

Nanotecnologia como caminho sustentável para a produção de agroquímicos verdes

Paulo Vilson Torres de Alencar Junior*

Graduando em farmácia. Faculdade Brasileira Multivix Vila Velha, 29103-800, Vila Velha/ ES, Brasil

*E-mail do autor correspondente: paulo.vilson@hotmail.com

Submetido em: 21 abr. 2026. Aceito em: 16 jul. 2026

Resumo

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio de conciliar produtividade com sustentabilidade, diante dos impactos negativos do uso intensivo de agroquímicos sintéticos, como degradação dos solos, contaminação hídrica e riscos à saúde humana. Este trabalho realiza uma revisão crítica sobre a nanotecnologia aplicada à síntese de agroquímicos verdes, destacando seu potencial para substituir ou reduzir o uso de insumos convencionais. A pesquisa, de caráter exploratório e qualitativo, baseou-se em literatura científica e documentos institucionais publicados entre 2000 e 2026, permitindo uma análise integrada dos avanços e desafios da área. Os resultados evidenciam que, embora os agroquímicos sintéticos tenham sido fundamentais para a Revolução Verde, sua persistência ambiental e toxicidade geram impactos sociais e econômicos relevantes. Em contraposição, os agroquímicos verdes, concebidos com base em princípios de sustentabilidade e economia circular, apresentam menor toxicidade e maior seletividade. Quando associados à nanotecnologia, ganham eficiência por meio de sistemas de liberação controlada e monitoramento inteligente. Conclui-se que a integração entre nanotecnologia e agroquímicos verdes representa não apenas inovação científica, mas também estratégia econômica e social para garantir segurança alimentar, competitividade internacional e preservação dos recursos naturais. O Brasil, ao adotar essas soluções, pode se reposicionar como protagonista na agricultura sustentável global.

Palavras-chave: Agroquímica Verde, Agroquímicos Sintéticos, Nanotecnologia, Sustentabilidade.

Abstract

Nanotechnology as a sustainable pathway for the production of green agrochemicals

Contemporary agriculture faces the challenge of reconciling productivity with sustainability, given the negative impacts of intensive use of synthetic agrochemicals, such as soil degradation, water contamination, and risks to human health. This study presents a critical review of nanotechnology applied to the synthesis of green agrochemicals, highlighting its potential to replace or reduce the use of conventional inputs. The research, exploratory and qualitative in nature, was based on scientific literature and institutional documents published between 2000 and 2026, allowing for an integrated analysis of advances and challenges in the field. The results show that although synthetic agrochemicals were fundamental to the Green Revolution, their environmental persistence and toxicity generate significant social and economic impacts. In contrast, green agrochemicals, designed according to sustainability and circular economy principles, exhibit lower toxicity and

greater selectivity. When associated with nanotechnology, they gain efficiency through controlled release systems and intelligent monitoring. It is concluded that the integration of nanotechnology and green agrochemicals represents not only scientific innovation but also an economic and social strategy to ensure food security, international competitiveness, and preservation of natural resources. By adopting these solutions, Brazil can reposition itself as a global leader in sustainable agriculture.

Keywords: Green Agrochemistry, Nanotechnology, Sustainability, Synthetic Agrochemicals.

Introdução

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio de conciliar o aumento da produtividade com a preservação ambiental e a segurança alimentar. O modelo baseado no uso intensivo de agroquímicos sintéticos, embora tenha sido fundamental para os avanços da Revolução Verde, trouxe consequências negativas como a degradação dos solos, a contaminação de recursos hídricos e o surgimento de pragas resistentes. Esses impactos evidenciam a necessidade de alternativas que promovam eficiência agronômica sem comprometer os ecossistemas (Campagnolla; Macêdo, 2022; Yasir; Hossain; Pratap-Singh, 2025)

Nesse contexto, a nanotecnologia desponta como uma abordagem inovadora e estratégica para o setor agrícola. A manipulação da matéria em escala nanométrica permite o desenvolvimento de insumos capazes de otimizar a absorção de nutrientes, reduzir perdas por lixiviação e volatilização e oferecer sistemas de liberação controlada. Técnicas como nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas e nanossensores são apontadas como alternativas promissoras para uma agricultura mais precisa e de menor impacto ambiental (Anjos et al., 2026).

Paralelamente, os chamados agroquímicos verdes surgem como resposta às limitações dos insumos convencionais, sendo concebidos com base em princípios de sustentabilidade – definidos pelo equilíbrio ambiental, viabilidade econômica e

justiça social. Esses produtos buscam reduzir efeitos nocivos ao ambiente e à saúde humana, ao mesmo tempo em que mantêm ou ampliam a eficiência agronômica. Quando associados às técnicas da nanotecnologia, os agroquímicos verdes ganham maior seletividade e capacidade de atuação, criando um sistema integrado que alia inovação tecnológica e responsabilidade ambiental (Mira; Mira, 2025).

Os agroquímicos verdes, diferente dos sintéticos, podem ser entendidos como substâncias químicas aplicadas na agricultura com o propósito de controlar pragas, doenças e plantas daninhas, cuja síntese segue os princípios da química verde, definida pelo pai desta ciência, Paul J. Anastas (1998), como “uma filosofia de trabalho, que envolve o uso de ferramentas e caminhos alternativos que previnam a poluição”, ou seja, que visa promover inovações a fim de reduzir ou exterminar o uso e a produção de substâncias perigosas em seu *design*, buscando, principalmente, gerar o mínimo de produtos tóxicos para os seres humanos e para o meio ambiente, além de incentivar a utilização de matérias-primas renováveis (Anastas, 1998 apud Chimal-Álvarez et al., 2025).

Além de representar uma inovação tecnológica, a integração entre nanotecnologia e agroquímicos verdes deve ser compreendida como parte de um movimento global em direção à agricultura sustentável. Pesquisas recentes destacam que práticas agrícolas baseadas em nanotecnologia podem contribuir para reduzir a

pegada ecológica da produção, aumentar a eficiência no uso de insumos e favorecer sistemas agrícolas resilientes (Zaman; Ayaz; Park 2025). Essa perspectiva se alinha diretamente às metas globais de desenvolvimento sustentável estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU), que incluem a promoção da segurança alimentar, a gestão responsável dos recursos naturais e a mitigação das mudanças climáticas (ONU, 2015). Assim, a convergência entre ciência de materiais e práticas agrícolas sustentáveis configura-se como um dos caminhos mais promissores para enfrentar os desafios da segurança alimentar e da preservação ambiental no século XXI.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão crítica sobre o uso da nanotecnologia na síntese de agroquímicos verdes, destacando seus benefícios em relação aos agroquímicos sintéticos. Pretende-se analisar como a convergência entre a nanotecnologia e sustentabilidade pode contribuir para sistemas agrícolas mais resilientes, produtivos e alinhando às demandas globais por segurança alimentar e preservação dos recursos naturais.

Metodologia

Este estudo foi desenvolvido com caráter exploratório e qualitativo, buscando compreender o papel da nanotecnologia na produção de agroquímicos verdes e sua contribuição para práticas agrícolas sustentáveis. A pesquisa exploratória é adequada quando o objetivo é ampliar a compreensão de fenômenos emergentes e levantar hipóteses para futuras investigações (Creswell; Creswell, 2021).

A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica e documental. Foram consultadas bases acadêmicas internacionais em espanhol, inglês e português, como *Scopus*, *Web*

of Science, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), *Public Medline* (PubMed), relatórios técnicos de organismos multilaterais, periódicos científicos digitais e demais publicações relacionadas ao tema. A pesquisa bibliográfica, segundo Grazziotin; Klaus; Pereira (2022), permite a construção de um referencial teórico sólido, enquanto a análise documental possibilita examinar relatórios e documentos institucionais que complementam a investigação (Grazziotin; Klaus; Pereira, 2020).

A abordagem qualitativa foi escolhida por valorizar a interpretação crítica e contextualizada dos fenômenos estudados. Silva et al. (2022) destaca que esse tipo de pesquisa busca compreender significados e relações sociais, em vez de se limitar à quantificação de dados. Nesse sentido, a análise foi orientada pela pesquisa explicativa, que procura identificar causas e consequências dos processos investigados (Silva et al., 2022).

A faixa de pesquisa adotada contemplou publicações entre 2000 e 2026, utilizando as combinações de palavras-chave: agroquímica verde, agroquímicos sintéticos, nanotecnologia e sustentabilidade. A triangulação entre diferentes tipos de fontes seguiu os princípios da análise de conteúdo, conforme Krippendorff (2013), permitindo maior consistência e confiabilidade nos resultados. Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou uma visão integrada sobre os desafios e oportunidade da nanotecnologia na síntese de agroquímicos verdes (Krippendorff, 2013).

Revisão de literatura

Definição de agroquímicos sintéticos e verdes

Os agroquímicos sintéticos são produtos desenvolvidos industrialmente para controlar pragas, doenças e fornecer nutrientes às plantas.

Embora tenha sido fundamental para o aumento da produtividade agrícola durante a Revolução Verde, seu uso intensivo trouxe impactos negativos como contaminação de solos e águas, além de riscos à saúde humana. Essa dependência de insumos convencionais evidencia a necessidade de alternativas mais seguras e sustentáveis (Wachekowski et al., 2021).

Em contraposição, os agroquímicos verdes são concebidos com base em princípios de sustentabilidade, buscando reduzir os efeitos nocivos ao ambiente e à saúde. Eles podem ser produzidos a partir de fontes renováveis, com menor toxicidade e maior seletividade, promovendo práticas agrícolas alinhadas à economia circular. Essa abordagem representa uma evolução conceitual, que integra inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental (Costa et al., 2024).

A distinção entre agroquímicos sintéticos e verdes é essencial para compreender o papel da nanotecnologia. Enquanto os sintéticos priorizam eficiência imediata, os verdes buscam equilibrar produtividade e preservação ambiental. Essa diferenciação estabelece o ponto de partida para analisar como a nanotecnologia pode potencializar os agroquímicos verdes, tornando-os mais eficazes e competitivos frente os modelos convencionais (Mira; Mira, 2025).

Histórico e evolução do uso de agroquímicos no Brasil

A Revolução Verde, ocorrida entre as décadas de 1940 e 1970, pode ser definida como um movimento de modernização agrícola responsável marcado pela adoção de tecnologias voltadas para o aumento da produtividade em larga escala, diante o uso de sementes de alto rendimento, mecanização, irrigação em larga escala e uso intensivo de fertilizantes e pesticidas

sintéticos (Rossato, 2024). O uso de agroquímicos no Brasil ganhou força a partir desse processo, quando defensivos químicos foram incorporados em larga escala para aumentar a produtividade agrícola. Esse processo foi impulsionado pela expansão da soja, milho e cana-de-açúcar, culturas que se tornaram dependentes de herbicidas e inseticidas (Pinho et al., 2024).

Com o passar das décadas, o Brasil consolidou-se como um dos maiores consumidores de agrotóxicos do mundo. Dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) indicam que o país figura entre os líderes globais em volume de defensivos aplicados por hectare cultivado. Essa intensificação trouxe ganhos econômicos, mas também ampliou os riscos de contaminação ambiental e exposição da população rural e urbana (FAO, 2019).

Em contraste, países como da União Europeia e da América do Norte iniciaram processos de restrição e banimento de diversas substâncias, como paraquat e atrazina, já nos anos 2000. Essa defasagem regulatória evidencia a necessidade de revisão das políticas brasileiras, alinhando-se às práticas internacionais de segurança alimentar e ambiental (Nogueira, 2024).

Impactos ambientais, sociais e de saúde pública dos agroquímicos sintéticos

Os agroquímicos sintéticos apresentam elevada persistência ambiental, o que favorece sua acumulação em solos e águas. Herbicidas como atrazina e o glifosato são frequentemente detectados em corpos hídricos devido à lixiviação e ao escoamento superficial, comprometendo a qualidade da água e afetando organismos aquáticos sensíveis (Martins, 2023).

Estudos demonstraram que a atrazina, mesmo em baixas concentrações, pode alterar

comunidades de algas e plantas aquáticas, reduzindo a biodiversidade e modificando ciclos ecológicos essenciais. Essa persistência também dificulta a recuperação de áreas agrícolas contaminadas, prolongando os efeitos adversos mesmo após a suspensão do uso (Souza, 2024).

Inseticidas organofosforados, como acefato e clorpirifós, apresentam elevada toxicidade para polinizadores e insetos benéficos. A exposição crônica de abelhas a resíduos desses compostos está associada às mudanças comportamentais como redução da capacidade de orientação, redução do voo, aumento de movimentos incomuns e aumento da mortalidade. Ademais, a deriva aérea desse produto pode atingir áreas não alvas, incluindo reservas naturais e cultivos vizinhos, ampliando os impactos ecológicos. A perda de polinizadores representa não apenas um problema ambiental, mas também econômico, já que muitas culturas dependem diretamente da polinização biológica para garantir produtividade (Ayoub et al., 2024).

A persistência desses compostos no ambiente contribui para a degradação de ecossistemas inteiros, comprometendo serviços ecossistêmicos como regulação hídrica, fertilidade do solo e equilíbrio da fauna. Igualmente, há evidências de que a presença contínua de resíduos químicos em ambientes agrícolas reduz a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças climáticas, tornando-os mais vulneráveis a estresses ambientais (Carvalho, 2024).

Para somar, o uso intensivo de agroquímicos sintéticos no Brasil tem implicações para a saúde pública. Trabalhadores rurais estão entre os grupos mais vulneráveis frente à exposição ocupacional pela manipulação direta dos produtos e convívio nas áreas cultivadas. Estudos apontam que intoxicações agudas são frequentes em

regiões agrícolas, com sintomas que variam de náuseas até insuficiência respiratória (Lima; et al., 2025; Rodrigues et al., 2025).

Além das intoxicações agudas, estudos associam o uso contínuo de pesticidas à efeitos crônicos como alterações endócrinas, neurológicas e alguns tipos de câncer, não se restringindo aos trabalhadores, mas sim se expandindo às comunidades vizinhas, ampliando o problema para a esfera da saúde coletiva. Isso leva a ser questionado os valores socioeconômicos relacionados ao tratamento dessas doenças, não apenas sobre o custo para o sistema de saúde pública, mas também sobre a desigualdade social evidente: populações rurais e de baixa renda são mais expostas e menos protegidas, reforçando vulnerabilidades históricas (Freitas; Bonfatti; Vasconcellos, 2022).

Essa comprometedora exposição contínua e massiva dos agroquímicos sintéticos pode ser considerado agravante diante a seleção evolutiva, resultando em um aumento crítico na resistência de pragas, doenças e plantas daninhas às moléculas tradicionais. Esse cenário reduz drasticamente a eficácia fitossanitária no campo e força o produtor a aplicar superdosagens, agravando o ciclo de contaminação (Wang et al., 2026).

Comparação internacional e competitividade do agronegócio brasileiro

Do ponto de vista econômico, a manutenção de agroquímicos proibidos em outros países, como representado pela Tabela 1, pode gerar barreiras comerciais significativas. Exportadores brasileiros enfrentam exigências crescentes de consumidores e importadores que demandam produtos livres de resíduos tóxicos, especialmente em mercados como a União Europeia, onde não há tolerância

para determinadas substâncias (Nogueira, 2024). Essa situação aumenta o risco de rejeição de cargas e eleva os custos de adequação às normas internacionais reduzindo a competitividade frente a

países que já avançaram na transição para insumos mais sustentáveis (FAO, 2019).

Tabela 1. Principais agroquímicos sintéticos utilizados no Brasil, situação regulatória internacional e alternativas verdes com nanotecnologia.

Agroquímico sintético	Função original	Situação internacional	Situação no Brasil	Danos à saúde e ambiente	Alternativa verde
Paraquat	Herbicida de contato, usado para dessecação pré-colheita (ANVISA, 2020a)	Proibido na União Europeia desde 2007 e na China desde 2015 (CETOX, 2020)	Proibido no Brasil desde 2020 (ANVISA, 2020)	Fibrose pulmonar; alta toxicidade para organismos aquáticos e contaminação do solo (Schöffel et al., 2020; Pereira et al., 2023)	Nanoherbicidas verdes: extratos vegetais encapsulados em nanopartículas para liberação controlada (Oyege et al., 2025)
Glifosato	Herbicida não seletivo, usado em soja, milho e cana (Siqueira; Bressiani, 2023)	Restrito em vários países da União Europeia; banido em Sri Lanka e México (México, 2020; Sri Lanka, 2015; European Commission, 2023)	Permitido no Brasil (ANVISA, 2020)	Suspeita de carcinogenicidade; contaminação de águas superficiais, redução da biodiversidade microbiana do solo (Lima; Boechat; Gucker, 2021)	
2,4-D	Herbicida seletivo em pastagens e cereais (ANVISA, 2019)	Não há evidências de proibição até a presente data.	Permitido no Brasil (ANVISA, 2019)	Potencial carcinogênico; deriva aérea, contaminação de cursos d'água e risco para plantas não alvas (Carvalho et al., 2020; EPA, 2025)	

Atrazina	Herbicida seletivo para milho e cana (Woitchik, 2024)	Proibida na União Europeia desde 2004 (European Commission, 2003)	Permitida no Brasil (ANVISA, 2025)	Disruptor endócrino; persistência no solo e lixiviação para lençóis freáticos (NPIC, s.d.; Pedrozo et al., 2024)	Nanossensores de grafeno para monitorar resíduos e alterar uso para nanoherbicidas verdes encapsulados (Li et al., 2024)
	Inseticida organofosforado para pragas em soja e algodão (Carvalho et al., 2020)	Proibido na União Europeia desde 2003 (European Commission, 2003)	Permitido no Brasil (Instituto Heinrich Böll, 2024)	Neurotoxicidade; contaminação de águas (Carvalho et al., 2020)	
Clorpirifós	Banido na União Europeia, Estados Unidos, Canadá e Argentina. Permitido na Índia e China. No Japão e Austrália o uso é restrito (Laguna; Ananias, 2023)				Nanopesticidas verdes: nanopartículas com encapsulação de liberação controlada (Oyege et al., 2025)
	Inseticida organofosforado para frutas e hortaliças (Martins, 2025)		No Brasil está sendo reavaliado sobre o uso (Laguna; Ananias, 2023)	Neurotoxicidade; contaminação de águas, risco para aves e abelhas (EPA, 2021)	
Endossulfam	Inseticida organoclorado (ANVISA, 2010)	Banido globalmente (Stockholm Convention, 2011)	Proibido no Brasil com banimento definitivo desde 2013 (ANVISA, 2010)	Bioacumulação, toxicidade reprodutiva; persistência ambiental e contaminação de cadeias alimentares (Brinati, 2011)	

Carbendazim	Fungicida para frutas e hortaliças (Souza, 2023)	Proibido na União Europeia desde 2021 (European Commission, 2021)	Proibido no Brasil desde 2022 (ANVISA, 2022)	Mutagênico; persistência no solo e toxicidade para organismos aquáticos (ANVISA, 2022; Souza, 2023)	Nanofungicidas
					verdes: nanopartículas biodegradáveis carregando extratos antifúngicos naturais (Lima, 2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por outro lado, o Brasil possui potencial para se destacar como líder em inovação agrícola sustentável. A adoção de agroquímicos verdes e nanotecnologias podem reduzir impactos ambientais e sociais, além de abrir novas oportunidades de mercado alinhadas às demandas globais por alimentos saudáveis e ambientalmente responsáveis (Sharma; Thakur, 2025).

Nanotecnologia aplicada à agricultura

A nanotecnologia é definida como a manipulação da matéria em escala nanométrica permitindo o desenvolvimento de materiais com propriedades únicas. Na agricultura, essa ciência tem se mostrado promissora ao possibilitar insumos mais eficientes e menos poluentes. Sua aplicação pode transformar o modo como nutrientes e defensivos são liberados no ambiente, aumentando a precisão e reduzindo desperdícios (Martin; Gómez Garay; Pintos, 2026).

O uso de nanopartículas em sistemas agrícolas permite maior controle sobre a absorção de nutrientes pelas plantas, além de oferecer mecanismos precisos de liberação gradual e direcionada. Isso reduz perdas por lixiviação e volatilização, problemas comuns nos insumos convencionais, além de impedir o desenvolvimento de resistência biológica, recuperando o controle

fitossanitário sem gerar resíduos persistentes no ecossistema. Dessa forma, a nanotecnologia contribui para uma agricultura mais sustentável e produtiva (Caviglioni, 2020; Wang et al., 2026).

Entre as técnicas mais utilizadas pode-se citar a produção de nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas e nanossensores. Os nanofertilizantes são aqueles projetados para fornecer nutrientes de forma mais eficiente, liberando-se gradualmente e de acordo com as necessidades da planta. Essa tecnologia reduz o desperdício e aumenta a produtividade agrícola, além de minimizar impactos ambientais (Pagano et al., 2025).

Os nanofertilizantes verdes já possuem aplicações concretas em diferentes culturas, um exemplo é o uso de nanopartículas verde de óxido de zinco biodegradáveis obtidas a partir do extrato bruto de *Withania coagulans* como agente redutor, que fomenta o crescimento, rendimento e a biofortificação de zinco em plantas de trigo. Ensaios realizados em nesta planta demonstraram aumento significativo no teor de clorofila, carotenoides, carboidratos e proteínas, e menor impacto ambiental, representando melhor absorção de nutrientes (Nazir et al., 2024). Outro caso é o nanofertilizante à base de fosfato de cálcio, que melhora a disponibilidade de fósforo no

solo e reduz perdas por lixiviação (Ramírez-Rodríguez et al., 2020).

Os nanopesticidas e nanoherbicidas oferecem maior seletividade no combate a pragas e plantas invasoras. Por meio da encapsulação de princípios ativos em nanopartículas, é possível controlar a liberação e reduzir a quantidade do produto necessária, diminuindo a contaminação ambiental e os riscos à saúde humana. Nesse contexto, já existem estudos em fase de aplicação utilizando extrato de nim, por exemplo, como fator inseticida natural (Oyege et al., 2025).

Já os nanossensores permitem o monitoramento em tempo real das condições do solo, da água e das plantas. Essa tecnologia possibilita uma agricultura de precisão, otimizando o uso de insumos. A integração de nanossensores como agroquímicos verdes cria sistemas inteligentes de manejo agrícola, alinhados às demandas globais por eficiência e sustentabilidade (Chaturvedi; Tripathi; Ranjan, 2025).

Entre os nanossensores verdes pode ser citado como exemplo o nanossensor de óxido de grafeno estudado por Li et al. (2022), que permite o monitoramento em tempo real sobre o estado hídrico das folhas sem necessidade de coleta destrutiva, e os nanossensores funcionalizados com tirosinase, investigados por Ballen et al. (2025), que demonstraram elevada capacidade de detectar herbicidas em baixas concentrações, como atrazina e simazina, em amostras de água de rios, nascentes e provenientes da pulverização de lavouras de milho. Essa abordagem contribui para o ajuste no uso de defensivos sustentáveis e para a prevenção de impactos ambientais (Li, et al., 2022; Ballen et al., 2025).

Assim sendo, evidencia-se que as rotas de síntese das nanoestruturas verdes, embora diversas, compartilham o objetivo de reduzir impactos ambientais e aumentar a eficiência

agronômica, reforçando o papel da nanotecnologia como aliada da agricultura sustentável (Oyege et al., 2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada evidencia que a integração entre nanotecnologia e agroquímicos verdes representa um dos caminhos mais promissores para enfrentar os desafios da agricultura contemporânea. Ao longo do estudo, verificou-se que os insumos convencionais, embora tenham sustentado a produtividade durante a Revolução Verde, acarretaram impactos ambientais, sociais e de saúde pública significativos. Nesse cenário, a nanotecnologia surge como alternativa estratégica, capaz de potencializar a eficiência agrônômica por meio de nanofertilizantes, nanopesticidas, nanoherbicidas e nanossensores, reduzindo perdas e promovendo maior seletividade.

Os resultados discutidos demonstram que a convergência entre inovação tecnológica e sustentabilidade pode contribuir para sistemas agrícolas mais resilientes, produtivos e alinhados às demandas globais por segurança alimentar e preservação dos recursos naturais. A adoção de defensivos sustentáveis e o uso de nanossensores para monitoramento em tempo real reforçam a possibilidade de uma agricultura de precisão, capaz de otimizar insumos e prevenir impactos ambientais.

Além disso, o estudo destaca que essa transição não é apenas técnica, mas também política e econômica, uma vez que práticas agrícolas sustentáveis aumentam a competitividade internacional e atendem às exigências de mercados que demandam alimentos livres de resíduos tóxicos. Assim, a nanotecnologia aplicada à síntese de agroquímicos verdes deve ser compreendida como parte de um movimento

global em direção à sustentabilidade, em consonância com as metas da ONU para o desenvolvimento sustentável.

Portanto, conclui-se que a integração entre ciência de materiais e práticas agrícolas sustentáveis não apenas oferece soluções inovadoras para os problemas atuais, mas também projeta um futuro em que a agricultura poderá conciliar produtividade, segurança alimentar e preservação ambiental.

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 28**, de 9 de agosto de 2010: Regulamento técnico para o ingrediente ativo Endossulfam em decorrência da Reavaliação Toxicológica. Brasília: ANVISA, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Agrotóxico 2,4-D passa a ter restrições na aplicação**. Brasília, 14 maio 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2019/agrotoxico-24-d-passa-a-ter-restricoes-na-aplicacao>. Acesso em: 26 maio 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 428**, de 7 de outubro de 2020: altera a Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 177, de 21 de setembro de 2017, que dispõe sobre a proibição do ingrediente ativo Paraquate em produtos agrotóxicos no país e sobre as medidas transitórias de mitigação de riscos. Brasília: ANVISA, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 441**, de 2 de dezembro de 2020: dispõe sobre a manutenção do ingrediente ativo Glifosato em produtos agrotóxicos no País, determina medidas de mitigação de riscos à saúde e alterações no registro decorrentes da sua reavaliação toxicológica. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 dez. 2020. p. 372.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 739**, de 8 de agosto de 2022: dispõe sobre a proibição do ingrediente ativo Carbendazim em produtos agrotóxicos no país e sobre as medidas transitórias de mitigação de riscos. Brasília: ANVISA, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Monografia da substância ativa Atrazina (A14)**. Brasília, DF: Anvisa, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias/monografias-autorizadas/a/4141json-file-1/view>. Acesso em: 30 jul. 2026.
- ALMEIDA, Taís Santos de; UMEZU, Palloma de Souza; SILVA, Atailson Oliveira da; SOUSA, Marcelo Henrique; ROSA, Eliane Vieira. Nanotecnologia na agricultura: análise bibliométrica e aplicação de diferentes nanomateriais. **Revista Eixo**. v. 15, n. 1, e06, 2026. Disponível em: <https://revistaeixo.ifb.edu.br/index.php/revistaeixo/artic/e/view/224>. Acesso em: 26 de maio 2026.
- ANJOS, Fernando Yuri Silva dos; CARDOSO, Silvânio Júnior Marques; OLIVEIRA, Rafaela de Kássia;
- AYOUB, Liyaqat; YAQOOB, Munazah; KANTH, Raihana H.; WANI, Fehim J.; SHAH, Zahoor Ahmad; DAR, Ejaz Ahmad; WANI, Fazil Fayaz; MIR, Mohd Salim; NAIKOO, Nasir Bashir; GULL, Audil; ARIFIE, Uzma; ALWASEL, Yasmeen A.; ALWAHIBI, Mona S. Exposure to organophosphate insecticides induces behavioral changes and acetylcholinesterase inhibition in *Apis mellifera*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 287, 117279, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651324013551>. Acesso em: 26 de maio 2026.
- BALLEN, Sandra C.; SILVA, Diego Maroso; MACHADO, Eliel Pereira; SOARES, Andrey Coatrini; CORREA, Danja Rosa; SANTOS, Helen Cristina dos; JACQUES, Rosângela Assis; STEFFENS, Juliana; STEFFENS, Clarice. Enhanced detection of atrazine and simazine in agricultural and environmental waters using graphene oxide/tyrosinase nanobiosensors. **Microchemical Journal**. v. 214, 114000, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026265X25013542>. Acesso em: 26 de maio 2026.
- BRINATI, Alessandro. **Efeitos toxicológicos do inseticida endossulfan sobre o metabolismo de morcegos frugívoros *Artibeus lituratus* e análise do bioacúmulo no tecido adiposo e hepático**. 2011. Dissertação (Mestrado em Biologia Animal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/2252>. Acesso em: 26 maio 2026.
- CAMPAGNOLLA, Clayton; MACÊDO, Manoel Moacir Costa. Revolução Verde: passado e desafios atuais. **Cadernos de Ciências & Tecnologia**, v. 39, n. 1, e26952, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362562729_R-evolucao_Verde_passado_e_desafios_atuais. Acesso em: 26 de maio 2026.
- CARVALHO, Nathália Leal; BESTER, Adriano Udich; MELO, Mario Ormirio Bandeira de; MELLO, Marlon Bandeira de; PEREIRA, Émerson André; LUCCHESI, Osório Antônio. Os efeitos das moléculas de 2,4D, acefato e tebuconazol sobre o meio ambiente e organismos não alvos. **Revista Monografias Ambientais**, v. 19, e2, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/39624/pdf>. Acesso em: 26 de maio 2026.
- CARVALHO, Lucas Barbosa Ribeiro de. **Agrotóxicos e sua relação com o meio ambiente e a saúde: uma modelagem in silico de perfil toxicológico e revisão de alternativas para redução de contaminação**. 2024.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Saúde) — Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2024. Disponível em: <https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/5213>. Acesso em: 26 maio 2026.

CAVIGLIONI, Marlene de Barros Coelho. **Técnicas nanotecnológicas para a agricultura e pecuária: um enfoque em controle de pragas e doenças, nutrição e saúde animal**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2020. 50 p. (Documentos / Embrapa Gado de Corte, 273). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1120123>. Acesso em: 26 maio 2026.

CENTRO DE ESTUDOS EM TOXICOLOGIA (CETOX/UFC). **Boletim nº 12**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2020. (Série Boletim CETOX). Disponível em: <http://www.cetox.ufc.br/boletins/boletim.html>. Acesso em: 26 maio 2026.

CHATURVEDI, Ambika; TRIPATHI, Deepti; RANJAN, Rajiv. Nano-enabled biosensors in early detection of plant diseases. **Frontiers in Nanotechnology**. v. 7, e1545792, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/nanotechnology/articles/10.3389/fnano.2025.1545792/full>. Acesso em: 26 de maio 2026

CHIMAL-ÁLVAREZ, Rafael; ARENAS-ALATORRE, Jesús Ángel; MARICHI-RODRÍGUEZ, Francisco; CORREA-PRADO, Rodrigo; ÁLVAREZ-PÉREZ, Marco Antonio. La química verde en la síntesis de nanopartículas y sus propiedades antibacterianas. **Mundo Nano**, v. 18, n. 34, e69826, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mn/v18n34/2448-5691-mn-18-34-e69826.pdf>. Acesso em: 26 de maio 2026.

COSTA, Adilson Vidal; PROFETI, Demetrius; PARREIRA, Luciana Alves; PROFETI, Luciene Paula Roberto (org.). **Tópicos especiais em agroquímica IV**. Alegre, ES: UFES, 2024. Disponível em: https://agroquimica.alegre.ufes.br/sites/agroquimica.alegre.ufes.br/files/field/anexo/topicos_especiais_em_agroquimica_iv.pdf. Acesso em: 26 maio 2026.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

EPA (United States Environmental Protection Agency). **Pesticide regulatory decisions**. Washington: EPA, 2019, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov>.

EUROPEAN COMMISSION. **Commission Decision of 25 March 2003 concerning the non-inclusion of acephate in Annex I to Council Directive 91/414/EEC and the withdrawal of authorisations for plant protection products containing this active substance (2003/219/EC)**. Official Journal of the European Union, L 82, p. 49-50, 2003. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2003/219/oj/eng>. Acesso em: 27 maio 2026.

EUROPEAN COMMISSION. **Regulamento de Execução (UE) 2021/348 da Comissão, de 25 de**

fevereiro de 2021, relativo à não renovação da aprovação da substância ativa carbendazim, em conformidade com o Regulamento (CE) n.º 1107/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho, e à retirada das autorizações de produtos fitofarmacêuticos que a contenham. Jornal Oficial da União Europeia, L 70, p. 6-8, 2021. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/ALL/?uri=CELEX:32021R0348>. Acesso em: 26 maio 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Pesticides use and trade: 1990–2023**. Rome: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/pesticides-use-and-trade-1990-2023/en>. Acesso em: 30 jul. 2026.

FREITAS, Lucinéia Miranda de; BONFATTI, Renato; VASCONCELLOS, Luiz Carlos Fadel de. Impactos da pulverização aérea de agrotóxicos em uma comunidade rural em contexto de conflito. **Saúde Debate**, v. 46, n. 2, p. 224-235, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/XRcW7grFWTrDgCTJg4d9WmP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 de mai. 2026.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL. **Atlas do agrotóxico 2024: segunda edição**. São Paulo: Fundação Heinrich Böll, 2024. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2024-05/240416-atlas-do-agrotoxico-2024-segunda-edicao.pdf>. Acesso em: 26 maio 2026.

GRAZZIOTIN, Luciane Sgarbi; KLAUS, Viviane; PEREIRA, Ana Paula Marques. Pesquisa documental histórica e pesquisa bibliográfica: focos de estudo e percursos metodológicos. **Pro-Posições**. v. 33, e20200141, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pp/a/GJCbBcY4rdVdvQY56T9qLRQ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 de maio 2026.

KRIPPENDORFF, Klaus. **Content Analysis: An Introduction to Its Methodology**. 3rd ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2013.

LAGUNA, Ana Laura Frazão; ANANIAS, Fernando. Avaliação dos resíduos de clopirifós no leite bovino e sua implicação na saúde humana. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 2, p. 1853-1865, 2023. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/60992>. Acesso em: 26 de maio 2026.

LI, Denghua; LI, Ganqiong; LI, Jianzheng; XU, Shiwei. Wearable crop sensor based on nano-graphene oxide for noninvasive real-time monitoring of plant water. **Membranes**, v. 12, n. 4, p. 358, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/12/4/358>. Acesso em: 26 de maio 2026.

LIMA, Igor Barbosa; BOECHAT, Iola; GUCKER, Björn. Glifosato no Brasil: uso, contaminação aquática, efeitos ambientais e perigos para a saúde humana. **Caderno de Geografia**. v. 31, n. 1, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/349256096_Glifosato_no_Brasil. Acesso em: 26 de maio 2026.

LIMA, Guilherme Fernando de Souza. **Desenvolvimento de nanopartículas com potencial biofungicida**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2022. Disponível em: [inserir URL específica do repositório UTFPR]. Acesso em: 26 maio 2026.

LIMA, Ana Alice Lemos; OLIVEIRA, Bruna Sarmiento; SILVA, Samantha Corrêa Batista da; MACEDO, Rafaela Gutierrez Zeitoune; HOLANDA, Jamile Rodrigues Cosme de. Análise epidemiológica das intoxicações exógenas por agrotóxicos agrícolas nas regiões brasileiras no período de 2014 a 2023. **Revista de Medicina**, v. 104, n. 2, e-229290, 2025. Disponível em: https://revistas.usp.br/revistadc/pt_BR/article/view/229290. Acesso em: 26 de maio 2026.

MARTIN, M^a Carmen; GÓMEZ GARAY, Arancha; PINTOS, Beatriz. Green nanotechnology in sustainable agriculture: plant-based synthesis of metallic nanoparticles for crop protection and productivity. **Applied Sciences**, v. 16, n. 8, 3867, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/16/8/3867>. Acesso em: 26 de maio 2026.

MARTINS, Flavia de Oliveira. **Revisão de estudos sobre a toxicidade dos herbicidas glifosato, 2,4-D e atrazina em modelo de zebrafish**. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Farmácia-Bioquímica) — Universidade Federal de São Paulo, Campus Diadema, Diadema, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/bitstreams/5b06c787-cf7e-41b5-a4a0-91463dd61cd0/download>. Acesso em: 26 maio 2026.

MARTINS, Nubya Camylle Almeida. **Clorpirifós em alimentos no Brasil: uma revisão integrativa sobre limites de resíduos, toxicidade e regulação nacional**. 2025. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) — Universidade de Sorocaba, Sorocaba, 2025. Disponível em: <https://repositorio.uniso.br/handle/uniso/1998>. Acesso em: 26 maio 2026.

MÉXICO. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. **Decreto por el que se establecen las acciones que deberán realizar las dependencias y entidades que integran la Administración Pública Federal, en el ámbito de sus competencias, para sustituir gradualmente el uso, adquisición, distribución, promoción e importación de la sustancia química denominada glifosato y de los agroquímicos utilizados en nuestro país que lo contienen como ingrediente activo, por alternativas sostenibles y culturalmente adecuadas, que permitan mantener la producción y resulten seguras para la salud humana, la diversidad biocultural del país y el ambiente**. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 31 dic. 2020. Disponível em: <http://sidof.segob.gob.mx/notas/5609365>. Acesso em: 26 maio 2026.

MIRA, Artemio Bezerra de; MIRA, Acácio Bezerra de. A química verde aplicada à agronomia na produção de insumos agrícolas sustentáveis: uma revisão

bibliográfica. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 2, 2025. Disponível em: <https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/3451/3507>. Acesso em: 26 de maio 2026.

NATIONAL PESTICIDE INFORMATION CENTER (NPIC). **Atrazine Fact Sheet**. Corvallis: Oregon State University, [s.d.]. Disponível em: <https://npic.orst.edu/factsheets/atrazine.html>. Acesso em: 26 maio 2026.

NAZIR, Muneeba Anum; HASAN, Murtaza; MUSTAFA, Ghazala; TARIQ, Tuba; AHMED, Muhammad Mahmood; DEHNO, Rosa Golzari; GHORBANPOUR, Mansour. Zinc oxide nano-fertilizer differentially effect on morphological and physiological identity of redox-enzymes and biochemical attributes in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 14, 13091, 2024. Disponível em: <file:///C:/Users/Angela/Downloads/s41598-024-63987-9.pdf>. Acesso em: 26 de maio 2026.

NOGUEIRA, Maria Vanessa Moura. **As dissonâncias da Lei 14.785/2023 com a gestão de agrotóxicos propostas pelo sistema internacional e pela União Europeia**. 2024. Monografia (Graduação em Direito) — Faculdade de Direito, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78937>. Acesso em: 26 maio 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: Organização das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 26 maio 2026.

OYEGE, Ivan; SWITZ, Alexi; OQUENDO, Lauren; PRASAD, Anamika; BHASKAR, Maruthi Sridhar Balaji. Green synthesis of nem extract and nem oil-based azadirachtin nanopesticides for fall Armyworm control and management. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 295, 118168, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651325005044>. Acesso em: 26 de maio 2026.

PAGANO, Mario; LUNETTA, Erika; BELL, Francesco; MOCARLI, Giacomo; COCOZZA, Claudia; CACCIOTTI, Ilaria. Advancements in agricultural nanotechnology an updated review. **Plants**, v. 14, n. 18, 2939, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/18/2939>. Acesso em: 26 de maio 2026.

PEDROZO, Anieli Loiza; ODA, Humberto Manabu; DOGAN, Nasle; MATUSIAKI, Weslen Fernandes da Silva, INOUE, Miriam Hiroko. Atrazina como desregulador endócrino e seus efeitos na saúde reprodutiva masculina. **Revista Aracê**, v. 6, n. 2, p. 2131-2148, 2024. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/791>. Acesso em: 26 de maio 2026.

PEREIRA, Fernanda Silva Hojas; MOURA, Leonardo Cordeiro; SIQUEIRA, Daniel Emilio Dalledone; CHESCI, Ramon Cavalcanti. Intoxicação cutânea grave por Paraquat. **Medicina**, v. 56, n. 2, e-1204400,

2023. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rmrp/article/view/204400>. Acesso em: 26 de maio 2026.

PINHO, Alexandra de; CALHEIROS, Débora F.; ALMEIDA, Fernanda S.; ZERLOTTI, Patrícia; CERREALI, Mariana; FEIDEN, Alberto; MACHADO, Franciele F.; ZANELLA, Renato. Agrotóxicos e violações nos direitos à saúde e à soberania alimentar em comunidades Guarani Kaiowá de MS, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 29, n. 12, e-06462024, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/9ZzS5wXvRkJ8bL8wZp8Xw7q/>. Acesso em: 26 de maio 2026.

RAMÍREZ- RODRÍGUEZ, Gloria B.; SASSO, Gregorio Dal; CARMONA, Francisco J.; MIGUEL-ROJAS, Cristina; PÉREZ-DE-LUQUE, Alejandro; MASCIOCCHI, Norberto; GUAGLIARDI, Antonietta; DELGADO-LÓPEZ José M. Engineering biomimetic calcium phosphate nanoparticles: a green synthesis of slow-release multinutrient (NPK) nanofertilizers. **ACS Applied Bio Materials**, v. 3, n. 3, p. 1344-1353, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/aabmcb/article/3/3/1344/511553/Engineering-Biomimetic-Calcium-Phosphate>. Acesso em: 26 de maio 2026.

RODRIGUES, José Junho; MOURA, Brígida Lima Candeia; COSTA, Kylvia Luciana Pereira; ADRIANO, Maryanne Pereira Franco; NOGUEIRA, Virgínia de Fátima Bezerra; DANTAS, Jussara Silva; SOUSA, Adriana Paulino de; ABREU, Luzenir Paiva Maciel de; SOUZA, Dayanne Pereira Soares de; SILVA, Francisco Laurêncio Rodrigues da; NÓBREGA, José Renan Alexandre da; BRUNET, Francivalda Bandeira de Sousa. Impactos dos agrotóxicos na saúde dos trabalhadores rurais: riscos e desafios no contexto agrícola. **IOSR Journal of Humanities and Social Science**, v. 30, n. 4, p. 53-60, 2025. Disponível em: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jhss/papers/Vol.30-Issue4/Ser-8/I3004085360.pdf>. Acesso em: 26 de maio 2026.

ROSSATO, Vinícius B. **Da revolução verde à transformação ecológica: a consolidação do modelo de produção agroalimentar no Brasil e o papel das políticas públicas**. 2024. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas e Desenvolvimento) — Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, DF, 2024. Disponível em: [inserir URL do repositório Ipea]. Acesso em: 26 maio 2026.

SCHÖFFEL, Emanuel Goergen et al. Biocidas: um olhar ao Paraquat. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 28., 2020, Ijuí. **Anais do XXVIII Seminário de Iniciação Científica**. Ijuí: Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), 2020. Disponível em: <https://publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salao-conhecimento/article/view/18251>. Acesso em: 26 maio 2026.

SHARMA, Vandna; THAKUR, Sveta. **Rop protection in the nano era: revolutionizing agriculture with biological nanopesticides**. In: [AUTOR(ES)/EDITOR(ES) DO LIVRO]. [Título do livro da ACS Symposium Series]. Washington, DC: American

Chemical Society, 2025. p. [páginas]. Disponível em: [URL]. Acesso em: 26 maio 2026.

SILVA, Daniele Cariolano da; MARTINS JÚNIOR, Francisco Ranulfo Freitas; SILVA, Tatiana Maria Ribeiro; NUNES, João Batista Carvalho. Características de pesquisas qualitativas: estudo em teses de um programa de pós-graduação em educação. **Educação em Revista**, v. 38, e26895, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/edur/a/vfYpxdKhR6BBSrf3YpSHjqz/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em 26 de maio 2026.

SIQUEIRA, Bárbara Bermudes; BRESSIANI, Thaiany Souza Cana. O uso de agrotóxicos e os impactos na saúde do trabalhador rural: uma revisão sobre o herbicida glifosato. **Vértices**, v. 25, n. 2, e25218576, 2023. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/6257/625774959003/625774959003.pdf>. Acesso em: 26 de maio 2026.

SOUZA, Caio Nunes de. **Degradação enzimática do fungicida carbendazim utilizando microesferas de alginato-quitosana-peroxidase**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciências Ambientais) — Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Imperatriz, MA, 2023. Disponível em: <https://repositorio.uemasul.edu.br/handle/123456789/423>. Acesso em: 26 maio 2026.

SOUZA, Victor Ventura de. **Efeitos ecogenotóxicos e reprodutivos da atrazina em ambientes aquáticos: avaliação dos impactos atuais e futuros**. Tese (Doutorado em Ciências – Biologia Celular) — Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/XXXX>. Acesso em: 26 maio 2026.

SRI LANKA. **Department of Government Printing**. Government Gazette Extraordinary No. 1933/16. Colombo: Department of Government Printing, 2015. Disponível em: <https://www.documents.gov.lk/>. Acesso em: 26 maio 2026.

STOCKHOLM CONVENTION. **United Nations targets widely-used pesticide endosulfam for phase out**. Geneva, Switzerland, 3 May 2011. Disponível em: <https://chm.pops.int/TheConvention/PublicAwareness/PressReleases/COP5Geneva%2C3May2011Endosulfanphaseout/tabid/2216/Default.aspx>. Acesso em: 30 de jul. 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Chlorpyrifos; Tolerance Revocations**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/chlorpyrifos>. Acesso em: 26 maio 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **2,4-D: Registration Review; draft human health and ecological risk assessments**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2025. Disponível em: [inserir URL específica do documento]. Acesso em: 26 maio 2026.

WACHEKOWSKI, Giovana; FIGUEIREDO, Thaysi Carenet; RIZZI, Julia Lazzari; SOARES, Narciso Vieira. **Agrotóxicos, revolução verde e seus impactos na sociedade: revisão narrativa de literatura**. In: SALÃO DO CONHECIMENTO UNIJUÍ, 7., 2021, Ijuí. Anais do Salão do Conhecimento UNIJUÍ: XXVI Jornada de Pesquisa. Ijuí: UNIJUÍ, 2021. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/view/20712>. Acesso em: 26 maio 2026.

WANG, Yujiao; TANG, Zhiwei; TABUSIBIEKE, Chuhela; GAO, Haixiang; LU, Wei. Nanopesticides by design: a review of delivery platforms, environmental fate, and standards for safe and sustainable crop protection. **Molecules**, v. 31, n. 3, p. 453, 2026. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/31/3/453>. Acesso em: 26 de maio 2026.

WOITCHIK, Kerolaine. **Panorama de comercialização e utilização da atrazina no Paraná e no Brasil**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Fitossanidade) — Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/97334>. Acesso em: 26 maio 2026.

YASIR, Muhammad; HOSSAIN, Abul; PRATAP-SINGH, Anubhav. Pesticide degradation: impacts on soil fertility and nutrient cycling. **Environments**, v. 12, n. 8, p. 272, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/12/8/272>. Acesso em: 26 de maio 2026.

ZAMAN, Wajid; AYAZ, Asma; PARK, SeonJoo. Nanomaterials in agriculture: a pathway to enhanced plant growth and abiotic stress resistance. **Plants**, v. 14, n. 5, p. 716, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/5/716>. Acesso em: 26 de maio 2026.