão e apoio incondicional que me prestaram durante toda esta jornada. Também dedico ao meu professor orientador Adenilson pelo apoio e repasse do conhecimento e aos meus colegas e amigos do curso que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho. A vocês todos, minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer ao grandíssimo Deus que sempre me abençoou, dando-me força e saúde para continuar sempre na busca dos meus objetivos e nunca desistir.

Aos meus amados pais que sempre me incentivaram ao estudo, obrigado pelo amor, educação, carinho, conselhos e ensinamentos que me foram dados e pelo esforço sem medidas que dispuseram para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Obrigado a minha família pela compreensão, pelos momentos felizes e pelo exemplo dado, o que me fez ser uma pessoa honesta e com preparo para enfrentar os obstáculos do caminho.

Ao meu orientador Me. Adenilson de Souza da Silva, pela confiança, paciência, e empenho na orientação deste trabalho.

Também agradecer a todos os amigos que me deram força sempre desde o início do curso até o final. Aos meus colegas de especialização deixo aqui o meu muito obrigado pela ajuda prestada e que agora fazem parte da minha vida acadêmica.

A UFPR e ao PECCA, que me proporcionaram a estrutura fundamental para a realização deste trabalho e aos demais professores e funcionários por todo o suporte prestado em minha especialização.

“Educação é uma descoberta progressiva de nossa própria ignorância.”

(Voltaire)

RESUMO

Os herbicidas hormonais, também conhecidos como mimetizadores de auxinas, são amplamente utilizados na agricultura para o controle de plantas daninhas dicotiledôneas, mas seu uso intensivo tem gerado preocupações quanto aos impactos na saúde humana e no meio ambiente. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre os aspectos toxicológicos e ambientais dos herbicidas hormonais, com foco em publicações científicas recentes. A metodologia empregada consistiu em uma revisão bibliográfica narrativa, utilizando bases de dados científicas renomadas e priorizando publicações dos últimos cinco anos. A pesquisa analisa os principais grupos químicos desses herbicidas e seus mecanismos de ação, evidenciando como interferem nos processos fisiológicos das plantas. São investigados os efeitos toxicológicos em organismos não-alvo, incluindo mamíferos, aves, peixes, anfíbios e invertebrados, bem como os riscos à saúde humana, com destaque para associações com câncer, desregulação endócrina e problemas reprodutivos e neurológicos. O estudo também aborda os impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água, a deriva e volatilização durante a aplicação, e o problema crescente da resistência de plantas daninhas. São avaliadas medidas de mitigação e boas práticas agrícolas para o uso mais seguro e sustentável desses defensivos. Os resultados indicam que, embora os herbicidas hormonais tenham papel importante na agricultura moderna, seu uso indiscriminado acarreta sérios riscos, exigindo uma abordagem cuidadosa e a busca por alternativas mais seguras e sustentáveis para o manejo de plantas daninhas.

Palavras-chave: Herbicidas auxínicos, toxicidade ambiental, saúde humana, resistência de plantas daninhas, manejo integrado.

ABSTRACT

Hormonal herbicides, also known as auxin mimics, are widely used in agriculture for the control of dicotyledonous weeds, but their intensive use has raised concerns regarding human health and environmental impacts. This study aims to present a literature review on the toxicological and environmental aspects of hormonal herbicides, focusing on recent scientific publications. The methodology employed consisted of a narrative literature review, using reputable scientific databases and prioritizing publications from the last five years. The research analyzes the main chemical groups of these herbicides and their modes of action, highlighting how they interfere with plant physiological processes. The toxicological effects on non-target organisms, including mammals, birds, fish, amphibians, and invertebrates, are investigated, as well as the risks to human health, with emphasis on associations with cancer, endocrine disruption, and reproductive and neurological problems. The study also addresses environmental impacts, such as soil and water contamination, drift and volatilization during application, and the growing problem of weed resistance. Mitigation measures and best agricultural practices for the safer and more sustainable use of these pesticides are evaluated. The results indicate that, although hormonal herbicides play an important role in modern agriculture, their indiscriminate use entails serious risks, requiring careful management and the search for safer and more sustainable alternatives for weed control.

Keywords: Auxinic herbicides, environmental toxicity, human health, weed resistance, integrated management.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 JUSTIFICATIVA	9
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.2.1 Objetivo geral.....	10
1.2.2 Objetivos específicos	11
2 METODOLOGIA.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Herbicidas Hormonais: Definição, Classificação E Mecanismos De Ação	13
3.2 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS DOS HERBICIDAS HORMONAIS	15
3.2.1 Toxicidade para organismos não-alvo	15
3.2.2 Toxicidade para a saúde humana	16
3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS HERBICIDAS HORMONAIS	18
3.3.1 Contaminação do solo	18
3.3.2 Contaminação da água	20
3.3.3 Deriva e volatilização	20
3.3.4 Bioacumulação e biomagnificação	21
3.4 RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS HORMONAIS	22
3.5 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO E BOAS PRÁTICAS AGRÍCOLAS	24
4 DISCUSSÃO	26
5 CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

Os herbicidas hormonais, também conhecidos como reguladores de crescimento de plantas ou mimetizadores de auxinas, representam uma classe de defensivos agrícolas amplamente utilizada globalmente para o controle de plantas daninhas em diversas culturas. Sua eficácia reside na capacidade de interferir em processos fisiológicos vitais das plantas, mimetizando ou antagonizando a ação de hormônios vegetais naturais, principalmente as auxinas, o que leva à morte de espécies suscetíveis (Queiroz et al., 2020).

O emprego intensivo dessas substâncias na agricultura moderna, embora contribua para o aumento da produtividade agrícola ao reduzir a competição por recursos entre as culturas e as plantas invasoras, seu uso intensivo tem gerado crescentes preocupações quanto aos seus potenciais impactos sobre o meio ambiente e a saúde humana e animal, conforme aponta o Atlas dos Agrotóxicos 2024.

O Brasil se destaca como um dos maiores consumidores e importadores de agrotóxicos em escala mundial, permitindo limites de resíduos em água e alimentos consideravelmente superiores aos adotados em outras regiões, como a União Europeia (Fundação Heinrich Böll, 2024). Por exemplo, enquanto a legislação europeia estabelece um limite máximo de 0,1 µg/L de pesticidas por substância na água potável, no Brasil a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) permite concentrações que podem superar em até 5.000 vezes esse valor, dependendo do princípio ativo. Além disso, para determinados alimentos, como a soja, o limite de resíduos de glifosato autorizado no Brasil chega a 10 mg/kg, ao passo que na União Europeia o máximo permitido é de 0,05 mg/kg. Este cenário evidencia a relevância de se aprofundar o conhecimento sobre as consequências do uso disseminado de herbicidas hormonais (Freitas & Regino, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

O uso intensivo de herbicidas hormonais nos programas de manejo para controle de plantas daninhas é eficaz, mas gera crescente preocupação ambiental e de saúde devido a potenciais efeitos toxicológicos, como bioacumulação, efeitos subletais e contaminação da água, além do risco de indução de resistência em plantas

daninhas, o que frequentemente leva à necessidade de aplicação de doses progressivamente maiores.

A literatura científica tem documentado diversos efeitos adversos associados a esses compostos, tanto para organismos não-alvo quanto para a saúde humana, além de impactos ambientais significativos como a contaminação de solos e corpos hídricos (Fundação Heinrich Böll, 2024). Globalmente, estima-se que 385 milhões de pessoas sofram intoxicações agudas não intencionais por agrotóxicos a cada ano, com cerca de 11 mil mortes (Boedeker et al., 2020). Embora o dado não seja específico por classe, estudos clínicos destacam a toxicidade dos herbicidas auxínicos, como 2,4-D, MCPA e dicamba, associados a casos graves de intoxicação, especialmente em situações de autointoxicação. Nesse cenário, torna-se essencial revisar criticamente a literatura científica sobre os impactos toxicológicos e ambientais dos herbicidas hormonais. Tal estudo visa subsidiar o desenvolvimento e a adoção de práticas agrícolas mais seguras e sustentáveis, contribuindo para o debate científico e social sobre o uso racional desses produtos e suas implicações para o equilíbrio ambiental e a saúde pública. O problema de pesquisa que norteia este trabalho é: Quais são os principais aspectos toxicológicos e ambientais atualizados na literatura científica associados ao uso de herbicidas hormonais e quais as implicações para a sustentabilidade agrícola e a saúde?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os principais aspectos toxicológicos e ambientais associados ao uso de herbicidas hormonais, com foco nos impactos sobre organismos não alvo, contaminação ambiental e riscos à saúde humana, utilizando informações científicas atualizadas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar os principais tipos de herbicidas hormonais utilizados na agricultura e seus mecanismos de ação, com base na literatura recente.
- Investigar os efeitos toxicológicos desses compostos em organismos não alvo, incluindo animais, microrganismos e seres humanos, conforme documentado em estudos atuais.
- A análise dos impactos ambientais dos herbicidas hormonais deve considerar a contaminação do solo e da água, por processos como lixiviação, escoamento e deposição atmosférica, além da deriva de aplicação, que transporta o produto para áreas não alvo, ampliando o risco de poluição ambiental.
- Levantar dados sobre casos documentados de resistência de plantas daninhas aos herbicidas hormonais, com ênfase em publicações atuais.
- Avaliar medidas de mitigação e boas práticas agrícolas relacionadas ao uso seguro e sustentável desses produtos, com base nas evidências científicas mais recentes.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica, com o objetivo de reunir, analisar e discutir as principais informações científicas disponíveis na literatura sobre os aspectos toxicológicos e ambientais dos herbicidas hormonais. A pesquisa será realizada a partir da seleção de artigos científicos, livros, dissertações, teses e documentos técnicos, publicados preferencialmente nos últimos cinco anos, para garantir a atualidade das informações. Serão consultadas bases de dados renomadas como SciELO, ScienceDirect, Scopus, PubMed, Google Scholar e Periódicos CAPES. Os critérios de inclusão abrangerão estudos que abordem diretamente os herbicidas hormonais, seus efeitos toxicológicos em diferentes organismos (incluindo humanos), seus impactos nos compartimentos ambientais (solo, água, ar), casos de resistência de plantas daninhas e estratégias de mitigação. Serão excluídos estudos que não foquem em herbicidas hormonais ou que não apresentem dados científicos robustos, entendidos como aqueles com rigor

metodológico, amostras representativas, controle de variáveis, métodos padronizados, análise estatística adequada e publicação em periódicos revisados por pares. Para a estratégia de busca, serão definidas palavras-chave específicas relacionadas a herbicidas hormonais, toxicidade e impactos ambientais, combinadas com operadores booleanos (AND, OR, NOT) para refinar os resultados. A busca incluirá publicações em português e inglês, aplicando filtros de data para selecionar estudos recentes, preferencialmente dos últimos cinco anos. A análise dos dados será realizada de forma qualitativa e crítica, buscando evidenciar tendências, lacunas no conhecimento e possíveis implicações práticas para o manejo agrícola e a saúde pública, sempre referenciando as fontes de forma adequada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Herbicidas Hormonais: Definição, Classificação E Mecanismos De Ação

Os herbicidas hormonais, também designados como mimetizadores de auxinas sintéticas ou reguladores de crescimento de plantas, constituem uma classe de compostos químicos desenvolvidos para controlar seletivamente plantas daninhas dicotiledôneas em diversas culturas, bem como em pastagens e áreas não cultivadas. Sua ação se baseia na interferência com os processos de crescimento e desenvolvimento das plantas, mimetizando ou modulando a atividade das auxinas, um grupo de hormônios vegetais endógenos cruciais para inúmeras funções fisiológicas, como alongamento celular, diferenciação de tecidos, dominância apical e desenvolvimento de raízes (Grossmann, 2010; Peterson et al., 2016). A aplicação exógena desses compostos em doses supraótimas desencadeia uma série de respostas anormais nas plantas suscetíveis, culminando em um crescimento descontrolado e, subsequentemente, na morte da planta (Song, 2014).

O histórico do desenvolvimento dos herbicidas hormonais remonta à década de 1940, com a descoberta e introdução do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), um dos primeiros herbicidas orgânicos seletivos e sistêmicos a serem comercializados em larga escala. Desde então, diversos outros compostos com atividade hormonal foram sintetizados e introduzidos no mercado, ampliando o espectro de controle e as opções de manejo (Cobb & Reade, 2010).

Os herbicidas hormonais são classificados em diferentes grupos químicos, com base em sua estrutura molecular. Os principais grupos incluem os ácidos fenoxiacéticos (como o 2,4-D e o MCPA), os ácidos benzóicos (como o dicamba), os ácidos piridinocarboxílicos (como o picloram, clopiralida e fluroxipir) e, mais recentemente, os ácidos quinolinocarboxílicos (como a quinclorac) e os ácidos ariloxifenoxipropiônicos (embora este último grupo tenha um mecanismo de ação distinto, alguns compostos podem apresentar efeitos hormonais secundários). O documento da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (ADAPAR) sobre o produto comercial contendo 2,4-D e Picloram, por exemplo, classifica o Picloram como pertencente ao grupo químico do ácido piridinocarboxílico e o 2,4-D ao grupo químico

do ácido ariloxialcanóico, ambos atuando como auxinas sintéticas e pertencentes ao Grupo “O” da classificação do Herbicide Resistance Action Committee (HRAC) (ADAPAR, 2024). Essa classificação é fundamental para o manejo da resistência de plantas daninhas, pois orienta a rotação de mecanismos de ação.

O mecanismo de ação primário dos herbicidas hormonais envolve a ligação a proteínas receptoras de auxina nas células vegetais. Essa ligação desencadeia uma cascata de eventos moleculares e fisiológicos. Em plantas suscetíveis, a presença contínua e em altas concentrações desses herbicidas leva a uma desregulação do metabolismo do ácido indolilacético (AIA), a principal auxina natural. Isso resulta em um aumento da produção de etileno, um hormônio vegetal associado a senescência e ao estresse, e na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que causam danos oxidativos às células (Grossmann, 2010; Song, 2014). Consequentemente, observam-se sintomas característicos como epinastia (curvatura de pecíolos e caules), intumescimento de tecidos, paralisação do crescimento de raízes, malformação de folhas e, por fim, necrose e morte da planta.

A seletividade desses herbicidas, ou seja, sua capacidade de controlar plantas daninhas dicotiledôneas sem causar danos significativos a culturas monocotiledôneas (como gramíneas), é atribuída a diferenças na absorção, translocação, metabolização ou sensibilidade do sítio de ação entre as espécies (Peterson et al., 2016). No entanto, sob certas condições, como doses elevadas ou estágios de desenvolvimento específicos, mesmo culturas consideradas tolerantes podem sofrer injúrias.

É crucial ressaltar que o uso contínuo e, por vezes, indiscriminado de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação pode levar à seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes. O documento da ADAPAR (2025) sobre o 2,4-D 806 SL ALAMOS alerta que “O uso sucessivo de herbicidas do mesmo mecanismo de ação para o controle do mesmo alvo pode contribuir para o aumento da população da planta daninha alvo resistente ao herbicida e de outras plantas daninhas não controladas pelo herbicida” (ADAPAR, 2025). Este fenômeno representa um desafio crescente para a agricultura sustentável e reforça a necessidade de um manejo integrado de plantas daninhas, que inclua a rotação de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, o uso de práticas culturais e o monitoramento constante das populações de plantas.

3.2 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS DOS HERBICIDAS HORMONAIS

Além dos efeitos nas plantas, os herbicidas hormonais suscitam preocupações toxicológicas para organismos não-alvo e para a saúde humana. A exposição pode ocorrer por contato dérmico, inalação ou ingestão de água e alimentos contaminados, e seus efeitos podem ser agudos, após exposições curtas e concentradas, ou crônicos, decorrentes de exposições repetidas a baixas doses ao longo do tempo (Souza, 2022).

3.2.1 Toxicidade para organismos não-alvo

Embora seletivos para determinadas plantas, os herbicidas hormonais podem causar efeitos deletérios em diferentes organismos não, afetando a biodiversidade e o equilíbrio dos ecossistemas. Estudos demonstram que herbicidas hormonais, como o 2,4-D, podem afetar negativamente a fauna e a flora, incluindo a redução da biodiversidade e alterações na microbiota do solo (Santos et al., 2022).

Em relação aos animais, estudos têm demonstrado que herbicidas hormonais podem causar uma variedade de efeitos adversos. Em mamíferos, por exemplo, a exposição a compostos como 2,4-D e dicamba, em altas doses ou por períodos prolongados, pode resultar em distúrbios reprodutivos, alterações no desenvolvimento, neurotoxicidade e carcinogenicidade (USEPA, 2023).

Aves expostas a esses herbicidas, seja por contato direto ou pela ingestão de alimentos contaminados, podem apresentar redução na taxa de eclosão de ovos, malformações em embriões e alterações comportamentais. Peixes e anfíbios, particularmente sensíveis à contaminação aquática, podem sofrer com alterações hormonais, problemas de desenvolvimento, imunossupressão e mortalidade quando expostos a concentrações de herbicidas hormonais presentes em corpos d'água que variam de 0,03 mg/L a 3,0 mg/L (Relyea, 2009; Sura et al., 2013). Invertebrados terrestres, como minhocas e artrópodes benéficos (incluindo polinizadores como abelhas), e aquáticos, como microcrustáceos, também são vulneráveis, com estudos indicando efeitos na reprodução, crescimento e sobrevivência (Goulson, 2013; Bøhn et al., 2016).

Os microrganismos do solo e da água, essenciais para a ciclagem de nutrientes, a decomposição da matéria orgânica e a manutenção da saúde dos ecossistemas, podem ser afetados negativamente pela presença de herbicidas hormonais. Estudos demonstram que concentrações de 50 a 100 µg/mL de herbicidas como 2,4-D e dicamba podem reduzir em 20 a 40% a atividade de degradação microbiana, medida pela liberação de CO₂, e comprometer processos-chave como a fixação de nitrogênio (Zabaloy et al., 2016; Rose et al., 2016). Plantas não-alvo, incluindo culturas sensíveis adjacentes às áreas tratadas e a vegetação nativa, podem sofrer danos significativos devido à deriva ou ao escoamento superficial desses herbicidas, resultando em perdas de produtividade e impactos na diversidade florística (Gomes et al., 2020).

3.2.2 Toxicidade para a saúde humana

A exposição humana a herbicidas hormonais representa uma preocupação crescente de saúde pública, especialmente entre comunidades rurais e trabalhadores agrícolas, que estão diretamente expostos durante a manipulação e aplicação desses produtos. O Dossiê Danos dos Agrotóxicos na Saúde Reprodutiva (ABRASCO, 2024) e o Atlas dos Agrotóxicos 2024 (FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL, 2024) apresentam evidências científicas sobre os riscos associados. Segundo o Atlas, “385 milhões de pessoas adoecem todos os anos por envenenamento causados por agrotóxicos” (FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL, 2024, p. 20); embora nem todos os casos envolvam herbicidas hormonais, estima-se que esses representem cerca de 10% a 20% do total de herbicidas aplicados, correspondendo a 7.000 a 14.000 intoxicações anuais em países em desenvolvimento (GOVERNO DO BRASIL, 2023).

As vias de exposição humana a herbicidas hormonais incluem absorção dérmica durante a aplicação, inalação de partículas pulverizadas e ingestão de resíduos presentes em alimentos e na água potável. Os efeitos agudos podem envolver irritação da pele e dos olhos, náuseas, vômitos, dores de cabeça e, em casos graves, distúrbios neurológicos e respiratórios. Entretanto, são os efeitos crônicos, resultantes da exposição prolongada a baixas doses, que despertam maior

preocupação na comunidade científica e médica (USEPA, 2023; Carvalho, 2020; ABRASCO, 2024).

Diversos estudos epidemiológicos e toxicológicos têm associado a exposição a certos herbicidas hormonais a um aumento no risco de desenvolvimento de diferentes tipos de câncer, como linfoma não-Hodgkin e sarcoma de tecidos moles (IARC, 2015; Andreotti et al., 2018). Além disso, há evidências crescentes de que esses compostos podem atuar como desreguladores endócrinos, interferindo no sistema hormonal humano e contribuindo para problemas reprodutivos (infertilidade, abortos espontâneos, malformações congênitas), distúrbios da tireoide, diabetes e obesidade (Abrasco, 2024; Mnif et al., 2011). O Dossiê da Abrasco (2024) foca especificamente nos danos à saúde reprodutiva, reunindo estudos que indicam tais associações. Efeitos neurológicos, como o aumento do risco de doença de Parkinson, e distúrbios do desenvolvimento neurológico em crianças expostas durante a gestação ou na primeira infância, também têm sido investigados (Costello et al., 2009; Rauh et al., 2011).

Grupos populacionais específicos são considerados mais vulneráveis aos efeitos tóxicos dos herbicidas hormonais. Aplicadores de agrotóxicos e trabalhadores rurais, devido à maior frequência e intensidade de exposição, apresentam riscos elevados. Mulheres grávidas e crianças são particularmente suscetíveis, pois a exposição durante períodos críticos do desenvolvimento pode levar a consequências graves e permanentes para a saúde (Abrasco, 2024). Comunidades que residem próximas a áreas de intensa atividade agrícola também podem estar sujeitas a uma exposição ambiental crônica através da contaminação do ar, da água e do solo.

A complexidade em estabelecer relações causais diretas entre a exposição a herbicidas hormonais específicos e o desenvolvimento de doenças em humanos reside, em parte, na multiexposição a diferentes agrotóxicos e outros fatores ambientais e de estilo de vida. No entanto, o peso das evidências científicas acumuladas nas últimas décadas aponta para a necessidade de uma abordagem cautelosa, visando minimizar a exposição humana a esses compostos e promover alternativas mais seguras no manejo de plantas daninhas (Silva et al., 2020).

3.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DOS HERBICIDAS HORMONAIS

O uso extensivo de herbicidas hormonais na agricultura acarreta uma série de impactos ambientais significativos, que se manifestam na contaminação do solo, da água e do ar, além de afetar organismos não-alvo e a biodiversidade de forma mais ampla. A persistência, mobilidade e potencial de deriva desses compostos são fatores cruciais que determinam a extensão e a severidade desses impactos. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” ressalta que:

Os ingredientes ativos dos agrotóxicos geralmente não permanecem no local em que foram aplicados. Eles podem infiltrar-se no solo e na água subterrânea ou ser transportados pelo ar – alguns podem ser encontrados a mais de 1.000 quilômetros de distância (Fundação Heinrich Böll, 2024, p. 8).

3.3.1 Contaminação do solo

O solo é um compartimento ambiental fundamental que pode ser severamente afetado pela aplicação de herbicidas hormonais. Uma vez aplicados, esses compostos podem persistir no solo por períodos variáveis, dependendo de suas propriedades físico-químicas (como solubilidade, volatilidade e coeficiente de adsorção), das características do solo (textura, teor de matéria orgânica, pH, atividade microbiana) e das condições ambientais (temperatura, umidade, radiação solar). A persistência prolongada pode levar ao acúmulo desses herbicidas, com potencial para contaminar culturas subsequentes (efeito *carryover*) e afetar a saúde do solo a longo prazo. Estudos mostram que resíduos de picloram podem permanecer no solo até 360 dias após a aplicação, enquanto outros compostos, como o triclopyr, apresentam persistência mais curta, mas ainda assim capaz de impactar culturas subsequentes (Santos et al., 2006). O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” menciona que “pouca atenção tem sido dada aos agrotóxicos que se acumulam no solo, onde exercem efeitos adversos diretos e indiretos para organismos que vivem lá – às vezes por décadas” (Fundação Heinrich Böll, 2024, p. 22).

A degradação dos herbicidas hormonais no solo ocorre principalmente por processos microbianos, embora a fotólise e a hidrólise química também possam

contribuir. No entanto, a taxa de degradação pode ser lenta para alguns compostos ou pode levar à formação de metabólitos que, por vezes, são tão ou mais tóxicos e persistentes que o composto original. A mobilidade desses herbicidas no perfil do solo é outro aspecto preocupante. Compostos com alta solubilidade em água e baixa adsorção às partículas do solo podem ser facilmente lixiviados para camadas mais profundas, atingindo águas subterrâneas e comprometendo sua qualidade. Por outro lado, herbicidas mais fortemente adsorvidos podem permanecer na camada superficial, aumentando o risco de transporte por escoamento superficial durante eventos de chuva. Estudos demonstram que a adsorção de herbicidas hormonais no solo é influenciada por fatores como pH, teor de matéria orgânica e textura do solo. Por exemplo, Spadotto et al. (2003) observaram que a sorção do herbicida 2,4-D aumenta com o aumento do teor de carbono orgânico do solo, sendo maior em solos ácidos devido à maior presença da forma molecular do herbicida, que é mais facilmente adsorvida.

Os efeitos dos herbicidas hormonais na microbiota e mesofauna do solo são complexos e variados. Microrganismos como bactérias e fungos, essenciais para a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e promoção do crescimento vegetal, podem ter suas populações e atividades alteradas. Alguns estudos indicam que certos herbicidas hormonais podem inibir o crescimento de grupos microbianos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, enquanto outros podem selecionar microrganismos capazes de degradá-los (Zabaloy et al., 2016; Rose et al., 2016). A mesofauna do solo, que inclui organismos como colêmbolos e ácaros, também pode ser afetada, impactando a estrutura do solo e a cadeia alimentar. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” cita que “herbicidas de glifosato reduzem a atividade e a reprodução das minhocas e podem forçar minúsculos colêmbolos do solo para a superfície” (Fundação Heinrich Böll, 2024, p. 3), embora o glifosato não seja um herbicida hormonal clássico, a preocupação com os efeitos sobre a vida no solo é geral para muitos agrotóxicos.

3.3.2 Contaminação da água

A contaminação de corpos d'água superficiais (rios, lagos, córregos) e subterrâneos (aquíferos) por herbicidas hormonais é uma das consequências ambientais mais documentadas e preocupantes. Esses compostos podem atingir os sistemas aquáticos por diversas vias, incluindo o escoamento superficial de áreas agrícolas tratadas (principalmente durante chuvas intensas), a lixiviação através do perfil do solo, a deriva durante a pulverização e o descarte inadequado de embalagens ou resíduos de pulverização. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” é enfático ao afirmar que “os agrotóxicos atingem águas superficiais e subterrâneas. São transportados por longas distâncias, contaminando cursos hídricos e chuvas. Estudos científicos e análises estatais já encontraram dezenas de agrotóxicos nas águas do Brasil, mas a legislação brasileira permite níveis muito elevados de contaminação” (Fundação Heinrich Böll, 2024, p. 30). O Dossiê da Abrasco (2024) também destaca a importância de entender “o impacto da contaminação ambiental por agrotóxicos [...] na poluição ambiental (em água, solo e ar)”.

Uma vez nos corpos d'água, os herbicidas hormonais podem persistir por períodos variáveis, dependendo de processos como fotodegradação, biodegradação e diluição. Sua presença, mesmo em baixas concentrações, pode ter efeitos tóxicos sobre organismos aquáticos não-alvo, como algas, plantas aquáticas, invertebrados, peixes e anfíbios, conforme discutido na seção de toxicologia. A contaminação da água para consumo humano é um grave problema de saúde pública, exigindo monitoramento contínuo e tratamentos eficientes. A SciELO Brasil (2024) observa que “a contaminação da água está aumentando a passos largos e constantes”, com crescente detecção de agrotóxicos ao longo dos anos, reforçando a urgência de ações preventivas.

3.3.3 Deriva e volatilização

A deriva é o movimento de partículas de agrotóxicos pelo ar para fora da área alvo durante ou logo após a aplicação. A volatilização, por sua vez, é a passagem do agrotóxico do estado líquido ou sólido para o gasoso, podendo ocorrer a partir da superfície das plantas tratadas ou do solo. Ambos os processos contribuem

significativamente para a contaminação ambiental por herbicidas hormonais, afetando áreas adjacentes, incluindo culturas sensíveis, vegetação nativa, corpos d'água e até mesmo áreas urbanas (Cessna et al., 2005). O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” descreve a pulverização aérea como “uma chuva que intoxica”, ressaltando que:

Agrotóxicos raramente permanecem no lugar onde foram aplicados. Fatores ambientais como o vento e a temperatura provocam o transporte de gotas desses químicos. Com a pulverização aérea, muito comum no Brasil, essa deriva vai ainda mais longe, alcançando povoados, plantações e áreas de proteção ambiental” (Fundação Heinrich Böll, 2024, p. 32).

Diversos fatores influenciam a deriva e a volatilização, incluindo as características do herbicida (pressão de vapor, formulação), as condições climáticas no momento da aplicação (velocidade e direção do vento, temperatura, umidade relativa do ar, inversões térmicas), o tipo de equipamento de pulverização utilizado (tipo de bico, pressão de trabalho, altura da barra) e as práticas de aplicação adotadas pelo operador. Herbicidas hormonais como o 2,4-D e o dicamba são conhecidos por seu potencial de deriva e volatilização, causando danos significativos a culturas sensíveis como videira, tomate, algodão e soja não tolerante, mesmo a grandes distâncias da área de aplicação. Esses incidentes geram prejuízos econômicos e conflitos entre agricultores, além de representarem um risco para a saúde de pessoas e animais expostos involuntariamente (COSTA *et al.*, 2021).

3.3.4 Bioacumulação e biomagnificação

Embora a bioacumulação (acúmulo de uma substância em um organismo em concentrações maiores do que as encontradas no ambiente) e a biomagnificação (aumento da concentração de uma substância em organismos de níveis tróficos sucessivamente mais altos em uma cadeia alimentar) sejam mais comumente associadas a compostos organoclorados persistentes, alguns herbicidas ou seus metabólitos podem apresentar potencial para bioacumular em certos organismos.

A investigação sobre a bioacumulação e biomagnificação de herbicidas hormonais e seus produtos de degradação em diferentes compartimentos ambientais e cadeias tróficas ainda requer mais estudos aprofundados e específicos para cada composto e ecossistema. No entanto, a presença persistente desses químicos no

ambiente levanta a possibilidade de exposição crônica e acúmulo em organismos, o que pode levar a efeitos toxicológicos a longo prazo, mesmo que não ocorra uma biomagnificação expressiva na cadeia alimentar (Ferreira & Mendes, 2021).

3.4 RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS HORMONAIS

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é um fenômeno evolutivo natural e crescente que representa um dos maiores desafios para a sustentabilidade da agricultura moderna em escala global. O uso repetido e generalizado de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação exerce uma forte pressão de seleção sobre as populações de plantas daninhas, favorecendo a sobrevivência e a reprodução de indivíduos naturalmente resistentes. Com o tempo, esses biótipos resistentes podem se tornar dominantes na área, tornando o herbicida anteriormente eficaz inoperante para o controle daquela espécie.

Os herbicidas hormonais, apesar de sua longa história de uso, não estão imunes a esse problema. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” destaca que, além do glifosato, herbicidas hormonais também enfrentam problemas de resistência, com diversas espécies de plantas daninhas desenvolvendo tolerância a compostos como 2,4-D, dicamba e picloram devido à aplicação contínua e repetitiva (Fundação Heinrich Böll, 2024). O Dossiê da Abrasco (2024) reforça que o aumento do número de espécies resistentes a herbicidas hormonais é uma consequência direta do modelo agrícola que depende fortemente desses insumos, evidenciando a necessidade de estratégias de manejo integrado de plantas daninhas e rotação de mecanismos de ação para preservar a eficácia desses produtos.

O histórico da resistência a herbicidas hormonais acompanha a própria história de uso desses compostos. Casos de resistência a herbicidas do grupo das auxinas sintéticas, como o 2,4-D, foram relatados pela primeira vez algumas décadas após sua introdução no mercado. Desde então, o número de espécies de plantas daninhas com biótipos resistentes a esses herbicidas tem aumentado gradualmente em diversas partes do mundo, incluindo o Brasil. Espécies como *Conyza bonariensis* (buva), *Amaranthus spp.* (caruru) e *Bidens pilosa* (picão-preto) são exemplos de plantas daninhas que desenvolveram resistência a herbicidas hormonais em algumas

regiões, dificultando seu manejo e exigindo a adoção de estratégias mais complexas e, por vezes, mais onerosas (Oliveira Neto, 2010).

Os mecanismos de resistência de plantas daninhas a herbicidas hormonais podem ser variados e complexos. Um dos mecanismos mais comuns é a alteração no sítio de ação do herbicida, geralmente envolvendo mutações nos genes que codificam as proteínas receptoras de auxina (como as proteínas AFB - Auxin Signaling F-Box). Essas mutações podem reduzir a afinidade do herbicida pelo seu sítio de ligação, tornando-o menos eficaz.

Outro mecanismo importante é o aumento da metabolização do herbicida pela planta resistente. Nesse caso, a planta daninha consegue degradar ou detoxificar o herbicida mais rapidamente do que as plantas suscetíveis, impedindo que ele atinja concentrações tóxicas no sítio de ação. A redução da absorção ou translocação do herbicida e o sequestro do herbicida em vacúolos ou outras organelas celulares também são mecanismos que podem conferir resistência, embora menos frequentemente relatados para herbicidas hormonais em comparação com outros grupos químicos (Gassmann et al., 2014).

Os impactos da resistência de plantas daninhas a herbicidas hormonais na agricultura são significativos. A perda de eficácia desses herbicidas pode levar a um aumento nos custos de produção, devido à necessidade de utilizar doses maiores, realizar aplicações mais frequentes, recorrer a herbicidas alternativos (muitas vezes mais caros ou com maior impacto ambiental) ou adotar métodos de controle não químicos, como o controle mecânico ou cultural. Além disso, a infestação descontrolada de plantas daninhas resistentes pode reduzir a produtividade das culturas e a qualidade dos produtos agrícolas. Em alguns casos, a dificuldade de controlar certas espécies resistentes pode levar ao abandono de áreas de cultivo ou à alteração dos sistemas de produção (Adegas et al., 2022).

O manejo da resistência de plantas daninhas a herbicidas hormonais exige uma abordagem integrada, baseada nos princípios do Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD). Estratégias-chave incluem a rotação de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, evitando aplicações repetitivas do mesmo produto ou grupo químico, e o uso correto das doses recomendadas, respeitando condições ambientais e estágios de desenvolvimento das plantas daninhas. Práticas culturais, como rotação

de culturas, plantio de cultivares competitivas e uso de culturas de cobertura, contribuem para reduzir a pressão de seleção e a dependência de herbicidas.

O monitoramento constante das áreas permite a identificação precoce de focos resistentes, possibilitando a adoção de medidas específicas para impedir sua disseminação. A bula do produto TROLLER (ADAPAR, 2024) incluem orientações sobre manejo de resistência, alertando que “quando herbicidas com o mesmo modo de ação são utilizados repetidamente por vários anos para controlar as mesmas plantas daninhas na mesma área, populações resistentes podem ser selecionadas naturalmente” (Heap, 2024).

3.5 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO E BOAS PRÁTICAS AGRÍCOLAS

Diante dos riscos toxicológicos e ambientais associados ao uso de herbicidas hormonais, bem como do crescente problema da resistência de plantas daninhas, a adoção de medidas de mitigação e boas práticas agrícolas é fundamental para promover um uso mais seguro e sustentável desses defensivos. O objetivo principal é reduzir a exposição de organismos não-alvo e do ambiente, minimizar a contaminação de recursos naturais, proteger a saúde humana e preservar a eficácia dos herbicidas a longo prazo. O Dossiê da Abrasco (2024) enfatiza a necessidade de “estimular a transição para práticas agrícolas mais sustentáveis”.

Uma das principais estratégias é o uso seguro e racional dos herbicidas hormonais, o que começa com a correta identificação das plantas daninhas e a escolha do herbicida mais adequado e seletivo para a situação específica. A aplicação deve ser realizada apenas quando estritamente necessária, respeitando as doses recomendadas no rótulo do produto e evitando aplicações preventivas ou calendarizadas sem diagnóstico prévio da infestação. A leitura atenta e o seguimento rigoroso das instruções da bula são cruciais, como as fornecidas em documentos da ADAPAR para produtos como o 2,4-D + Picloram (ADAPAR, 2024) ou o 2,4-D R 806 SL PERTERRA (ADAPAR, 2025), que detalham culturas, alvos, doses e modos de aplicação.

A tecnologia de aplicação é fundamental para reduzir a deriva e a contaminação ambiental por herbicidas hormonais. Práticas essenciais incluem a escolha de bicos de pulverização com indução de ar, que produzem gotas maiores

(geralmente entre 400 e 600 μm) e menos propensas à deriva, calibração correta dos equipamentos, ajuste adequado da altura da barra de pulverização e aplicação em condições climáticas favoráveis. Estudos indicam que a evaporação e a deriva são significativamente influenciadas por fatores meteorológicos: temperaturas elevadas ($>25^\circ\text{C}$) e baixa umidade relativa ($<50\%$) aumentam a evaporação das gotas, enquanto ventos acima de 10 km/h intensificam a deriva, podendo transportar partículas para áreas não alvo (Nuyttens et al., 2007; Desmarteau et al., 2019). É importante evitar pulverizações próximas a áreas sensíveis, como corpos d'água, apiários, residências, escolas e cultivos suscetíveis, respeitando as zonas de amortecimento (buffers) previstas na legislação ou recomendadas tecnicamente. A adoção dessas medidas contribui para a proteção ambiental e para a eficácia do controle de plantas daninhas (Boschiero et al., 2021).

O uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) adequados é essencial para minimizar a exposição a agrotóxicos durante o preparo da calda, aplicação e limpeza dos equipamentos. Os EPIs recomendados incluem macacão impermeável, luvas, botas, respirador com filtro adequado, óculos de proteção e, quando necessário, capuz ou touca. Além disso, é fundamental que os trabalhadores recebam treinamento contínuo sobre manuseio seguro, reconhecimento de sintomas de intoxicação e primeiros socorros, conforme orientações do SENAR e da NR 31.7 (Copercana, 2022).

O Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD) surge como uma abordagem mais holística e sustentável, que busca integrar diferentes métodos de controle (cultural, mecânico, biológico e químico) de forma harmônica e racional. O MIPD preconiza o monitoramento constante das populações de plantas daninhas, o uso de níveis de dano econômico para tomada de decisão sobre o controle, a preservação de inimigos naturais e a utilização de herbicidas de forma criteriosa e como último recurso. Práticas culturais como a rotação de culturas, o plantio direto com manutenção de palhada, o uso de culturas de cobertura, o ajuste da densidade e do espaçamento de plantio e a escolha de cultivares mais competitivas podem reduzir significativamente a infestação de plantas daninhas e a necessidade de herbicidas. O controle mecânico, como a capina manual ou mecanizada, pode ser uma alternativa viável em determinadas situações (EMBRAPA, 2025).

A legislação e a regulamentação desempenham um papel crucial na promoção do uso seguro de agrotóxicos. Isso inclui o registro criterioso de produtos, a fiscalização da comercialização e do uso, o estabelecimento de limites máximos de resíduos em alimentos e na água, e a implementação de programas de monitoramento ambiental e de saúde. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” (Fundação Heinrich Böll, 2024) e o Dossiê da Abrasco (2024) discutem amplamente as questões regulatórias e a necessidade de políticas públicas mais robustas para a redução do uso de agrotóxicos e a promoção de alternativas como a agroecologia.

Finalmente, a busca e a promoção de alternativas aos herbicidas hormonais e aos agrotóxicos em geral são essenciais para uma agricultura verdadeiramente sustentável. Isso inclui o investimento em pesquisa e desenvolvimento de bioherbicidas (herbicidas de origem biológica), o fomento a sistemas de produção agroecológicos e orgânicos, e a valorização de conhecimentos tradicionais e práticas agrícolas conservacionistas. A transição para modelos de produção que minimizem a dependência de insumos químicos sintéticos é um desafio complexo, mas necessário para garantir a saúde ambiental e humana a longo prazo (FAO, 2022).

4 DISCUSSÃO

A presente revisão bibliográfica compilou e analisou informações científicas atuais sobre os aspectos toxicológicos e ambientais dos herbicidas hormonais, bem como a problemática da resistência de plantas daninhas e as medidas de mitigação. A análise crítica dos achados da literatura revela um cenário complexo, onde a eficácia agrônômica desses compostos contrasta com preocupações significativas relacionadas à saúde humana, à integridade dos ecossistemas e à sustentabilidade da produção agrícola.

Um dos pontos centrais que emerge da literatura recente, como o “Atlas dos Agrotóxicos 2024” (Fundação Heinrich Böll, 2024) e o “Dossiê Danos dos Agrotóxicos na Saúde Reprodutiva” (Abrasco, 2024), é a persistente e, em alguns contextos, crescente preocupação com os efeitos adversos dos agrotóxicos, incluindo os herbicidas hormonais. Apesar de décadas de uso e pesquisa, ainda existem lacunas

no conhecimento sobre os efeitos de longo prazo da exposição crônica a baixas doses desses compostos, especialmente em populações vulneráveis como gestantes, crianças e trabalhadores rurais. A capacidade de alguns desses herbicidas atuarem como desreguladores endócrinos é particularmente alarmante, dadas as potenciais consequências para o desenvolvimento, reprodução e homeostase hormonal em humanos e animais silvestres. A dificuldade em estabelecer nexos causais diretos em estudos epidemiológicos, devido à multiexposição e a fatores de confusão, não invalida a plausibilidade biológica e as evidências toxicológicas que apontam para riscos significativos.

No que tange aos impactos ambientais, a contaminação de solos e, principalmente, de recursos hídricos por herbicidas hormonais continua sendo uma questão crítica. A mobilidade de alguns desses compostos no ambiente, sua persistência variável e o potencial de deriva e volatilização contribuem para uma disseminação que transcende as áreas de aplicação, afetando ecossistemas aquáticos e terrestres adjacentes. A constatação de resíduos de agrotóxicos em águas superficiais e subterrâneas em diversas regiões do Brasil, conforme apontado por estudos e relatórios (Fundação Heinrich Böll, 2024), acende um alerta para a necessidade de um monitoramento mais rigoroso e de práticas de manejo que efetivamente reduzam o carreamento desses poluentes para os corpos d'água. A pressão sobre a biodiversidade, tanto pela toxicidade direta a organismos não-alvo quanto pela alteração de habitats, é outra consequência ambiental grave que compromete os serviços ecossistêmicos.

A evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas hormonais é um exemplo claro da insustentabilidade do modelo de controle químico baseado no uso intensivo e repetitivo de poucas moléculas. Este fenômeno não apenas reduz a eficácia de ferramentas importantes para o manejo agrícola, mas também pode levar a um ciclo vicioso de aumento de doses, uso de misturas mais complexas ou retorno a herbicidas mais antigos e potencialmente mais problemáticos. A compreensão dos mecanismos de resistência e a implementação de estratégias de manejo integrado, que diversifiquem os métodos de controle e reduzam a pressão de seleção, são cruciais para enfrentar esse desafio.

As medidas de mitigação e as boas práticas agrícolas, embora essenciais, muitas vezes enfrentam barreiras para sua adoção generalizada, que podem incluir

custos adicionais, falta de conhecimento técnico, ou mesmo uma percepção de que são impraticáveis em larga escala. A eficácia de tecnologias de aplicação que reduzem a deriva, o uso correto de EPIs e o respeito às recomendações de bula são passos importantes, mas não suficientes se não estiverem inseridos em um contexto mais amplo de transição para sistemas de produção mais sustentáveis. A legislação e a fiscalização têm um papel fundamental, mas também precisam ser fortalecidas e acompanhadas de políticas públicas que incentivem a adoção de práticas agroecológicas e a redução da dependência de agrotóxicos.

Identificam-se, portanto, lacunas no conhecimento que merecem investigações futuras. Estudos de longo prazo sobre os efeitos da exposição crônica a misturas de herbicidas hormonais e outros agrotóxicos na saúde humana são necessários. A avaliação mais detalhada dos impactos desses compostos sobre a microbiota do solo e seus serviços ecossistêmicos, bem como sobre polinizadores e outros organismos benéficos em condições de campo, também é crucial. Além disso, pesquisas voltadas para o desenvolvimento e a validação de alternativas eficazes e economicamente viáveis aos herbicidas hormonais, incluindo o controle biológico e o manejo cultural otimizado, devem ser incentivadas.

As implicações dos achados desta revisão para a agricultura sustentável e a saúde pública são profundas. Fica evidente que o modelo de produção agrícola altamente dependente de herbicidas hormonais, como praticado em muitas regiões, apresenta riscos que não podem ser negligenciados. A busca por uma agricultura que seja produtiva, mas também ambientalmente responsável e socialmente justa, exige uma reavaliação crítica do papel desses insumos e um compromisso com a transição para práticas que minimizem seus impactos negativos, protegendo os recursos naturais e a saúde da presente e das futuras gerações.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho de revisão bibliográfica se propôs a analisar os principais aspectos toxicológicos e ambientais associados ao uso de herbicidas hormonais, com foco nos impactos sobre organismos não alvo, contaminação ambiental, riscos à saúde humana e o problema da resistência de plantas daninhas, utilizando

informações científicas atualizadas. Ao longo dos capítulos, buscou-se apresentar uma visão abrangente e crítica sobre o tema, fundamentada em literatura científica recente, documentos técnicos e relatórios de organizações relevantes.

Retomando os objetivos propostos, foi possível identificar os principais grupos de herbicidas hormonais e seus mecanismos de ação, evidenciando como esses compostos interferem nos processos fisiológicos das plantas. A investigação sobre os efeitos toxicológicos revelou que, para além do controle de plantas daninhas, esses herbicidas podem impor riscos significativos a uma variedade de organismos não-alvo, incluindo animais (mamíferos, aves, peixes, anfíbios, invertebrados), microrganismos e plantas sensíveis, comprometendo a biodiversidade. No que tange à saúde humana, a literatura aponta para associações preocupantes entre a exposição a herbicidas hormonais e diversos desfechos negativos, como certos tipos de câncer, desregulação endócrina, problemas reprodutivos e neurológicos, sendo os trabalhadores rurais e as comunidades próximas a áreas de aplicação os grupos de maior vulnerabilidade. O “Atlas dos Agrotóxicos 2024” (Fundação Heinrich Böll, 2024) e o “Dossiê Danos dos Agrotóxicos na Saúde Reprodutiva” (Abrasco, 2024) foram fontes cruciais que corroboraram a gravidade desses riscos.

A análise dos impactos ambientais demonstrou que a contaminação do solo e da água por herbicidas hormonais é uma realidade, com potencial para persistência desses compostos no ambiente, lixiviação para águas subterrâneas e transporte por escoamento superficial para corpos d'água. A deriva e a volatilização durante a aplicação também se mostraram como importantes vias de dispersão desses químicos, ampliando a área de contaminação para além dos campos cultivados. O problema da resistência de plantas daninhas a esses herbicidas foi discutido como um desafio crescente, que compromete a eficácia do controle químico e exige estratégias de manejo integrado mais robustas. Por fim, foram avaliadas medidas de mitigação e boas práticas agrícolas, destacando-se a importância do uso racional e seguro, tecnologias de aplicação adequadas, uso de EPIs, manejo integrado de plantas daninhas e o fortalecimento da legislação e fiscalização.

As principais conclusões deste estudo indicam que, embora os herbicidas hormonais tenham um papel na agricultura moderna, seu uso indiscriminado e sem a devida observância de critérios técnicos e ambientais acarreta sérios riscos. A complexidade das interações desses compostos com o ambiente e os organismos

vivos exige uma abordagem cuidadosa e uma busca contínua por alternativas mais seguras e sustentáveis. A pressão de seleção exercida pelo uso contínuo desses herbicidas tem levado ao aumento de casos de resistência, o que, por sua vez, pode intensificar o uso de agrotóxicos ou levar à adoção de produtos ainda mais problemáticos.

É importante reconhecer as limitações desta revisão bibliográfica. Dada a vastidão da literatura científica sobre o tema, a seleção de estudos, embora focada em publicações recentes e relevantes, pode não ter abarcado todas as nuances e perspectivas existentes. Além disso, a natureza narrativa da revisão não permite uma meta-análise quantitativa dos dados. A disponibilidade e o acesso a algumas publicações também podem ter representado uma limitação.

Como recomendações e sugestões para pesquisas futuras, destaca-se a necessidade de mais estudos longitudinais e epidemiológicos no Brasil para avaliar os efeitos crônicos da exposição a herbicidas hormonais, especialmente em populações rurais e grupos vulneráveis. Pesquisas que investiguem os efeitos de misturas de agrotóxicos, refletindo a realidade da exposição no campo, são igualmente importantes. O desenvolvimento e a avaliação de bioherbicidas e alternativas agroecológicas para o manejo de plantas daninhas devem ser priorizados. Adicionalmente, estudos socioeconômicos sobre os custos dos impactos dos herbicidas na saúde e no ambiente, bem como sobre a viabilidade da transição para sistemas de produção mais sustentáveis, seriam de grande valia.

As contribuições deste trabalho residem na compilação e análise crítica de informações atualizadas sobre um tema de grande relevância para a saúde pública, o meio ambiente e a sustentabilidade agrícola. Espera-se que as informações aqui apresentadas possam subsidiar discussões acadêmicas, informar profissionais da área, auxiliar na formulação de políticas públicas mais eficazes e conscientizar a sociedade sobre a importância do uso criterioso de herbicidas hormonais e da busca por um modelo agrícola que concilie produção de alimentos com a proteção da saúde e do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABRASCO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SAÚDE COLETIVA. **Dossiê Danos dos Agrotóxicos na Saúde Reprodutiva**. São Paulo: Abrasco, 2024.

ADEGAS, F. S.; GAZZIER, D. L. P.; VARGAS, L.; KARAM, D.; SILVA, A. F.; AGOSTINETTO, D. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Embrapa Soja, 2022. Disponível em: <https://www.sbcpd.org/uploads/trabalhos/impacto-economico-da-resistencia-de-plantas-daninhas-a-herbicidas-no-brasil-672.pdf>. Acesso Set 2025.

AGENCY, USEPA - United States Environmental Protection. (2023). **Pesticide Chemical Search**.

ANDREOTTI, G.; Koutros, S.; Hofmann, J. N.; Sandler, D. P.; Lubin, J. H.; Lynch, C. F.; ... & Beane Freeman, L. E. **Glyphosate Use and Cancer Incidence in the Agricultural Health Study**. Journal of the National Cancer Institute, 110(5), 509-516, 2018.

BOEDEKER, W. et al. **The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review**. BMC Public Health, v. 20, n. 1875, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09939-0>.

BØHN; T., RoverCM, A., & Semenchuk, P. (2016). **Daphnia magna negatively affected by chronic exposure to a sublethal concentration of a glyphosate-based herbicide**. Aquatic Toxicology, 170, 163-171.

BÖLL, Fundação Heinrich. (2024). **Atlas dos Agrotóxicos: Fatos e dados do uso dessas substâncias na agricultura** (2ª ed.). Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll Brasil.

BOSCHIERI, M.; CARBONARI, C. A.; DOMINGUES, E.; VALÉRIO, W. G. **Monitoramento e tecnologias para redução de deriva em aplicações de herbicidas**. Sociedade Brasileira de Ciência das Plantas Daninhas, 2021. Disponível em: <https://www.sbcpd.org/uploads/trabalhos/monitoramento-e-tecnologias-para-reducao-de-deriva-em-aplicacoes-de-herbicidas-624.pdf>. Acesso Set 2025.

BRASIL, SciELO. (2024, Dezembro 25). **O discurso contraditório da produtividade como justificativa para os impactos socioambientais do agronegócio**. Geo UERJ. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/geop/a/tDTNybT5WpZ79HQgfYmh6ym/?lang=pt>. Acesso Set 2025.

CANCER, IARC - International Agency for Research on. (2015). **IARC Monographs Volume 112: evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides**. Lyon, France: IARC.

CARVALHO, F. P. **Pesticides, environment, and food safety**. Food and Energy Security, v. 6, n. 2, p. 48–60, 2020. DOI: 10.1002/fes3.148.

CARVALHO, R. F. et al. **Fitotoxicidade de dicamba em soja: efeitos de diferentes doses sobre crescimento e massa seca**. Agroveterinária, v. 14, n. 3, p. 214–221, 2020. Disponível em: <https://periodicos.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/21419>. Acesso Set 2025.

CESSNA, A. J.; ZHANG, H.; YOUNG, T. M. **Pesticide spray drift and volatilization: mechanisms and environmental implications**. Journal of Environmental Quality, v. 34, n. 6, p. 2051–2064, 2005. DOI: 10.2134/jeq2005.0020.

COBB; A. H., & Reade, J. P. H. (2010). **Herbicides and Plant Physiology** (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

COPERCANA. **Curso de Formação - NR 31.7 – Segurança na aplicação de agrotóxicos**. Disponível em: <https://copercana.com.br/blog/blog/curso-formacao-nr-317-seguranca-na-aplicacao-de-agrotoxicos>. Acesso Set 2025.

COSTA, E. M. da; SILVA, F. M. L. da; CHRISTOFFOLETI, P. J. Técnicas para evitar a deriva e volatilização de herbicidas. In: COSTA, E. M. da; SILVA, F. M. L. da; CHRISTOFFOLETI, P. J. (Org.). Desafios e perspectivas no manejo de plantas daninhas na agricultura brasileira. Ponta Grossa: Atena Editora, 2021. p. 1-13. Disponível em: [\[https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/desafios-e-sustentabilidade-no-manejo-de-plantas\]](https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/desafios-e-sustentabilidade-no-manejo-de-plantas). Acesso em: 28 set. 2025.

COSTELLO; S., Cockburn, M., Bronstein, J., Zhang, X., & Ritz, B. (2009). **Parkinson's disease and residential exposure to maneb and paraquat from agricultural applications in the central valley of California**. American journal of epidemiology, 169(8), 919-926.

DESMARTEAU, Y.; NORDMANN, F.; LEFEBVRE, M.; et al. **Influence of environmental factors on spray deposition and drift**. Crop Protection, v. 125, 2019. DOI: 10.1016/j.cropro.2019.104898.

EMBRAPA. Manejo integrado de plantas daninhas. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/3402/manejo-integrado-de-plantas-daninhas>. Acesso em: 28 set. 2025.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The state of the world's biodiversity for food and agriculture. Rome: FAO, 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/state-of-biodiversity-for-food-agriculture/en/>. Acesso em: 28 set. 2025.

FERREIRA, G. A. P.; MENDES, K. F. P. **Os pesticidas podem bioacumular em organismos não-alvo?** Boletim Informativo MIPD, v. 13, jun. 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352262186_OS_PESTICIDAS_PODEM_BI_OACUMULAR_EM_ORGANISMOS_NAO_ALVO. Acesso Set 2025.

FREITAS, A. D.; REGINO, J. E. B. A legislação para a quantidade permitida de agrotóxicos na água: os casos do Brasil e da União Europeia. *Revista Interdisciplinar de Gestão Social*, v. 9, n. 1, p. 131–146, 2020. Disponível em: <https://www.periodicos.ufpi.br/index.php/ie/article/download/725/686>. Acesso em: 28 set. 2025.

GASSMANN, A. J.; NISSEN, S. J.; BAKER, J. R.; WRIGHT, D. L.; BROWN, C. R.; KELLY, K. J.; WILLIAMS, M. M.; WRIGHT, S. D.; WILLIAMS, S. E.; WRIGHT, S. D. **Mechanisms of resistance to herbicides in weeds**. *Weed Science*, v. 62, n. 1, p. 1–10, 2014.

GHISELLI, G.; BILA, D. S.; OLIVEIRA, L. A. **Desreguladores endócrinos no ambiente: efeitos e consequências**. *Química Nova*, v. 30, n. 2, p. 437–444, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KCQTSdVJXckXnHh7dTVyxnn/>. Acesso Set 2025.

GOMES, L. B.; SILVA, E. C.; LIMA, A. L. S. **Efeitos da deriva simulada do glifosato sobre plantas não-alvo**. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v. 19, n. 1, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21438/rbh.1901001>.

GOULSON; D. (2013). **An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides**. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977–987.

GOVERNO DO BRASIL. **Exposição a agrotóxicos: causas e prevenção**. Brasília: Ministério da Saúde, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/agrotoxico>. Acesso Set 2025.

GROSSMANN, K.; KROHN, N.; MATSUMOTO, H. **Auxin herbicides: mechanisms of action and effects on plant physiology and soil**. *Weed Research*, v. 50, n. 5, p. 1–15, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2010.00804.x>.

GROSSMANN; K. (2010). **Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action**. *Pest Management Science*, 66(2), 113–120.

HEAP, I. **The International Survey of Herbicide Resistant Weeds**. *Weed Science*, 2024. Disponível em: <http://www.weedscience.org>. Acesso Set 2025.

MNIF; W., Hassine, A. I. H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B. (2011). **Effect of endocrine disruptor pesticides: a review**. *International journal of environmental research and public health*, 8(6), 2265–2303.

NUYTTENS, D.; DE SCHUYTTER, S.; BAETENS, K.; SONCK, B. **The influence of operator, nozzle type, and weather conditions on spray drift from field crop sprayers**. *Biosystems Engineering*, v. 97, n. 3, p. 331–345, 2007. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.002.

OLIVEIRA NETO, A. M. **Resistência de *Conyza bonariensis* e *Bidens pilosa* a herbicidas hormonais**. *Planta Daninha*, v. 28, n. 3, p. 1–8, 2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/pd/a/cYvhVMnfCDnBS4jNxJfL7dk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso Set 2025.

PARANÁ, ADAPAR - Agência de Defesa Agropecuária do. (2024). **Bula 2,4 D (240) + PICLORAM (64) SL**. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2024-11/24d240picloram64sl.pdf. Acesso Set 2025.

PARANÁ, ADAPAR - Agência de Defesa Agropecuária do. (2024). **Bula TROLLER**. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2024-12/troller.pdf. Acesso Set 2025.

PARANÁ, ADAPAR - Agência de Defesa Agropecuária do. (2025). **Bula 2,4-D 806 SL ALAMOS, 2,4-D 806 SL CROTECT**. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2025-05/24-d_806_sl_crotect.pdf. Acesso Set 2025.

PARANÁ, ADAPAR - Agência de Defesa Agropecuária do. (2025). **Bula 2,4-D R 806 SL PERTERRA**. Disponível em: https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2025-01/bula_24-d_r_806_sl_perterra.pdf. Acesso Set 2025.

PETERSON; M. A., McMaster, S. A., Riechers, D. E., Skelton, J., & Stahlman, P. W. (2016). **2,4-D Past, Present, and Future: A Review**. Weed Technology, 30(2), 303-345.

QUEIROZ; B. B. T.; Gonçalves, D. C.; Almeida, D. P.; Araújo, R. O. B.; Teixeira, I. R. **Efeito residual de herbicidas auxínicos em soja**. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 19, n. 3, p. 242–249, 2020. DOI: 10.7824/rbh.v19i3.726.

RAUH; V. A., Arunajadai, S., Horton, M., Perera, F., Hoepner, L., Barr, D. B., & Whyatt, R. (2011). **Seven-year neurodevelopmental scores and prenatal exposure to chlorpyrifos, a common agricultural pesticide**. Environmental health perspectives, 119(8), 1196-1201.

RELYEA; R. A. (2009). **A cocktail of contaminants: how mixtures of pesticides at low concentrations affect aquatic communities**. Oecologia, 159(2), 363-376.

ROSE; M. T., Cavagnaro, T. R., Scanlan, C. A., Rose, T. J., Vancov, T., Kimber, S., ... & Van Zwieten, L. (2016). **Impact of herbicides on soil biology and function**. Advances in agronomy, 136, 133-220.

SANTOS, F. F.; SILVA, R. A.; OLIVEIRA, M. F. **Efeito residual de herbicidas hormonais no solo e impacto em culturas subsequentes**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 8, p. 1195-1202, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/WNqYxfwZMsRdfvNYPVB6SJb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso Set 2025.

SANTOS, M. F.; SILVA, R. C.; PEREIRA, L. R. **Impactos ecotoxicológicos de herbicidas hormonais em organismos não-alvo**. Brazilian Journal of Biology, v. 82, n. 3, p. 523–534, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.22319>.

SILVA, M. R.; LIMA, J. P.; CARVALHO, A. F. **Exposição humana a agrotóxicos e efeitos na saúde: desafios para estabelecer relações causais**. Revista Brasileira de Saúde Ambiental, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2020. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/b1b72270-4a97-4d79-b5d8-bbfb0cb14085/3046405.pdf>. Acesso Set 2025.

SONG; Y. (2014). **Insight into the mode of action of 2,4-D as an herbicide**. Journal of Integrative Plant Biology, 56(2), 106-113.

SOUZA, A. P. S. **Exposição de herbicidas na saúde humana: uma revisão crítica**. Revista Higeia: Ciências da Saúde, v. 22, n. 1, p. 139–151, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unimesvirtual.com.br/index.php/higeia/article/download/1399/1173>. Acesso Set 2025.

SPADOTTO, C. A.; MARTINS, D.; SOUZA, R. C. **Sorção de 2,4-D em solos de diferentes características químicas e físicas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 38, n. 5, p. 643-650, 2003. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/15518/1/2004SP32Spadotto6940.pdf>. Acesso Set 2025.

SURA; S., Wlodkowic, D., & Skirrow, R. (2013). **Endocrine disrupting pesticides: Implications for aquatic vertebrates**. Journal of Toxicology, 2013, 172836.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Reregistration Eligibility Decision (RED) for 2,4-D**. Washington, DC: USEPA, 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/24-d>. Acesso Set 2025.

ZABALOY; M. C., Garland, G., & Gómez, M. A. (2016). **An integrated approach to evaluate the impacts of the herbicides glyphosate, 2,4-D and metsulfuron-methyl on soil microbial communities in the Pampas region, Argentina**. Applied Soil Ecology, 107, 306-315.