



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília
Campus Samambaia
Pós-Graduação *Lato Sensu* em Gerenciamento Ambiental

RAFAELLA RUSSOLYNE MARQUES SILVA

**A CONTRIBUIÇÃO DOS BIOINSUMOS NA PROMOÇÃO DA
SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA: benefícios para a gestão ambiental**

Brasília
2026

RAFAELLA RUSSOLYNE MARQUES SILVA

**A CONTRIBUIÇÃO DOS BIOINSUMOS NA PROMOÇÃO DA
SUSTENTABILIDADE AGRÍCOLA: benefícios para a gestão ambiental**

Artigo apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília, *Campus* Samambaia, curso de pós-graduação *lato sensu* em Gerenciamento Ambiental, como requisito parcial para a obtenção de diploma de especialista em Gerenciamento Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Regina Mayumi Kikuchi

Coorientador: Dr. Marcelo Tavares de Castro

Brasília
2026

Silva, Rafaella Russolyne Marques.

A contribuição dos bioinsumos na promoção da sustentabilidade agrícola: benefícios para a gestão ambiental / Rafaella Russolyne Marques Silva ; orientação Regina Mayumi Kikuchi ; coorientação Marcelo Tavares de Castro. — Samambaia, DF: 2026.
40 f. : il. color. ; 30 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gerenciamento Ambiental) — Campus Samambaia, Instituto Federal de Brasília, Samambaia DF, 2026.

Orientador(a): Regina Mayumi Kikuchi ; Coorientador(a): Marcelo Tavares de Castro.

1. Agricultura sustentável. 2. Agroecologia e agricultura regenerativa. 3. Manejo ambiental. 4. Ecossistema agrícola. I. Kikuchi, Regina Mayumi, orient. II. Castro, Marcelo Tavares de, coorient. III. Instituto Federal de Brasília. IV. Título.

RESUMO

A agricultura sustentável tem se consolidado como eixo estratégico diante das mudanças climáticas, da pressão por aumento da produtividade e da necessidade de redução dos impactos ambientais associados à produção de alimentos. Nesse cenário, os bioinsumos, incluindo biofertilizantes, inoculantes, bioinseticidas e bioestimulantes, têm se destacado como soluções tecnológicas capazes de promover maior eficiência agrônômica com menor dependência de insumos químicos sintéticos. O estudo teve como objetivo analisar de que forma os bioinsumos contribuem para a promoção da sustentabilidade agrícola, com ênfase em seus benefícios para a gestão ambiental. A pesquisa possui caráter bibliográfico, exploratório e qualitativo, e foram revisadas produções científicas publicadas entre 2000 e 2026, em português, inglês e espanhol. A busca foi realizada nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO, nas quais foram identificados 230 estudos. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão e das etapas de seleção conforme as diretrizes PRISMA, 24 estudos compuseram a revisão final. Os resultados evidenciam que o uso de bioinsumos contribui significativamente para a redução do uso de fertilizantes sintéticos e agrotóxicos, favorecendo a mitigação de impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água e a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, observa-se a promoção da biodiversidade microbiana, melhoria da estrutura e fertilidade do solo, aumento da eficiência no uso de nutrientes e maior resiliência das culturas frente a estresses abióticos, especialmente em cenários de variabilidade climática. Dados recentes indicaram uma expansão expressiva do mercado de bioinsumos no Brasil e no mundo, impulsionada por avanços biotecnológicos, políticas públicas de incentivo e crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis. Contudo, persistem desafios relevantes, como a variabilidade de desempenho em diferentes condições edafoclimáticas, limitações na padronização de formulações, lacunas regulatórias, especialmente no que se refere aos bioestimulantes, e barreiras técnicas e econômicas para adoção em larga escala. Conclui-se que os bioinsumos representam ferramentas estratégicas para a transição agroecológica e para a intensificação sustentável da agricultura. Entretanto, destaca-se a necessidade de aprofundamento em pesquisas de longo prazo, maior integração entre ciência, setor produtivo e políticas públicas e aprimoramento dos marcos regulatórios, a fim de ampliar sua eficácia, segurança e aplicabilidade no contexto agrícola contemporâneo.

Palavras-chave: Agricultura sustentável. Agroecologia e agricultura regenerativa. Manejo ambiental. Ecossistema agrícola.

ABSTRACT

Sustainable agriculture has become a strategic pillar in response to climate change, increasing pressure for higher productivity, and the need to reduce the environmental impacts associated with food production. In this context, bioinputs, including biofertilizers, inoculants, bioinsecticides, and biostimulants, have emerged as technological solutions capable of improving agronomic efficiency while reducing dependence on synthetic chemical inputs. This study aimed to analyze how bioinputs contribute to the promotion of agricultural sustainability, with an emphasis on their benefits for environmental management. The research is bibliographic, exploratory, and qualitative in nature, based on a review of scientific publications published between 2000 and 2026 in Portuguese, English, and Spanish. The literature search was conducted in the PubMed, Scopus, Web of Science, and SciELO databases, where a total of 230 studies were identified. After applying the inclusion and exclusion criteria and following the selection process according to the PRISMA guidelines, 24 studies were included in the final review. The results demonstrate that the use of bioinputs significantly contributes to reducing the use of synthetic fertilizers and pesticides, thereby mitigating environmental impacts such as soil and water contamination and greenhouse gas emissions. Furthermore, bioinputs promote microbial biodiversity, improve soil structure and fertility, enhance nutrient use efficiency, and increase crop resilience to abiotic stresses, particularly under conditions of climate variability. Recent evidence has also indicated a substantial expansion of the bioinputs market in Brazil and worldwide, driven by biotechnological advances, supportive public policies, and the growing demand for sustainable agricultural practices. However, important challenges remain, including variability in performance under different edaphoclimatic conditions, limitations in formulation standardization, regulatory gaps, particularly regarding biostimulants, and technical and economic barriers to large-scale adoption. It is concluded that bioinputs represent strategic tools for the agroecological transition and the sustainable intensification of agriculture. Nevertheless, there is a need for further long-term research, greater integration among science, the productive sector, and public policies, as well as improvements in regulatory frameworks, in order to enhance their effectiveness, safety, and applicability in contemporary agricultural systems.

Keywords: Sustainable agriculture. Agroecology and regenerative agriculture. Environmental management. Agricultural ecosystem.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	8
2.1 DEFINIÇÃO DE BIOINSUMOS	8
2.1.1 Tipos de bioinsumos.....	10
2.1.1.1 Biofertilizantes.....	10
2.1.1.2 Bioestimulantes.....	12
2.1.1.3 Inoculantes microbianos	14
2.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E SOCIAIS	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS E ECOLÓGICOS	26
4.2 ASPECTOS ECONÔMICOS	29
4.3 PROBLEMAS E PERSPECTIVAS	31
CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o debate sobre sustentabilidade agrícola intensificou-se em função das mudanças climáticas, da degradação ambiental e da crescente demanda por alimentos em escala global (Barros, 2021).

Os bioinsumos, definidos como produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana, têm como finalidade otimizar a produção agropecuária por meio da melhoria da qualidade do solo, estímulo ao crescimento vegetal, aumento da resistência a pragas e doenças e incremento da produtividade agrícola (Kour *et al.*, 2020). Entre os principais grupos de bioinsumos destacam-se os biofertilizantes, os inoculantes microbianos, os bioinseticidas e os bioestimulantes, os quais vêm sendo amplamente estudados e incorporados aos sistemas produtivos modernos (Florencio *et al.*, 2022).

Os biofertilizantes atuam principalmente por meio da ação de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio e solubilizadoras de fósforo, contribuindo para o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e para a melhoria de sua fertilidade (Barros, 2021; EMBRAPA, 2023). Os bioinseticidas, por sua vez, são formulados a partir de organismos vivos ou seus metabólitos, incluindo fungos, bactérias e vírus, e desempenham papel relevante no controle biológico de pragas e doenças, reduzindo a dependência de defensivos químicos sintéticos (Seenivasagan; Babalola, 2021; MAPA, 2025). Já os inoculantes microbianos promovem interações simbióticas com as plantas, especialmente em culturas leguminosas, favorecendo processos como a fixação biológica de nitrogênio e a absorção eficiente de nutrientes (Florencio *et al.*, 2022).

O modelo agrícola baseado no uso intensivo de insumos químicos tem sido associado a diversos impactos negativos, como a contaminação de solos e recursos hídricos, a perda de biodiversidade e o aumento das emissões de gases de efeito estufa (FAO, 2024). No Brasil, esse cenário é particularmente relevante, considerando que o país permanece entre os maiores consumidores de defensivos agrícolas do mundo, o que reforça a necessidade de transição para sistemas produtivos mais sustentáveis (OECD, 2025).

Nesse contexto, os bioinsumos emergem como alternativas estratégicas para a redução da dependência de insumos sintéticos e para a promoção de sistemas agrícolas mais resilientes (EMBRAPA, 2023). Além de contribuírem para a mitigação

de impactos ambientais, esses produtos favorecem a biodiversidade do solo, aumentam a eficiência no uso de nutrientes e água e ampliam a capacidade das culturas de resistirem a estresses abióticos, como seca e variações térmicas (Croplife Brasil, 2025).

Adicionalmente, observa-se uma expansão significativa do mercado de bioinsumos no Brasil e no mundo, impulsionada por avanços biotecnológicos, incentivos governamentais e pela crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis (MAPA, 2025). O fortalecimento de políticas públicas, como o Programa Nacional de Bioinsumos, e o aumento no registro de produtos biológicos têm contribuído para consolidar esse segmento como um dos mais dinâmicos do agronegócio contemporâneo (MAPA, 2025; Croplife Brasil, 2025).

A adoção de bioinsumos também está alinhada a abordagens inovadoras, como a agricultura regenerativa e a agroecologia, que buscam restaurar a saúde dos ecossistemas agrícolas, promover a ciclagem de nutrientes e aumentar a captura de carbono no solo (Gonçalves, 2017). Essas estratégias são consideradas fundamentais para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos no longo prazo (FAO, 2024).

Assim, como pergunta de pesquisa, busca-se responder: de que maneira os bioinsumos contribuem para a sustentabilidade agrícola, considerando seus benefícios para a gestão Ambiental? Parte-se da hipótese de que a adoção dessas tecnologias pode reduzir significativamente os impactos ambientais associados ao uso de fertilizantes e defensivos químicos, ao mesmo tempo em que promove maior eficiência produtiva e equilíbrio ecológico nos agroecossistemas.

Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo analisar de que forma os bioinsumos contribuem para a promoção da sustentabilidade agrícola, com ênfase em seus benefícios para a gestão ambiental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO DE BIOINSUMOS

No Brasil, o setor agropecuário passou por expressivas transformações nas últimas décadas, o que consolidou o país como um dos principais produtores e exportadores de *commodities* agrícolas em escala global (Gonçalves *et al.*, 2017). Esse avanço foi impulsionado por fatores como investimentos em pesquisa e inovação, modernização tecnológica, expansão da infraestrutura logística e condições edafoclimáticas (refere-se ao conjunto de características do solo – edáficas - e do clima – climáticas - de uma determinada região) favoráveis (OECD, 2025).

Apesar desse crescimento, o modelo produtivo baseado no uso intensivo de insumos químicos tem gerado preocupações significativas relacionadas à sustentabilidade ambiental e à saúde pública. O uso excessivo de fertilizantes sintéticos e agrotóxicos está associado à degradação da qualidade do solo, contaminação de recursos hídricos, perda de biodiversidade e riscos toxicológicos para humanos e animais (Barros, 2021; FAO, 2024). Nesse contexto, emerge a necessidade de transição para sistemas produtivos mais sustentáveis, que conciliem produtividade e conservação ambiental, com redução progressiva da dependência de insumos químicos (Florencio *et al.*, 2022).

Diante desse cenário, os bioinsumos ganham destaque como alternativas estratégicas. No Brasil, a institucionalização desse conceito ocorreu com a criação do Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), por meio da Lei nº 15.070/2024, que visa promover o desenvolvimento, a produção e o uso de insumos biológicos na agropecuária (Brasil, 2020). O programa estabelece diretrizes voltadas à inovação tecnológica, sustentabilidade produtiva e aproveitamento da biodiversidade nacional, incentivando a integração entre pesquisa científica, setor produtivo e políticas públicas (Vidal *et al.*, 2021; MAPA, 2025).

O conceito de bioinsumos é amplo e abrange produtos, processos ou tecnologias de origem vegetal, animal ou microbiana destinados a otimizar sistemas de produção agropecuária, florestal e aquícola. Esses insumos atuam diretamente nos processos biológicos, físico-químicos e ecológicos, influenciando positivamente o crescimento, desenvolvimento e resistência de plantas, animais e microrganismos (Brasil, 2020; EMBRAPA, 2023).

De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), os bioinsumos incluem diversas categorias, como biofertilizantes, inoculantes microbianos, bioinseticidas, bioestimulantes, extratos vegetais, substâncias bioativas e agentes de controle biológico (MAPA, 2025). Entre esses, destacam-se os produtos biológicos utilizados no manejo de pragas e doenças, que podem ser classificados em macrobiológicos (insetos, ácaros e nematoides), microbiológicos (fungos, bactérias e vírus), semioquímicos (como feromônios), bioquímicos (hormônios) e fitoquímicos (compostos derivados de plantas) (Xavier, 2022).

No contexto brasileiro, a regulamentação dos bioinsumos avançou significativamente com a promulgação da Lei nº 15.070/2024, que estabelece diretrizes específicas para a produção, registro, comercialização e utilização desses insumos. Esse marco legal representa um avanço importante para o fortalecimento da inovação no setor agrícola, especialmente em um cenário de crescente demanda por soluções sustentáveis (Brasil, 2024).

A nova legislação substitui a fragmentação normativa anteriormente baseada em leis voltadas a fertilizantes e agrotóxicos, passando a instituir um regime jurídico próprio para os insumos biológicos (Brasil, 2024). Além disso, amplia o conceito de bioinsumos ao incluir produtos de origem vegetal, animal e microbiana, bem como processos biotecnológicos, permitindo, inclusive, o registro unificado de produtos com múltiplas funções, como aqueles que atuam simultaneamente como bioestimulantes e agentes de controle biológico (Brasil, 2024).

Nesse novo arranjo regulatório, o MAPA assume papel central no processo de registro dos produtos comerciais, podendo realizar consultas técnicas quando necessário. Ademais, a avaliação de riscos à saúde e ao meio ambiente continua sendo realizada por órgãos competentes, como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), especialmente no caso de produtos fitossanitários inovadores (MAPA, 2026).

Nos últimos anos, avanços regulatórios e institucionais têm contribuído para a expansão do setor de bioinsumos no país, com aumento significativo no número de produtos registrados e maior inserção dessas tecnologias nos sistemas produtivos (MAPA, 2025). Além disso, destaca-se a crescente valorização da produção de bioinsumos “*on farm*”, realizada diretamente nas propriedades rurais. Essa prática, quando conduzida sob boas práticas de fabricação, controle microbiológico e

rastreabilidade, representa uma alternativa viável para redução de custos e maior autonomia produtiva (MAPA, 2021; EMBRAPA, 2023).

A valorização da biodiversidade brasileira constitui um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento de bioinsumos, considerando o potencial biotecnológico dos microrganismos e compostos naturais presentes nos diferentes biomas do país. Essa diversidade biológica representa uma fonte estratégica para o desenvolvimento de soluções inovadoras voltadas ao controle biológico de insetos-praga, melhoria da fertilidade do solo e aumento da resiliência dos sistemas agrícolas (Vidal *et al.*, 2021; FAO, 2024).

Dessa forma, os bioinsumos configuram-se como elementos centrais na transição para modelos agrícolas mais sustentáveis, integrando avanços científicos, inovação tecnológica e políticas públicas, com potencial para promover maior equilíbrio entre produtividade, conservação ambiental e segurança alimentar.

2.1.1 Tipos de bioinsumos

A diversidade funcional dos bioinsumos reflete a complexidade dos sistemas agrícolas e a necessidade de soluções integradas para a promoção da sustentabilidade. Esses insumos podem ser classificados de acordo com sua origem, composição e mecanismo de ação, abrangendo diferentes categorias que atuam de forma complementar nos agroecossistemas (Florencio *et al.*, 2022). Entre os principais grupos destacam-se os biofertilizantes, os inoculantes microbianos, os bioinseticidas e os bioestimulantes, cada um desempenhando funções específicas, como a ciclagem de nutrientes, o estímulo ao crescimento vegetal, o controle biológico de pragas e o aumento da resiliência das plantas a estresses ambientais (EMBRAPA, 2023). A compreensão dessas categorias é fundamental para o uso eficiente e estratégico dos bioinsumos, permitindo sua adequada inserção em sistemas produtivos sustentáveis e contribuindo para a redução da dependência de insumos químicos sintéticos (MAPA, 2025).

2.1.1.1 Biofertilizantes

Os biofertilizantes são insumos de origem biológica constituídos por microrganismos vivos ou por compostos orgânicos resultantes de processos

biotecnológicos, capazes de promover a fertilidade do solo e o desenvolvimento vegetal por meio de mecanismos naturais. Tradicionalmente, podem ser obtidos a partir da fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos, como dejetos animais e resíduos agrícolas, gerando subprodutos ricos em nutrientes e metabólitos bioativos (Barros, 2021; EMBRAPA, 2023). No entanto, avanços recentes ampliaram esse conceito, incluindo formulações microbiológicas altamente específicas, com funções agrônômicas direcionadas (Florencio *et al.*, 2022).

Diferentemente dos fertilizantes químicos convencionais, os biofertilizantes atuam principalmente por meio de processos biológicos, como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, mineralização de matéria orgânica e produção de substâncias promotoras de crescimento vegetal. Esses mecanismos contribuem para o aumento da eficiência no uso de nutrientes e para a melhoria da estrutura física, química e biológica do solo (EMBRAPA, 2023; FAO, 2024).

Os biofertilizantes podem ser classificados em líquidos e sólidos, de acordo com sua forma de apresentação e aplicação. Os biofertilizantes líquidos são, em geral, obtidos por processos de fermentação de resíduos orgânicos ou pela multiplicação de microrganismos benéficos, podendo ser aplicados via solo, fertirrigação ou pulverização foliar (Barros, 2021). Já os biofertilizantes sólidos são produzidos a partir de compostos orgânicos estabilizados ou formulados com microrganismos incorporados a materiais sólidos, sendo utilizados principalmente na adubação do solo ou no tratamento de sementes (Barros, 2021). Ambas as formas apresentam elevada importância agrônômica, contribuindo para o fornecimento de nutrientes, o estímulo à atividade microbiológica e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (EMBRAPA, 2023).

Além das formulações orgânicas, destacam-se os biofertilizantes microbiológicos, que utilizam microrganismos benéficos com funções específicas. Entre os mais estudados estão bactérias dos gêneros *Rhizobium*, *Azospirillum* e *Bacillus*, além de fungos micorrízicos arbusculares (Florencio *et al.*, 2022). Esses organismos estabelecem relações simbióticas com as plantas, promovendo maior disponibilidade de nutrientes e estimulando o crescimento radicular (EMBRAPA, 2023).

O *Bacillus subtilis*, por exemplo, destaca-se como um dos microrganismos mais utilizados em biofertilizantes devido à sua versatilidade funcional. Essa bactéria é capaz de produzir fitohormônios, como auxinas e citocininas, estimular o crescimento

vegetal, aumentar a tolerância ao estresse abiótico e atuar no controle biológico de patógenos por meio da produção de compostos antimicrobianos (Chagas Junior, 2022). Além disso, contribui para a melhoria da estrutura do solo, favorecendo a aeração e a retenção de água (EMBRAPA, 2020).

Do ponto de vista ambiental, os biofertilizantes desempenham papel fundamental na redução dos impactos negativos da agricultura convencional. Ao substituírem ou complementarem fertilizantes sintéticos, reduzem a lixiviação de nutrientes, minimizando processos como a eutrofização de corpos hídricos (Barros, 2021). Ademais, promovem o aumento da biodiversidade microbiana do solo, restaurando funções ecológicas essenciais e contribuindo para a sustentabilidade dos agroecossistemas (EMBRAPA, 2017; FAO, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se à mitigação das mudanças climáticas. A substituição parcial de fertilizantes nitrogenados sintéticos por biofertilizantes reduz a emissão de óxido nitroso (N_2O), um dos principais gases de efeito estufa associados à agricultura (Herrmann; Lesueur, 2013; OECD, 2025).

Dessa forma, os biofertilizantes configuram-se como ferramentas estratégicas para a intensificação sustentável da produção agrícola, promovendo ganhos agronômicos aliados à conservação ambiental e à eficiência no uso de recursos naturais.

2.1.1.2 Bioestimulantes

Os bioestimulantes são definidos como substâncias ou microrganismos aplicados às plantas ou ao solo com a finalidade de estimular processos fisiológicos naturais, promovendo o crescimento vegetal, a eficiência no uso de nutrientes e a tolerância a estresses abióticos, independentemente de seu teor nutricional direto (Du Jardin, 2015; Calvo *et al.*, 2014). Diferentemente dos fertilizantes convencionais, seu efeito está relacionado à modulação metabólica e fisiológica das plantas, e não apenas ao fornecimento de nutrientes.

No contexto regulatório, observa-se que o Brasil ainda apresenta lacunas na definição normativa específica para bioestimulantes, o que gera desafios quanto à padronização, registro e avaliação desses produtos. Embora existam avanços no âmbito do Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pela Lei nº 15.070/2024, os bioestimulantes ainda são frequentemente enquadrados em categorias como

fertilizantes ou produtos especiais, o que evidencia uma incongruência regulatória (MAPA, 2025; Meyer *et al.*, 2022). Em contraste, a União Europeia já estabeleceu diretrizes mais consolidadas por meio do Regulamento (UE) 2019/1009, que reconhece os bioestimulantes como uma categoria distinta, embora ainda existam desafios na harmonização de critérios técnicos (European Commission, 2019).

Os bioestimulantes podem ser classificados de acordo com sua origem e composição, incluindo substâncias húmicas, extratos de algas, aminoácidos, proteínas hidrolisadas, extratos vegetais, compostos orgânicos e microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPR) (Cerdan *et al.*, 2013; Calvo *et al.*, 2014). Esses compostos atuam por diferentes mecanismos, como a regulação hormonal, a ativação de enzimas antioxidantes, o aumento da eficiência fotossintética e a modulação da expressão gênica relacionada ao estresse (Du Jardin, 2015).

No cenário agrícola brasileiro, os bioestimulantes têm sido amplamente utilizados em culturas de grande importância econômica, como soja e milho, especialmente em resposta aos desafios impostos por eventos climáticos extremos, como períodos de seca e variações térmicas (Gonçalves, 2019). Esses insumos atuam aumentando a eficiência no uso da água, estimulando o desenvolvimento radicular e promovendo maior absorção de nutrientes, o que contribui para a estabilidade produtiva em condições adversas (Xavier, 2022; EMBRAPA, 2023).

Do ponto de vista ambiental, os bioestimulantes apresentam potencial relevante na redução da dependência de insumos químicos, uma vez que aumentam a eficiência fisiológica das plantas e reduzem a necessidade de fertilizantes e defensivos agrícolas (CropLife Brasil, 2021; FAO, 2024). Além disso, contribuem para a adaptação da agricultura às mudanças climáticas, promovendo maior resiliência das culturas e menor demanda por recursos hídricos (Roche, 2023).

Adicionalmente, bioestimulantes de origem microbiana têm demonstrado efeitos positivos na qualidade do solo, ao estimular a atividade microbiológica, melhorar a ciclagem de nutrientes e aumentar a retenção de água, favorecendo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Silva, 2023; EMBRAPA, 2023).

Apesar dos avanços, persistem desafios relacionados à variabilidade de resultados em campo, à padronização das formulações e à necessidade de maior validação científica dos mecanismos de ação. Esses fatores reforçam a importância de investimentos em pesquisa e no aprimoramento dos marcos regulatórios, visando consolidar o uso seguro e eficaz dos bioestimulantes na agricultura contemporânea.

2.1.1.3 Inoculantes microbianos

Os inoculantes microbianos são insumos biológicos compostos por microrganismos vivos que, quando aplicados ao solo, às sementes ou às plantas, promovem o crescimento vegetal e aumentam a eficiência dos sistemas produtivos por meio de interações benéficas com o ambiente e a planta hospedeira (Santos; Nogueira; Hungria, 2019; Florencio *et al.*, 2022). Esses produtos têm se consolidado como ferramentas estratégicas na agricultura sustentável, contribuindo para a redução do uso de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos, além de promoverem ganhos de produtividade com menor impacto ambiental (Kour *et al.*, 2020; FAO, 2024).

Os mecanismos de ação dos inoculantes microbianos são diversos e frequentemente complementares. Entre os principais, destacam-se: (i) a produção de fitormônios, como auxinas, giberelinas e citocininas, que estimulam o crescimento radicular e o desenvolvimento vegetal; (ii) a indução de resistência sistêmica nas plantas, aumentando sua tolerância a estresses bióticos e abióticos; (iii) o controle biológico de patógenos por meio da produção de metabólitos antimicrobianos; e (iv) a melhoria da disponibilidade de nutrientes essenciais no solo (Egamberdieva *et al.*, 2017; Seenivasagan; Babalola, 2021).

Diversos grupos de microrganismos são utilizados na formulação de inoculantes, incluindo bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR), como *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus* e *Pseudomonas*, além de fungos micorrízicos arbusculares e fungos filamentosos como *Trichoderma* e *Metarhizium*. Esses microrganismos podem atuar de forma isolada ou em consórcios (coinoculação), potencializando seus efeitos por meio de interações sinérgicas (Meena *et al.*, 2017; Nosheen; Ajmal; Song, 2021; Antonie *et al.*, 2021).

Um dos principais processos associados ao uso de inoculantes é a fixação biológica de nitrogênio (FBN), na qual bactérias diazotróficas convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em formas assimiláveis pelas plantas, como o amônio (NH_4^+). Esse processo é fundamental para culturas leguminosas, nas quais diferentes gêneros de bactérias simbióticas, como *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium* (*Ensifer*) e *Mesorhizobium*, estabelecem associações com as raízes, formando nódulos capazes de suprir grande parte da demanda nitrogenada das plantas e reduzir significativamente a necessidade de fertilizantes nitrogenados (Hungria *et al.*, 2019).

Além dessas bactérias simbióticas, outros gêneros, como *Azospirillum* e *Azotobacter*, também contribuem para a fixação biológica de nitrogênio por meio de associações não simbióticas ou de vida livre, ampliando o potencial dessa tecnologia na agricultura sustentável (Mahmud *et al.*, 2020).

Além do nitrogênio, os inoculantes microbianos desempenham papel importante na disponibilização de fósforo, um nutriente frequentemente limitado nos solos tropicais devido à sua baixa solubilidade. Microrganismos solubilizadores de fósforo atuam por meio da produção de ácidos orgânicos e enzimas, tornando esse nutriente acessível às plantas e contribuindo para a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados (Florencio *et al.*, 2022; Billah *et al.*, 2019).

Outros nutrientes também podem ser disponibilizados por meio da ação microbiana. Bactérias e fungos são capazes de solubilizar potássio, oxidar enxofre e mobilizar micronutrientes essenciais, como zinco, ferro e manganês, promovendo uma nutrição mais equilibrada das plantas (Billah *et al.*, 2019).

Além dos efeitos nutricionais, os inoculantes microbianos atuam como bioestimulantes naturais, produzindo compostos bioativos que favorecem o crescimento vegetal e aumentam a resistência das plantas a condições adversas, como seca, salinidade e variações de temperatura. Esses efeitos contribuem para a estabilidade produtiva e para a adaptação dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas (Egamberdieva *et al.*, 2017; EMBRAPA, 2023).

Do ponto de vista ambiental, o uso de inoculantes microbianos promove o aumento da qualidade do solo, aumentando a biodiversidade microbiana, estimulando a ciclagem de nutrientes e contribuindo para a redução da pegada ambiental da agricultura. Dessa forma, esses insumos configuram-se como componentes essenciais para a intensificação sustentável da produção agrícola e para a transição para sistemas mais resilientes e equilibrados (FAO, 2024; OECD, 2025).

2.2 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E SOCIAIS

Os bioinsumos representam uma estratégia central para a reconfiguração dos sistemas agrícolas contemporâneos, especialmente diante da crescente dependência de insumos não renováveis, como fertilizantes sintéticos e defensivos de base petroquímica. Esse modelo convencional, caracterizado por monocultivos intensivos e elevada homogeneização dos agroecossistemas, está associado a impactos

ambientais significativos, como degradação do solo, perda de biodiversidade e aumento da resistência de pragas (Altieri; Nicholls, 2004; FAO, 2024).

A simplificação ecológica dos sistemas agrícolas favorece a proliferação de organismos fitófagos, ao mesmo tempo em que reduz a presença de inimigos naturais, tornando os cultivos mais vulneráveis e dependentes de insumos externos. Nesse contexto, a adoção de bioinsumos e práticas baseadas na diversidade biológica surge como alternativa eficiente para restaurar o equilíbrio ecológico e reduzir a pressão de insetos-praga de forma sustentável (Aguilar-Meneses; Silva, 2011; Gliessman, 2005).

Do ponto de vista econômico, os bioinsumos contribuem para a redução de custos de produção no médio e longo prazo, especialmente pela diminuição da dependência de fertilizantes e bioinseticidas sintéticos, cujos preços são altamente instáveis e dependentes do mercado internacional. Além disso, o uso de inoculantes e biofertilizantes pode aumentar a eficiência no uso de nutrientes, elevando a produtividade agrícola sem necessidade de expansão de área cultivada (Florencio *et al.*, 2022; OECD, 2025).

No Brasil, o mercado de bioinsumos apresenta crescimento acelerado, impulsionado pela demanda por práticas sustentáveis e pela necessidade de manejo de resistência de pragas e doenças. Estimativas recentes indicam que o setor ultrapassou R\$ 6 bilhões em faturamento em 2025, consolidando o país como um dos principais mercados globais de produtos biológicos (CropLife Brasil, 2025; MAPA, 2025). Esse crescimento tem gerado impactos positivos na geração de emprego, no desenvolvimento de tecnologias nacionais e na valorização da biodiversidade brasileira.

Sob a perspectiva social, os bioinsumos também favorecem a agricultura familiar e os pequenos produtores, especialmente por meio da produção “on farm”, que permite maior autonomia produtiva e redução de custos com insumos externos. Essa abordagem fortalece economias locais, promove inclusão produtiva e contribui para a disseminação de práticas agroecológicas (MAPA, 2021; EMBRAPA, 2023).

Além disso, a adoção de bioinsumos está associada à melhoria da qualidade dos alimentos e à redução de riscos à saúde humana, uma vez que diminui a exposição a resíduos químicos. Esse aspecto é particularmente relevante diante da crescente demanda dos consumidores por alimentos mais seguros e produzidos de forma sustentável (FAO, 2024).

Do ponto de vista ambiental e econômico integrado, os bioinsumos contribuem para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes, capazes de manter produtividade mesmo em condições adversas, como mudanças climáticas e escassez de recursos naturais. Essa resiliência reduz riscos produtivos e aumenta a estabilidade da renda agrícola (OECD, 2025).

Nesse cenário, diversas empresas têm se destacado no desenvolvimento e comercialização de bioinsumos no Brasil, contribuindo para a expansão do setor e para a adoção dessas tecnologias no campo. O Quadro 1 apresenta as principais empresas de bioinsumos e bioestimulantes no Brasil

Quadro 1 – Principais empresas de bioinsumos e bioestimulantes no Brasil

Empresa	Descrição
Solubio	Empresa brasileira referência em bioinsumos on farm e soluções biológicas para nutrição e proteção vegetal (Solubio, 2025).
Koppert	Multinacional líder em controle biológico, com amplo portfólio de macro e microbiológicos para diversas culturas (Koppert, 2025).
Vittia	Atua com inoculantes, bioestimulantes e biodefensivos, com forte presença no mercado nacional (Vittia, 2025).
Biotrop	Destaque no desenvolvimento de soluções biológicas inovadoras para agricultura tropical (Biotrop, 2025).
Total Biotecnologia	Especializada em inoculantes e biofertilizantes com foco em produtividade e sustentabilidade (Total Biotecnologia, 2025).

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

No segmento específico de inoculantes microbianos, o Brasil é líder mundial, especialmente na cultura da soja, onde a fixação biológica de nitrogênio é amplamente utilizada. Empresas nacionais e multinacionais têm investido fortemente nesse setor, ampliando a oferta de produtos e tecnologias. O Quadro 2 apresenta as principais empresas de inoculantes agrícolas no Brasil.

Quadro 2 – Principais empresas de inoculantes agrícolas no Brasil

Empresa	Descrição
----------------	------------------

Simbiose	Referência nacional em inoculantes para soja, milho e outras culturas, com forte atuação em pesquisa (Simbiose, 2025).
EMBRAPA	Desenvolve tecnologias públicas de inoculação amplamente utilizadas no Brasil (EMBRAPA, 2023).
Stoller	Atua com inoculantes e bioestimulantes voltados ao aumento da eficiência produtiva (Stoller, 2025).
Indigo Ag	Empresa global que desenvolve soluções microbiológicas para aumento da produtividade e sustentabilidade (Indigo, 2025).
Novonesis (ex-Novozymes)	Líder global em biotecnologia aplicada à agricultura, com forte atuação em inoculantes (Novonesis, 2025).

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Essas empresas desempenham papel fundamental na consolidação do mercado de bioinsumos no Brasil, contribuindo para a difusão de tecnologias sustentáveis, melhoria da eficiência produtiva e redução dos impactos ambientais da agricultura. Dessa forma, os bioinsumos não apenas promovem benefícios ambientais, mas também representam uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento econômico e social do setor agropecuário (Stoller, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo é uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo. Para a seleção dos estudos, foram estabelecidos critérios de busca, que contemplaram materiais publicados entre os anos de 2000 e 2026. A pesquisa concentrou-se prioritariamente em publicações redigidas em português, inglês e espanhol. Foram priorizados documentos que abordassem especificamente os bioinsumos, incluindo biofertilizantes, inoculantes e bioprotetores, e sua relação com aspectos ambientais na agricultura. Os estudos selecionados avaliaram, entre outros, os efeitos dos bioinsumos na fertilidade do solo, na redução do uso de agroquímicos, na ciclagem de nutrientes e nos impactos sobre a biodiversidade e a saúde do solo, além de avaliar a eficácia e os desafios na aplicação prática dos bioinsumos.

Os critérios de exclusão abrangeram estudos que não se relacionassem diretamente aos bioinsumos na agricultura ou que não fornecessem dados específicos sobre danos ambientais. Também foram desconsiderados trabalhos que não abordassem qualitativamente os efeitos dos bioinsumos na gestão ambiental.

A pesquisa foi conduzida em diversas bases de dados acadêmicas, incluindo PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO. A estratégia de busca consistiu na utilização de termos relacionados aos bioinsumos, tais como "biofertilizantes", "inoculantes" e "bioprotetores", em combinação com palavras-chave como "sustentabilidade agrícola", "dano ambiental", "gestão ambiental" e suas expressões correlatas em inglês e espanhol: *"biofertilizers"*, *"inoculants"*, *"bioprotectors"*, *"agricultural sustainability"*, *"environmental damage"*, *"environmental management"*; *"biofertilizantes"*, *"inoculantes"*, *"bioprotectores"*, *"sostenibilidad agrícola"*, *"daño ambiental"*, *"gestión ambiental"*.

A análise dos dados seguiu uma abordagem qualitativa fundamentada nas diretrizes da análise de conteúdo, que possibilitou a identificação e interpretação de padrões temáticos emergentes nos estudos revisados. O processo de análise incluiu as seguintes etapas:

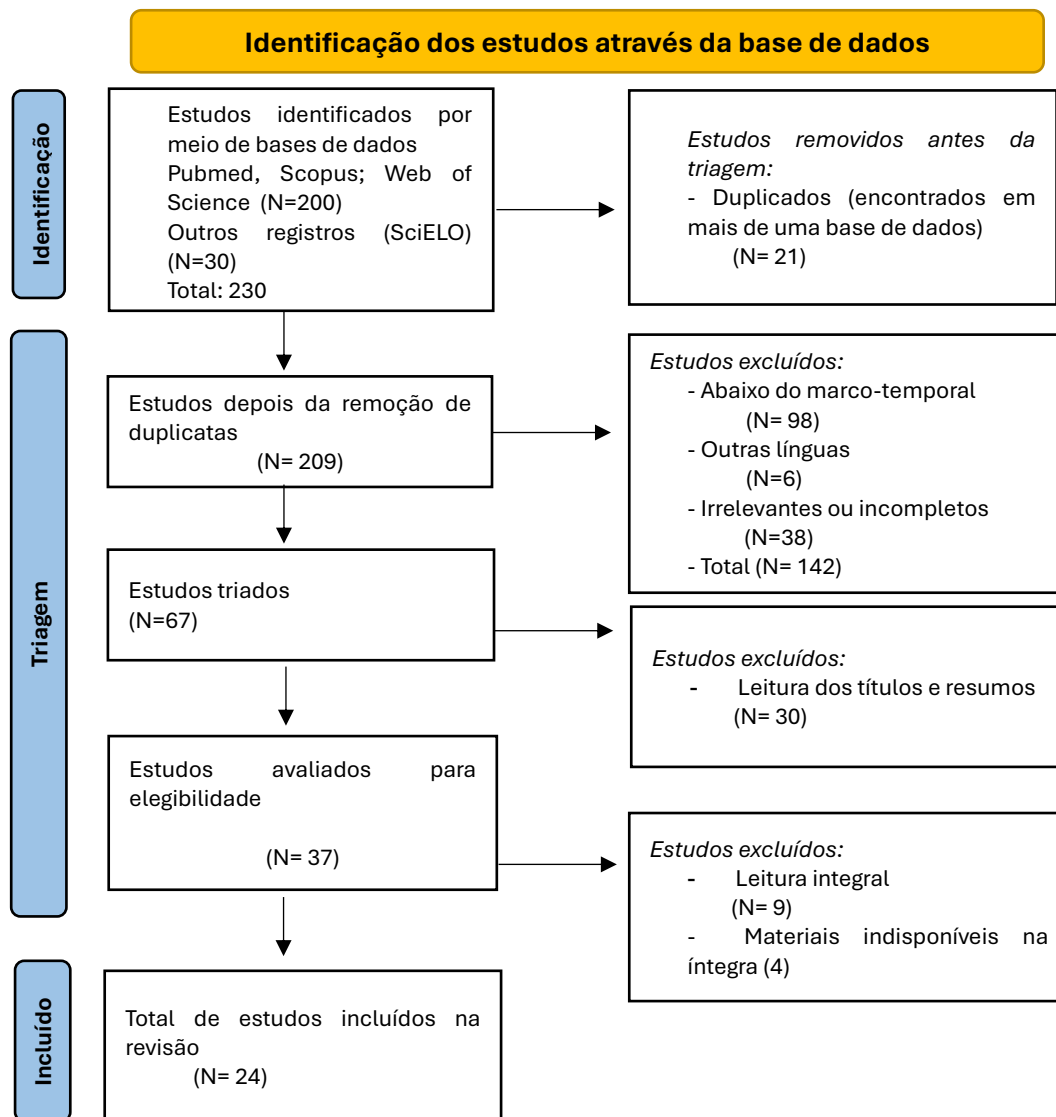
- a) Remoção de duplicatas: foram excluídos materiais duplicados.
- b) Leitura preliminar: inicialmente, todos os artigos selecionados foram lidos para uma compreensão geral do conteúdo, permitindo a familiarização com os dados e a identificação preliminar de temas e categorias.

- c) Codificação inicial: em seguida, os textos foram submetidos a uma codificação inicial, na qual os trechos considerados relevantes foram destacados e organizados em categorias temáticas emergentes relacionadas ao objetivo da pesquisa. As principais categorias identificadas foram: (i) efeitos dos bioinsumos na fertilidade e qualidade do solo; (ii) redução do uso de fertilizantes sintéticos e agrotóxicos; (iii) ciclagem de nutrientes e eficiência no aproveitamento de nutrientes pelas plantas; (iv) promoção da biodiversidade e do equilíbrio dos agroecossistemas; (v) benefícios econômicos e sociais da adoção de bioinsumos; (vi) aspectos toxicológicos e ecológicos; e (vii) desafios, limitações e perspectivas para a utilização de bioinsumos na agricultura sustentável.
- d) Análise temática: após a codificação, foi realizada uma análise temática, onde os dados foram organizados em temas centrais, como "Efeitos na Fertilidade do Solo", "Redução do Uso de Agroquímicos", "Ciclagem de Nutrientes" e "Impactos na Biodiversidade". Essa análise permitiu uma reflexão crítica sobre os dados e a identificação de padrões, tendências e lacunas no conhecimento.
- e) Interpretação e síntese: a interpretação dos dados, integrando as informações coletadas em uma síntese, evidenciando os potenciais benefícios e desafios associados ao uso de bioinsumos na gestão sustentável da agricultura.

O protocolo metodológico, acima citado, foi empregado para proporcionar a qualidade na seleção e análise dos estudos, assegurando que os resultados obtidos fossem representativos e relevantes para a compreensão da utilização dos bioinsumos na agricultura sustentável.

A seleção dos estudos foi conduzida conforme as diretrizes do modelo PRISMA, permitindo a organização sistemática e transparente das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos materiais analisados. O fluxograma, a seguir, ilustra o processo de escolha dos artigos (Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma do processo de identificação, seleção, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão bibliográfica, adaptado das diretrizes PRISMA 2020.



Legenda: N = Número

Fonte: Page *et al.* (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na etapa de remoção de duplicatas, foram inicialmente identificados 230 estudos nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science e SciELO. Após a eliminação de 21 registros duplicados, permaneceram 209 estudos para as etapas subsequentes de análise.

Na etapa de leitura preliminar, os estudos foram submetidos a uma leitura inicial para verificação de sua adequação aos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Nessa fase, foram excluídos 98 estudos por estarem fora do recorte temporal definido, 6 por estarem publicados em idiomas não contemplados pela pesquisa e 38 por não atenderem ao rigor científico esperado ou por serem provenientes de fontes incompatíveis com os critérios adotados, totalizando 142 exclusões. Permaneceram, assim, 67 estudos para análise mais detalhada.

Na etapa de codificação inicial, os 67 estudos restantes tiveram seus títulos, resumos e, posteriormente, seus textos completos analisados, sendo destacados e classificados conforme as categorias temáticas estabelecidas na metodologia. Durante esse processo, 30 estudos foram excluídos por não apresentarem relação direta com o objetivo da pesquisa, permanecendo 37 estudos para leitura integral. Após essa análise, 9 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios metodológicos e 4 por indisponibilidade do texto completo, resultando na seleção final de 24 estudos.

Na etapa de análise temática, os estudos selecionados foram organizados de acordo com as categorias emergentes previamente definidas: efeitos dos bioinsumos na fertilidade e qualidade do solo; redução do uso de fertilizantes sintéticos e agrotóxicos; ciclagem de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes; promoção da biodiversidade e do equilíbrio dos agroecossistemas; benefícios econômicos e sociais; aspectos toxicológicos e ecológicos; e desafios, limitações e perspectivas para a utilização dos bioinsumos na agricultura sustentável. A análise permitiu identificar padrões, convergências, divergências e lacunas na literatura científica.

Por fim, na etapa de interpretação e síntese, os resultados foram integrados de forma crítica, permitindo compreender a contribuição dos bioinsumos para a sustentabilidade agrícola e para a gestão ambiental. Esse procedimento assegurou maior rigor metodológico, transparência e confiabilidade aos achados, demonstrando

que a seleção e a análise dos estudos foram realizadas com base em critérios claros, reprodutíveis e alinhados às boas práticas científicas.

Além disso, a análise da frequência dos termos evidenciou que expressões como "biofertilizantes", "inoculantes", "manejo ambiental" e "sustentabilidade agrícola" foram recorrentes na literatura, indicando que esses temas constituem os principais eixos de investigação científica na área.

O Quadro 3 apresenta as evidências científicas sobre bioinsumos na melhoria do solo e das plantas no período de 2020 a 2026.

Quadro 3 - evidências científicas sobre bioinsumos na melhoria na qualidade do solo e das plantas (2020–2026)

Autor/Ano	Revista/Fonte	Bioinsumo / Intervenção	Benefício Prático	Avaliação Crítica
Mahmud et al. (2020)	<i>Agronomy</i>	Fixação biológica de nitrogênio	Redução de fertilizantes sintéticos	Dependente da interação planta-microrganismo
Kour et al. (2020)	<i>Sustainability</i>	Microbioma agrícola	Melhoria da saúde do solo	Variável conforme condições ambientais
Herrmann; Lesueur (2020)	<i>Agronomy for Sustainable Development</i>	Biofertilizantes microbianos	Aumento da eficiência nutricional	Problemas de formulação ainda persistem
Bashan et al. (2020)	<i>Biology and Fertility of Soils</i>	Bactérias promotoras de crescimento	Aumento da produtividade	Necessidade de estabilidade no solo
Egamberdieva et al. (2020)	<i>Frontiers in Microbiology</i>	Microrganismos e fitohormônios	Aumento da resistência ao estresse	Requer validação em campo
Nosheen et al. (2021)	<i>Microbiological Research</i>	Biofertilizantes microbianos	Sustentabilidade da produção agrícola	Alta variabilidade de resultados
Seenivasagan; Babalola (2021)	<i>Microbiological Research</i>	Inoculantes e bioinseticidas	Redução de agroquímicos	Limitações na adoção em larga escala
Antoine et al. (2021)	<i>Journal of Fungi</i>	Micorrizas arbusculares	Melhoria da absorção de nutrientes	Dependência da cultura agrícola
Meyer et al. (2022)	<i>Pesquisa Agropecuária Brasileira</i>	Bioinsumos na soja	Aumento da produtividade	Necessidade de mais estudos comparativos
Florencio et al. (2022)	<i>Research, Society and Development</i>	Inoculantes microbianos	Disponibilidade de nutrientes	Padronização ainda limitada

Chagas Junior et al. (2022)	<i>Diversitas Journal</i>	<i>Bacillus subtilis</i> como inoculante promotor de crescimento vegetal em soja	Promoção do crescimento vegetal	Interações microbianas pouco compreendidas
Silva (2023)	<i>Revista em Agronegócio e Meio Ambiente</i>	Bioestimulantes microbianos	Melhoria da qualidade do solo	Falta de estudos de longo prazo
EMBRAPA (2023)	EMBRAPA	Bioinsumos diversos	Sustentabilidade agrícola	Dependência de capacitação técnica
Roche (2023)	<i>Crop Science</i>	Bioestimulantes	Resiliência climática	Resultados variáveis por cultura
FAO (2024)	Food and Agriculture Organization (FAO)	Agricultura com bioinsumos	Redução de impactos ambientais	Necessidade de políticas públicas
Xavier (2024)	<i>Revista de Política Agrícola</i>	Bioinsumos no Brasil	Eficiência produtiva	Limitações regulatórias
CropLife Brasil (2025)	CropLife Brasil	Mercado de bioinsumos	Expansão e produtividade	Dependência de regulamentação
OECD (2025)	OECD Agricultural Policy Report	Políticas agrícolas	Redução de custos produtivos	Requer incentivos governamentais
MAPA (2025)	Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA)	Regulação de bioinsumos	Ampliação do uso agrícola	Desafios de fiscalização
Biotrop (2025)	Biotrop	Bioinsumos comerciais	Aumento de produtividade	Necessidade de validação independente
Koppert (2025)	Koppert Biological Systems	Controle biológico	Redução de bioinseticidas	Dependência de manejo adequado
Vittia (2025)	Vittia	Bioestimulantes e inoculantes	Melhoria da eficiência agrícola	Custos iniciais elevados
Novonesis (2025)	Novonesis	Soluções microbiológicas	Otimização da nutrição vegetal	Tecnologia ainda em expansão
EMBRAPA (2026)	EMBRAPA	Bioinsumos integrados	Sustentabilidade sistêmica	Necessidade de estudos de longo prazo

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A análise dos 24 estudos evidencia um consenso contemporâneo quanto ao papel estratégico dos bioinsumos na promoção da sustentabilidade agrícola. Autores como Mahmud *et al.* (2020) e Kour *et al.* (2020) destacaram que a utilização de microrganismos benéficos melhora a fertilidade do solo e reduz a dependência de fertilizantes sintéticos, sendo esse um dos principais benefícios reconhecidos na literatura atual.

No mesmo sentido, Herrmann e Lesueur (2020) e Bashan *et al.* (2020) reforçaram que biofertilizantes e bactérias promotoras de crescimento contribuem para o aumento da eficiência no uso de nutrientes, embora apontem desafios relacionados à estabilidade e formulação desses insumos. Estudos como os de Egamberdieva *et al.* (2020) e Nosheen *et al.* (2021) ampliaram essa discussão ao demonstrar que os bioinsumos também atuam na resistência das plantas a estresses ambientais, contribuindo para a adaptação às mudanças climáticas. Seenivasagan e Babalola (2021) complementam ao evidenciar a redução do uso de agroquímicos, reforçando o caráter sustentável dessas tecnologias.

A relevância dos inoculantes microbianos também é destacada por Antoine *et al.* (2021), Meyer *et al.* (2022) e Florencio *et al.* (2022), que apontam ganhos significativos na absorção de nutrientes e produtividade agrícola. Contudo, esses autores ressaltaram a necessidade de maior padronização e validação científica.

Chagas Junior (2022) e Silva (2023) enfatizaram o papel dos microrganismos, como *Bacillus spp.*, na melhoria da qualidade do solo, embora alertaram para lacunas no entendimento das interações microbianas a longo prazo. Essa preocupação também foi evidenciada por EMBRAPA (2023) e Roche (2023), que indicaram a variabilidade dos resultados conforme condições ambientais e manejo agrícola.

No âmbito global, FAO (2024) e Xavier (2024) reforçaram que os bioinsumos são essenciais para a redução dos impactos ambientais da agricultura, embora dependam de políticas públicas e avanços regulatórios para sua ampla adoção.

Já os estudos mais recentes, como CropLife Brasil (2025), OECD (2025) e MAPA (2025), evidenciaram o crescimento acelerado do setor, destacando benefícios econômicos, como redução de custos e aumento da eficiência produtiva, mas também apontando desafios regulatórios e de fiscalização.

Estudos aplicados e de mercado, como Biotrop (2025), Koppert (2025), Vittia (2025) e Novonesis (2025), demonstraram a consolidação dos bioinsumos no setor produtivo, embora ressaltassem a necessidade de validação independente e redução

de custos para ampliar sua adoção. EMBRAPA (2026) sintetizou essa evolução ao indicar que os bioinsumos representam um caminho promissor para a sustentabilidade sistêmica da agricultura, ainda que dependente de pesquisas de longo prazo.

4.1 ASPECTOS TOXICOLÓGICOS E ECOLÓGICOS

A literatura consultada indicou que os bioinsumos apresentam, de modo geral, menor toxicidade e maior biodegradabilidade quando comparados aos insumos químicos convencionais, sendo considerados alternativas mais seguras para o meio ambiente e para a saúde humana (FAO, 2024; EMBRAPA, 2023).

Além disso, estudos como os de Kour *et al.* (2020) e Silva (2023) demonstraram que bioinsumos podem atuar na remediação de solos degradados, promovendo aumento da atividade microbiana e recuperação de funções ecológicas.

Entretanto, autores como OECD (2025) e MAPA (2025) alertaram que a segurança desses produtos depende de controle de qualidade, regulamentação adequada e uso correto, especialmente no caso de produtos microbiológicos.

Do ponto de vista econômico, o mercado de bioinsumos apresentou crescimento expressivo, com faturamento superior a R\$ 6 bilhões no Brasil em 2025 (CropLife Brasil, 2025), indicando uma transição gradual para modelos agrícolas mais sustentáveis.

Apesar dos avanços, persistem desafios relacionados à padronização, validação científica e regulamentação, reforçando a necessidade de maior integração entre pesquisa, setor produtivo e políticas públicas.

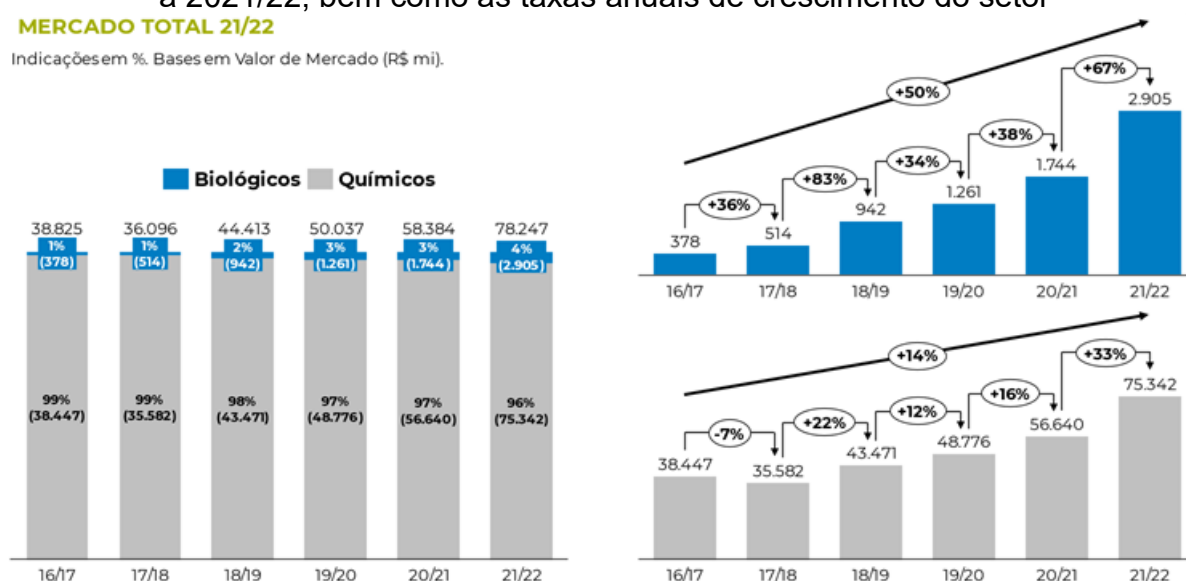
A produção moderna de culturas exige um equilíbrio entre alta e consistente produtividade e a máxima segurança para consumidores, trabalhadores agrícolas e o meio ambiente (Rathore *et al.*, 2009; Jannin *et al.*, 2012; Pecha *et al.*, 2012; Yakhin *et al.*, 2017). Embora alguns bioestimulantes tenham sido analisados quanto a efeitos colaterais indesejados, como impactos negativos sobre o meio ambiente, muitos deles ainda não foram completamente caracterizados. A maioria é considerada geralmente reconhecida como segura (GRAS nos EUA) devido à origem biológica de seus constituintes (Ali *et al.*, 2021). De maneira geral, os bioestimulantes são biodegradáveis, não tóxicos e inofensivos para diversos organismos, especialmente aqueles provenientes de materiais biológicos, como extratos de algas e componentes vegetais (Michalak; Chojnacka, 2014; Stadnik; Freitas, 2014). Entretanto, persiste a

incerteza quanto à validade dessa premissa para produtos microbianos ou aqueles que não são comumente encontrados em campos agrícolas (Yakhin *et al.*, 2017), o que exige investigações científicas mais aprofundadas.

Os bioestimulantes têm sido utilizados como agentes de remediação biológica e demonstraram aumentar os níveis de ATP e a atividade de fosfatase e urease (Tejada *et al.*, 2011a), aumentando assim a taxa de degradação de xenobióticos no solo e melhorando as comunidades microbianas benéficas em climas semiáridos (Tejada *et al.*, 2011b). Além disso, os bioestimulantes podem ajudar a reduzir a quantidade de produtos agroquímicos potencialmente prejudiciais, incluindo a diminuição do uso de fertilizantes e bioinseticidas (Kolomazník *et al.*, 2012; Hamza; Suggars, 2001).

Os bioinseticidas de origem biológica e os bioinoculantes geraram uma receita de R\$ 2,905 bilhões no Brasil durante a safra 2021-2022. Um levantamento da Kynetec, intitulado FarmTrak, revelou um aumento de 67% em relação ao ciclo anterior, que registrou R\$ 1,744 bilhão. De acordo com a consultoria, os produtos biológicos também cresceram de 3% para 4% do total de transações do setor de defesa vegetal, que, por sua vez, aumentou de R\$ 58,384 bilhões (2020-2021) para R\$ 78,247 bilhões, refletindo uma alta de 33% (Figura 2) (Campos, 2023).

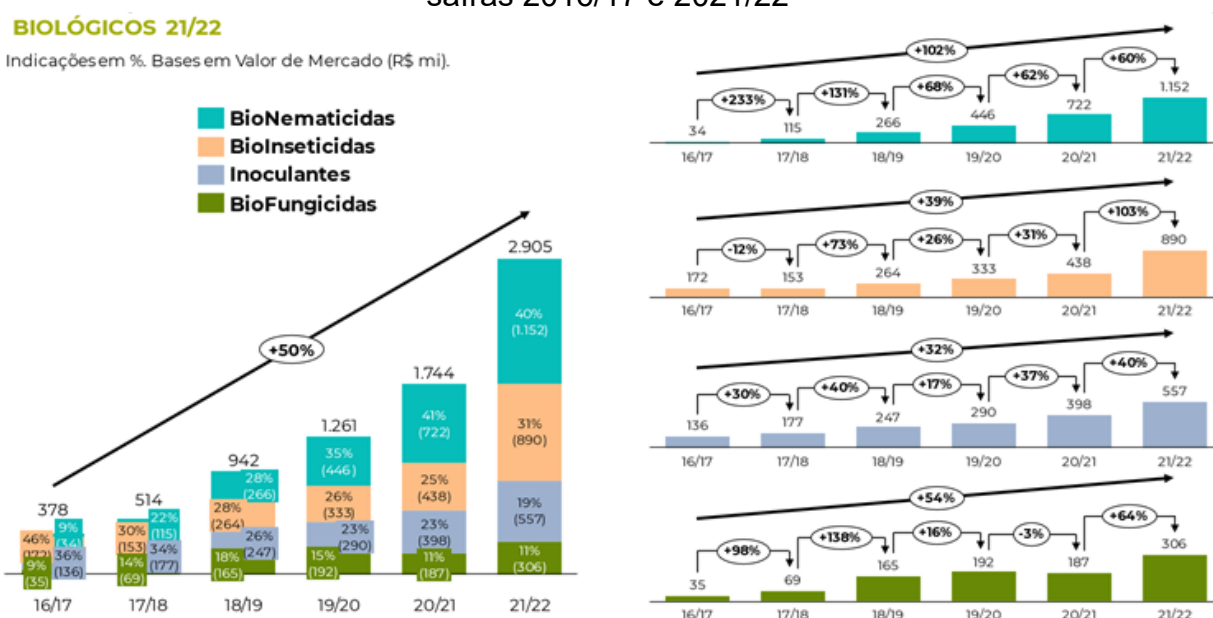
Figura 2 - Evolução do mercado brasileiro de produtos biológicos e químicos, destacando a participação percentual e o valor movimentado nas safras de 2016/17 a 2021/22, bem como as taxas anuais de crescimento do setor



Fonte: Campos (2023).

De acordo com a Kynetec (2023 *apud* Campos, 2023), na avaliação do estudo FarmTrak em relação às categorias de produtos biológicos, os bionematicidas foram os mais vendidos durante a safra, representando 39,6% do total, equivalente a R\$ 1,152 bilhão. Em segundo lugar, estão os bioinseticidas, com uma participação de 30,7%, ou R\$ 890 milhões. O ranking do segmento é complementado pelos bioinoculantes e biofungicidas, que correspondem a 19,2% das vendas (R\$ 557 milhões) e 10,5% (R\$ 306 milhões), respectivamente (Figura 3) (Campos, 2023).

Figura 3 – Evolução do mercado brasileiro de produtos biológicos por categoria (bionematicidas, bioinseticidas, inoculantes e biofungicidas), evidenciando a participação percentual, o valor de mercado e as taxas de crescimento entre as safras 2016/17 e 2021/22



Fonte: Campos (2023).

Os compostos contidos nos bioestimulantes são constituídos de elementos naturais de ecossistemas terrestres e aquáticos (Jannin *et al.*, 2012) e metabólitos de origem vegetal e microbiana, sendo assim geralmente considerados seguros, principalmente nas baixas taxas em que são tipicamente aplicados. Portanto, foi proposto que os bioestimulantes podem ser considerados produtos ecologicamente corretos para a agricultura sustentável (Mladenova *et al.*, 1998; Ertani *et al.*, 2011; Ghannam *et al.*, 2013; Vijayan *et al.*, 2014). Contudo, em muitos países, os bioestimulantes não estão sujeitos a uma triagem toxicológica rigorosa (Traon *et al.*, 2014), e há potencial para a persistência de patógenos humanos em materiais de

origem animal e para a síntese de compostos novos de função ou toxicologia desconhecidas durante o processo de fabricação.

No Brasil, a regulamentação e o controle de bioestimulantes e outros bioinsumos são supervisionados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). A legislação brasileira exige que os produtos agroquímicos, incluindo bioinsumos como os bioestimulantes, passem por avaliações de segurança e eficácia antes de serem registrados e comercializados, o que inclui testes para determinar a toxicidade aguda, crônica e efeitos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente (CropLife Brasil, 2020).

4.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

O setor de produtos biológicos no Brasil consolidou sua posição como um dos segmentos mais dinâmicos do agronegócio global no biênio 2024-2025. Impulsionado por demandas de sustentabilidade e pela necessidade de manejo de resistência a defensivos químicos, o mercado brasileiro atingiu um faturamento recorde, superando as taxas de crescimento do mercado global de agroquímicos tradicionais. Este texto analisa o movimento financeiro, a área tratada e os principais motores desse crescimento.

Em 2025, o mercado de bioinsumos no Brasil movimentou R\$ 6,2 bilhões, o que representa um crescimento de 15% em relação ao ano anterior. Esse avanço é sustentado por uma expansão robusta na adoção tecnológica no campo: a área tratada com biológicos saltou para 194 milhões de hectares, um incremento de 28% comparado a 2024 (CropLife Brasil, 2025).

A liderança brasileira no cenário internacional é evidente, uma vez que o país detém cerca de 15% a 18% do mercado global de biológicos e aproximadamente metade do faturamento da América Latina. O ambiente regulatório também favoreceu essa expansão; em 2025, o MAPA atingiu o recorde de 139 novos registros de produtos biológicos, facilitando a entrada de novas moléculas e agentes de controle biológico no mercado (MAPA, 2025).

O desempenho financeiro por categoria revela mudanças nas prioridades do produtor. Os bioinseticidas apresentaram a maior ascensão, faturando *R\$491 milhões em 2024 para R\$ 735 milhões em 2025.

As projeções indicam que o setor deve manter um ritmo de crescimento composto anual superior a 15%, com estimativas de ultrapassar os R\$ 9 bilhões até 2030. O aporte de crédito rural facilitado (com taxas de 7% a.a. para bioinsumos) e a expansão do parque industrial nacional sugerem que o Brasil permanecerá na vanguarda da transição para uma agricultura de base biológica. O Quadro 4, a seguir, apresenta os valores estimados de faturamento para as principais categorias de biológicos no mercado brasileiro:

Quadro 4 - Movimentação Financeira por Categoria (2025)

Categoria	Valor de Mercado (R\$ Bilhões)	Observação / Desempenho
Bioinseticidas	R\$ 2,10	Maior crescimento anual (+33,4%)
Bionematicidas	R\$ 1,90	Representa 44% do segmento de biodefensivos
Inoculantes	R\$ 1,46*	Essencial para fixação de N e solubilização de P
Biofungicidas	R\$ 0,74	Salto expressivo frente aos R\$ 0,49 bi de 2024
Total do Setor	R\$ 6,20	Crescimento de 15% em relação a 2024

*Nota: Valor estimado com base no *market share* residual do faturamento total reportado pela CropLife para o período.

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O mercado brasileiro de bioinsumos apresentou uma evolução exponencial desde o ciclo 2020/2021. Se naquela safra a receita era de R\$ 1,7 bilhão (Spark, 2021), os dados consolidados do biênio 2024/2025 indicam que o setor atingiu a marca de R\$ 6,2 bilhões (CropLife, 2025; Kynetec, 2025). Esse salto representa um crescimento de mais de 260% em apenas quatro anos, confirmando a tendência de que o faturamento triplicaria antes mesmo do prazo inicialmente previsto (2030).

Globalmente, o mercado que era estimado em U\$ 10,6 bilhões em 2021 e expandiu-se rapidamente. Estimativas atuais da *Research and Markets* e da *Fortune Business Insights* indicam que o setor global deve ultrapassar U\$18,5 bilhões até o final de 2026, mantendo uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) de

13,9%, valor revisado para cima em relação aos 11,9% previstos anteriormente. Em contraste, o mercado de defensivos químicos tradicionais mantém um crescimento estável, porém, modesto, 3% a 4% ao ano.

No Brasil, a adoção tecnológica é liderada pela cultura da soja, em agrossistemas, que responde por quase metade do faturamento do setor, seguida pelo milho e pela cana-de-açúcar. A diversificação do portfólio, especialmente em bioinseticidas e bionematicidas, tem sido o principal motivador financeiro, mitigando os riscos de resistência química no campo.

4.3 PROBLEMAS E PERSPECTIVAS

Apesar dos avanços significativos e do crescente reconhecimento dos bioinsumos como ferramentas estratégicas para a sustentabilidade agrícola, diversos desafios ainda limitam sua adoção ampla e eficaz. Um dos principais entraves está na compreensão dos mecanismos de ação, especialmente no caso dos bioestimulantes, cujos efeitos dependem de interações complexas entre plantas, microrganismos e ambiente. Estudos recentes indicam que a variabilidade edafoclimática, a composição dos produtos e a diversidade genética das culturas influenciam diretamente a eficiência desses insumos, dificultando a previsibilidade dos resultados em agrossistemas e demais formas de cultivo (Du Jardin, 2015; Rouphael; Colla, 2020; EMBRAPA, 2023).

Nesse contexto, abordagens científicas avançadas, como a metabolômica¹, transcriptômica² e genômica, têm se mostrado fundamentais para elucidar os mecanismos bioquímicos e moleculares envolvidos na ação dos bioinsumos. Essas tecnologias permitem identificar metabólitos bioativos, compreender a regulação gênica das plantas sob diferentes condições e otimizar formulações mais eficientes e específicas (Rouphael *et al.*, 2018; FAO, 2024). Entretanto, a natureza multicomponente desses produtos ainda representa um desafio para a padronização, controle de qualidade e reprodutibilidade dos resultados, exigindo integração entre

¹ Metabolômica: área das ciências “ômicas” que investiga o conjunto de metabólitos produzidos por sistemas biológicos, permitindo compreender respostas fisiológicas a diferentes condições ambientais (Nicholson; Lindon, 2008).

² Transcriptômica: conjunto de técnicas voltadas à análise da expressão gênica por meio do estudo de RNA, possibilitando a compreensão dos mecanismos moleculares envolvidos na adaptação e resposta dos organismos (Wang *et al.*, 2009).

áreas como microbiologia, agronomia e biotecnologia (Calvo *et al.*, 2014; OECD, 2025).

Além das limitações científicas, destacam-se desafios práticos e mercadológicos. Estudos recentes apontam que a eficácia dos bioinsumos pode variar significativamente conforme o sistema de cultivo, o manejo adotado e as condições ambientais, o que dificulta sua adoção em larga escala. Ademais, ainda há no mercado produtos com pouca comprovação científica, o que compromete a confiança dos produtores e evidencia a necessidade de validação independente e maior rigor técnico (Florencio *et al.*, 2022; CropLife Brasil, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se aos riscos potenciais ao meio ambiente, especialmente quando os bioinsumos são utilizados de forma inadequada. Embora sejam considerados, em geral, mais seguros que insumos químicos, alguns produtos microbiológicos podem interferir na microbiota nativa do solo ou apresentar efeitos inesperados em determinadas condições, reforçando a importância de protocolos técnicos bem definidos e monitoramento contínuo (FAO, 2024; OECD, 2025).

No âmbito regulatório, observa-se que o Brasil avançou com iniciativas como o Programa Nacional de Bioinsumos, porém ainda existem lacunas normativas, principalmente no que se refere aos bioestimulantes, que muitas vezes não possuem enquadramento legal específico. Essa ausência de padronização dificulta processos de registro, fiscalização e avaliação toxicológica, especialmente para produtos de origem microbiana ou com formulações complexas (MAPA, 2025; Meyer *et al.*, 2022).

Diante desses desafios, as perspectivas para o setor são promissoras, mas dependem de ações estruturadas. A integração entre pesquisa científica, setor produtivo e políticas públicas é fundamental para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, seguras e acessíveis. Investimentos em pesquisa de longo prazo, padronização de metodologias e capacitação técnica de produtores são estratégias essenciais para consolidar os bioinsumos como componentes centrais da agricultura sustentável.

Assim, a adoção responsável e baseada em evidências científicas, aliada ao avanço tecnológico e regulatório, tende a ampliar a eficácia e a confiabilidade desses insumos, contribuindo para sistemas agrícolas mais resilientes, produtivos e ambientalmente equilibrados.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar de que forma os bioinsumos contribuem para a promoção da sustentabilidade agrícola, com ênfase em seus benefícios para a gestão ambiental, buscando compreender seus impactos sobre a qualidade do solo, a biodiversidade, a eficiência produtiva e a redução dos impactos ambientais decorrentes da agricultura convencional.

A partir da revisão sistematizada da literatura, ao analisar a contribuição dos bioinsumos para a sustentabilidade agrícola, constatou-se que a hipótese inicialmente proposta foi confirmada, evidenciando que esses insumos, quando utilizados de forma adequada e associados a práticas de manejo sustentável, constituem importantes ferramentas para a melhoria da qualidade ambiental dos sistemas agrícolas e para a redução da dependência de fertilizantes e defensivos químicos.

Em relação aos resultados gerais da revisão, observou-se que os biofertilizantes, os inoculantes microbianos e os bioestimulantes atuam diretamente na dinâmica biológica do solo, promovendo aumento da biodiversidade microbiana, melhoria da estrutura física e química do solo, maior eficiência na ciclagem de nutrientes e incremento da disponibilidade de elementos essenciais ao desenvolvimento vegetal. Esses benefícios favorecem a construção de sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e ambientalmente sustentáveis.

Quanto aos aspectos toxicológicos e ecológicos, verificou-se que os bioinsumos apresentam, de modo geral, menor toxicidade e maior biodegradabilidade quando comparados aos insumos químicos convencionais, contribuindo para a redução da contaminação do solo e dos recursos hídricos, bem como para a preservação da biodiversidade e do equilíbrio ecológico dos agroecossistemas. Além disso, constatou-se que esses produtos favorecem a adaptação das culturas às mudanças climáticas, aumentando a tolerância das plantas a estresses abióticos, como seca e variações de temperatura.

No que se refere aos aspectos econômicos, a literatura demonstrou que a expansão do mercado de bioinsumos reflete o crescente interesse por tecnologias sustentáveis capazes de reduzir custos de produção, aumentar a eficiência no uso de nutrientes e fortalecer a competitividade do setor agrícola. Também foram identificados benefícios relacionados à valorização da agricultura de base biológica,

ao fortalecimento da agricultura familiar e ao incentivo ao desenvolvimento de tecnologias nacionais voltadas à sustentabilidade.

Por outro lado, a análise dos problemas e perspectivas evidenciou que ainda existem desafios relevantes para a consolidação dos bioinsumos na agricultura. Entre eles destacam-se a variabilidade dos resultados em diferentes condições edafoclimáticas, a necessidade de maior padronização das formulações, limitações relacionadas à validação científica de alguns produtos, lacunas regulatórias, especialmente no caso dos bioestimulantes, e a necessidade de ampliar a capacitação técnica dos produtores para garantir o uso adequado dessas tecnologias.

Como resposta ao problema de pesquisa, conclui-se que os bioinsumos exercem influência positiva sobre a biodiversidade do solo e o equilíbrio dos ecossistemas agrícolas, promovendo interações biológicas mais complexas e funcionais. A atuação de microrganismos benéficos, como bactérias fixadoras de nitrogênio, fungos micorrízicos e outros agentes promotores do crescimento vegetal, favorece a disponibilidade de nutrientes, o controle biológico de patógenos e a manutenção da saúde do solo, contribuindo diretamente para sistemas agrícolas mais sustentáveis.

No âmbito das políticas públicas, destaca-se a importância do fortalecimento de programas de incentivo à produção e ao uso de bioinsumos, do aperfeiçoamento dos marcos regulatórios e da ampliação das ações de assistência técnica e extensão rural, de forma a ampliar a adoção dessas tecnologias e proporcionar maior segurança aos produtores e consumidores.

Por fim, recomenda-se a realização de estudos de longo prazo e pesquisas aplicadas que avaliem, de forma integrada, os impactos agrônômicos, econômicos, ambientais e sociais dos bioinsumos em diferentes sistemas produtivos e condições edafoclimáticas. A geração de dados científicos mais robustos será essencial para ampliar o conhecimento sobre esses produtos, fortalecer sua utilização na agricultura e subsidiar a tomada de decisão por produtores, pesquisadores e formuladores de políticas públicas.

Dessa forma, conclui-se que os bioinsumos representam ferramentas estratégicas para a transição agroecológica e para a intensificação sustentável da agricultura, conciliando produtividade, conservação ambiental e uso racional dos recursos naturais. Entretanto, a ampliação de seus benefícios depende da continuidade das pesquisas, da evolução dos marcos regulatórios, da inovação

tecnológica e da integração entre ciência, setor produtivo e poder público, favorecendo a consolidação de modelos agrícolas cada vez mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, M. M. The potential of *Moringa oleifera* extract as a biostimulant in enhancing plant growth. **International Journal of Plant Physiology and Biochemistry**, v. 5, p. 42–49, 2013. DOI: 10.5897/IJPPB2012.026.
- AGUIAR-MENESES, E. L.; SILVA, A. C. **Plantas atrativas para inimigos naturais e sua contribuição no controle biológico de pragas agrícolas**. Seropédica: EMBRAPA, 2011. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-infoteca-e-doc-921254/Description>. Acesso em 22 abr. 2026.
- ALI, O.; RAMSUBHAG, A.; JAYARAMAN, J. Biostimulant Properties of Seaweed Extracts in Plants: Implications towards Sustainable Crop Production. **Plants** (Basel). V. 10, n. 3, p. 531, 2021. doi: 10.3390/plants10030531. PMID: 33808954; PMCID: PMC8000310.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Una base agroecológica para sistemas agrícolas sustentáveis. **Manejo Integrado de Pragas e Agroecología**, n. 73, p. 8–20, 2004. Disponível em: https://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/agroecoMIP_CATIE.pdf. Acesso em 22 abr. 2026.
- ANTOINE, S. *et al.* Mycorrhizal mutualism and emerging challenges. **Mycorrhiza**, v. 31, p. 637, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00572-021-01032-7>
- BARROS, T. D. **Biofertilizantes**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/bitstream/123456789/8077/1/TCC%20-%20Rafael%20Brito%20Barros.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.
- BASHAN, Y. *et al.* Advances in plant growth-promoting bacteria. **Plant and Soil**, v. 378, p. 1–33, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>.
- BILLAH, M. *et al.* Phosphate solubilizing bacteria. **Geomicrobiology Journal**, v. 36, p. 904–916, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1654042>.
- BRASIL. **Lei nº 15.070, de 23 de dezembro de 2024**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l15070.htm. Acesso em 22 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Instrução Normativa nº 61/2020**. Diário Oficial da União, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Manual de produção de bioinsumos on farm**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1163171/1/Livro-Analises-Bioinsumos-completo-final.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.

- CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, p. 3–41, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>.
- CAMPOS, F. Mercado de bioinsumos cresce quase 70%. **Revista Cultivar**, 2023. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/mercado-de-bioinsumos-cresce-quase-70percent-na-safra-2021-22>. Acesso em 22 abr. 2026.
- CERDAN, M. *et al.* Amino acids and iron nutrition in tomato. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, p. 859–866, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201200566>.
- CHAGAS JUNIOR, Aloisio Freitas *et al.* Bacillus subtilis como inoculante promotor de crescimento vegetal em soja. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 1, p. 0001-0016, 2022. Disponível em : https://www.diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/download/2071/1621. Acesso em 22 abr. 2026.
- CROPLIFE BRASIL. **Bioestimulantes: uma nova ferramenta**. 2021. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/bioestimulante-uma-nova-ferramenta-para-tratar-as-plantas/>. Acesso em 22 abr. 2026.
- CROPLIFE BRASIL. **Panorama dos bioinsumos no Brasil 2025**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va-15-panorama-dos-bioinsumos-no-brasil-e-no-mundo.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.
- DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3–14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>.
- EGAMBERDIEVA, D. *et al.* Beneficial microbes and plant stress. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, p. 2104, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104>.
- EMBRAPA. **Microrganismos benéficos em biofertilizantes**. 2017. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/22865878/microrganismos-beneficos-em-biofertilizantes>. Acesso em 22 abr. 2026.
- EMBRAPA. **Produção de Bacillus para agricultura**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1152384/1/CIRCULAR-TECNICA-97-ROSE010-03.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.
- EMBRAPA. **Bioinsumos na agricultura: avanços e perspectivas**. Brasília, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/inpi/pt-br/assuntos/informacao/13_12_2023_RadarInoculantesfinal.pdf. Acesso em 22 abr. 2026.

- ERTANI, A. *et al.* Phenol metabolism in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 174, p. 496–503, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.201000113>.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE. **The State of Food and Agriculture 2024**. Rome: FAO, 2024. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2616en>. Acesso em 22 abr. 2026.
- FLORENCIO, C. *et al.* Inoculantes microbianos e sustentabilidade. **Química Nova**, v. 45, n. 9, p. 1133–1145, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170875>.
- GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos**. Porto Alegre: UFRGS, 2005.
- GONÇALVES, A. L. **Agricultura regenerativa no Brasil**. Brasília: EMBRAPA, 2017.
- HERRMANN, L.; LESUEUR, D. Biofertilizers challenges. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, p. 8859–8873, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8>.
- JANNIN, L. *et al.* Humic acids and plant metabolism. **Plant and Soil**, v. 359, p. 297–319, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1193-8>.
- KOLOMAZNÍK, K. *et al.* Biostimulants diffusion. **Heat and Mass Transfer**, v. 48, p. 1505–1512, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-012-0999-1>.
- KOUR, D. *et al.* Microbial biofertilizers. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 23, p. 101487, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>.
- MAHMUD, K. *et al.* Nitrogen fixation research. **Plants**, v. 9, p. 97, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9010097>.
- MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Programa Nacional de Bioinsumos**. Brasília: MAPA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/> Acesso em: 22 abr. 2026.
- MAPA. Ministério da Agricultura. **Manual de produção de bioinsumos on farm**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1163171/1/Livro-Analises-Bioinsumos-completo-final.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2026.
- MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Mapa lança sistema unificado para registro de agrotóxicos no Brasil**. 2026. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/mapa-lanca-sistema-unificado-para-registro-de-agrotoxicos-no-brasil_515000.html. Acesso em 06 jul. 2026.
- MEENA, V. S. *et al.* Rhizospheric microorganisms. **Ecological Engineering**, v. 107, p. 8–32, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.058>.

- MEYER, M. C. *et al.* **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília: EMBRAPA, 2022.
- MICHALAK, I.; CHOJNACKA, K. Algal extracts advances. **Engineering in Life Sciences**, v. 14, p. 581–591, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/elsc.201400139>.
- MLADENOVA, Y. *et al.* Biostimulants and maize stress. **Agro Food Industry Hi-Tech**, v. 9, p. 18–22, 1998. https://www.researchgate.net/publication/230737103_Siaption_-_An_amino-acid-based_biostimulant_reducing_osmostress_metabolic_changes_in_maize. Acesso em 22 abr. 2026.
- NOSHEEN, S.; AJMAL, I.; SONG, Y. Microbes as biofertilizers. **Sustainability**, v. 13, p. 1868, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13041868>.
- OECD. Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Agricultural policy monitoring and evaluation 2025**. Paris: OECD, 2025. Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/agricultural-policy-monitoring-and-evaluation-2025_a80ac398-en.html. Acesso em 22 abr. 2026.
- PAGE, M.J.; MCKENZIE, J.E.; BOSSUYT, P.M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T.C.; MULROW, C.D. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**. V. 372, n. 71. 2021.
- PECHA, J. *et al.* Protein biostimulants modeling. **AIChE Journal**, v. 58, p. 2010–2019, 2012. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.12739>. Acesso em 22 abr. 2026.
- RATHORE, S. S. *et al.* Seaweed extract in soybean. **South African Journal of Botany**, v. 75, p. 351–355, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2008.10.009>. Acesso em 22 abr. 2026.
- ROCHE, D. *et al.* Moving towards a mechanistic understanding of biostimulant impacts on soil properties and processes: a semisystematic review. **Front. Agron.** 6:1271672. DOI 10.3389/fagro.2024.1271672.
- SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants review. **AMB Express**, v. 9, p. 205, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.
- SEENIVASAGAN, T.; BABALOLA, O. O. Microbial inoculants. **Sustainability**, v. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13091111>.
- SILVA, J. S. **Bioestimulantes e solo**. 2023. Tese (Doutorado) – UFC. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/74840/3/2023_tese_jssilva.pdf. Acesso em 22 abr. 2026.
- STADNIK, M. J.; FREITAS, M. B. Algal polysaccharides. **Tropical Plant Pathology**, v. 39, p. 111–118, 2014. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/tpp/a/5w4s9jQ6MdbQGn6gPQDfMVw/?format=pdf&lang=en>. Acesso em 22 abr. 2026.

TEJADA, Manuel *et al.* Use of biostimulants on soil restoration: Effects on soil biochemical properties and microbial community. **Applied soil ecology**, v. 49, p. 11-17, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.009>. Acesso em 22 abr. 2026.

TRAON, Daniel *et al.* A Legal Framework for Plant Biostimulants and Agronomic Fertiliser Additives in the EU-Report to the European Commission, **DG Enterprise & Industry**. 2014. Disponível em: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/169265/1/A%20legal%20framework%20for%20plant%20biostimulants%20and%20agronomic%20fertilisers%20additives.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.

VIJAYANAND, N. *et al.* Seaweed extracts in crops. **Asian Pacific Journal of Reproduction**, v. 3, p. 150–155, 2014. DOI: 10.1016/S2305-0500(14)60019-1.

XAVIER, V. L. **Bioinsumos no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – ENAP, 2022. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/jspui/bitstream/1/7351/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20%20Vanessa%20Lucas%20Xavier.pdf>. Acesso em 22 abr. 2026.

YAKHIN, O. I. *et al.* Biostimulants global perspective. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 2049, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>.