

Bioinsumos na Agricultura

Fundamentos, aplicações e perspectivas
para a produção sustentável no Brasil



Organizadores

Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva



Bioinsumos na Agricultura

Fundamentos, aplicações e perspectivas
para a produção sustentável no Brasil



Organizadores

Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva



1.^a Edição - Copyrights do texto - Autores e Autoras

Direitos de Edição Reservados à Editora Terried

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte.



O conteúdo dos capítulos apresentados nesta obra são de inteira responsabilidade d@s autor@s, não representando necessariamente a opinião da Editora.

Permitimos a reprodução parcial ou total desta obra, considerado que seja citada a fonte e a autoria, além de respeitar a Licença Creative Commons indicada.

Conselho Editorial

Adilson Cristiano Habowski - ***Currículo Lattes***

Adilson Tadeu Basquerote Silva - ***Currículo Lattes***

Alexandre Carvalho de Andrade - ***Currículo Lattes***

Alasse Oliveira da Silva (USP) - ***Currículo Lattes***

Anísio Batista Pereira - ***Currículo Lattes***

Celso Gabatz - ***Currículo Lattes***

Cristiano Cunha Costa - ***Currículo Lattes***

Denise Santos Da Cruz - ***Currículo Lattes***

Emily Verônica Rosa da Silva Feijó - ***Currículo Lattes***

Fabiano Custódio de Oliveira - ***Currículo Lattes***

Fernanda Monteiro Barreto Camargo - ***Currículo Lattes***

Fredi dos Santos Bento - ***Currículo Lattes***

Guilherme Mendes Tomaz dos Santos - ***Currículo Lattes***

Humberto Costa - ***Currículo Lattes***

Leandro Antônio dos Santos - ***Currículo Lattes***

Lourenço Resende da Costa - ***Currículo Lattes***

Marcos Pereira dos Santos - ***Currículo Lattes***

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Bioinsumos na Agricultura: Fundamentos, Aplicações e Perspectivas para a Produção Sustentável no Brasil. Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva (Organizadores) -- Alegrete, RS : Editora Terried, 2026.

PDF.

ISBN. 978-65-83367-92-1

1. Agricultura

24-225451

CDD-918.17

Índices para catálogo sistemático:

1. Educação 90.14
2. Ensino 90.9



www.terried.com

contato@terried.com

APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresento a obra **Bioinsumos na Agricultura: Fundamentos, Aplicações e Perspectivas para a Produção Sustentável no Brasil**.

O presente livro foi elaborado com o objetivo de reunir informações científicas atualizadas sobre um dos temas mais relevantes para a agricultura contemporânea: o desenvolvimento e a utilização de bioinsumos em sistemas de produção agrícola.

Os capítulos foram organizados de forma sequencial e didática, permitindo ao leitor compreender inicialmente o panorama dos bioinsumos no Brasil e no mundo, avançando para sua relação com a agricultura regenerativa e, posteriormente, para aplicações específicas envolvendo microrganismos promotores de crescimento, biofungicidas e bioestimulantes. Dessa forma, a obra estabelece uma conexão entre os fundamentos conceituais e as aplicações práticas dessas tecnologias no campo.

Mais do que apresentar conhecimentos técnicos, este livro busca contribuir para a difusão de soluções sustentáveis capazes de aumentar a eficiência produtiva, promover a saúde do solo, reduzir impactos ambientais e fortalecer a competitividade da agricultura brasileira.

Espero que esta publicação possa servir como referência para estudantes, pesquisadores, professores, extensionistas, consultores e produtores rurais interessados nas oportunidades e nos desafios associados ao uso de bioinsumos na agricultura.

Boa leitura.

Alasse Oliveira da Silva

Engenheiro Agrônomo

Mestre em Produção Vegetal

Doutorando em Fitotecnia – ESALQ/USP

PREFÁCIO

A agricultura moderna enfrenta desafios cada vez mais complexos relacionados à produção de alimentos, à conservação dos recursos naturais e à necessidade de desenvolver sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, os bioinsumos têm assumido papel de destaque como ferramentas capazes de integrar produtividade, inovação e responsabilidade ambiental.

O avanço das pesquisas em microbiologia agrícola, fisiologia vegetal e manejo sustentável tem ampliado o conhecimento sobre os mecanismos pelos quais microrganismos benéficos, bioestimulantes e compostos naturais contribuem para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Paralelamente, a crescente demanda por sistemas produtivos mais resilientes impulsiona a adoção dessas tecnologias em diferentes regiões do mundo.

O Brasil ocupa posição estratégica nesse cenário. A experiência consolidada em fixação biológica de nitrogênio, controle biológico, manejo conservacionista do solo e agricultura tropical tornou o país uma referência internacional no desenvolvimento e utilização de bioinsumos. O crescimento contínuo desse setor demonstra que essas ferramentas passaram a desempenhar papel relevante na agricultura contemporânea.

Esta obra reúne conhecimentos fundamentais e aplicações práticas relacionadas aos bioinsumos, abordando desde o panorama nacional e internacional do setor até temas ligados à agricultura regenerativa, aos microrganismos promotores de crescimento, aos biofungicidas e aos bioestimulantes. A proposta é oferecer ao leitor uma visão integrada sobre os principais avanços científicos e tecnológicos que vêm contribuindo para a construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Espera-se que este livro sirva como fonte de consulta para estudantes, pesquisadores, professores, profissionais das Ciências Agrárias e produtores rurais, contribuindo para a disseminação do conhecimento e para o fortalecimento da agricultura baseada em ciência, inovação e sustentabilidade.

Piracicaba, São Paulo, Brasil

Alasse Oliveira da Silva

Engenheiro Agrônomo

Mestre em Produção Vegetal

Doutorando em Fitotecnia – ESALQ/USP

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

PANORAMA DE BIOINSUMOS NO BRASIL E NO MUNDO.....9

Dioclea Almeida Seabra Silva; Vitor Henrique Gonçalves Lopes; Tamiris Alves Dos Santos; Harleson Sidney Almeida Monteiro; Sinara de Nazaré Santana Brito; Alane Oliveira da Silva; Karen Nascimento Campos; Antonio Carlos Inforçato Rodrigues; Iracema Alves Manoel Degaspari; Jhonatah Albuquerque Gomes; Alasse Oliveira da Silva

CAPÍTULO 2

AGRICULTURA REGENERATIVA NO BRASIL: OPORTUNIDADES, LIMITES E DESAFIOS PARA SISTEMAS AGRÍCOLAS.....25

Damiana Roberta dos Santos Avelino; Pedro Vinicius Nogueira de Oliveira; Sabrina Yumi Odate de Carvalho; Iracema Alves Manoel Degaspari; Dimas Luiz da Silva Cappovila; Daví Eduardo Furno Feliciano; Alane Oliveira da Silva; Livia Vitória Das Neves Silva; Vitor Henrique Gonçalves Lopes; Laís Viana Bruneli; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 3

***TRICHODERMA SPP. E BACILLUS SPP.* NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL.....43**

Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva; Alane Oliveira da Silva; Renata da Silva Arruda; Vitor Henrique Gonçalves Lopes; Maria Luiza de Sateles Bueno; Harleson Sidney Almeida Monteiro; Sinara de Nazaré Santana Brito; Iracema Alves Manoel Degaspari; Jéssica Tomé da Silva; Raimundo Amaro Ribeiro Conde

CAPÍTULO 4

BIOFUNGICIDAS NO BRASIL: USO E APLICAÇÃO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS.....59

Leonardo De Cillo Duarte Novaes; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Maila Pereira de Almeida; Natanael Lucena Ferreira; Mário Jorge Amoras Alves Filho; Lorrany Silva Moraes Amoras; Daniele Soares Barroso; Vitor Henrique Gonçalves Lopes; Dioclea Almeida Seabra Silva; Alane Oliveira da Silva

CAPÍTULO 5

USO DE AMINOÁCIDOS E BIOESTIMULANTES À BASE DE BIOINSUMOS NA AGRICULTURA.....74

Alane Oliveira da Silva; Dimas Luiz da Silva Cappovila; Eduardo Guimarães Bonatti; Maurício Felipe Silva; Antônio Elison da Silva; Vitor Henrique Gonçalves Lopes; Tamiris Alves Dos Santos; Harleson Sidney Almeida Monteiro; Iego Sampaio de Sousa; Iracema Alves Manoel Degaspari; Felipe Valadares Ribeiro Avelar; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes

SOBRE AS AUTORAS E OS AUTORES.....89

CAPÍTULO 1

PANORAMA DE BIOINSUMOS NO BRASIL E NO MUNDO

Adoption of Bioinputs in Brazil and Worldwide

Dioclea Almeida Seabra Silva
Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Tamiris Alves Dos Santos
Harleson Sidney Almeida Monteiro
Sinara de Nazaré Santana Brito
Alane Oliveira da Silva
Karen Nascimento Campos
Antonio Carlos Inforçato Rodrigues
Iracema Alves Manoel Degaspari
Jhonatah Albuquerque Gomes
Alasse Oliveira da Silva

Resumo: Os bioinsumos passaram de tecnologias associadas a nichos produtivos para componentes de manejo em sistemas agrícolas pressionados por resistência de pragas, patógenos e plantas daninhas, custo de fertilizantes minerais, restrições regulatórias a moléculas sintéticas, demanda por rastreabilidade e exigência de menor impacto ambiental. Este capítulo analisa o panorama global e brasileiro de utilização de bioinsumos, com foco em trajetória histórica, mercado, categorias de produto, marco regulatório e barreiras para consolidação técnica do setor. No Brasil, a institucionalização do tema ocorreu com o Programa Nacional de Bioinsumos, instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, e com a Lei dos Bioinsumos, sancionada em 2024. Em 2025, o mercado nacional atingiu R\$ 6,2 bilhões em vendas e 194 milhões de hectares tratados, com concentração em soja, milho e cana-de-açúcar. A literatura indica que o país reúne vantagens associadas à fixação biológica de nitrogênio, biodiversidade microbiana, pesquisa pública e escala produtiva, mas ainda enfrenta lacunas de eficácia agrônômica, qualidade, rastreabilidade, logística, assistência técnica e acesso por culturas de menor escala e agricultura familiar. Conclui-se que a consolidação dos bioinsumos depende de fortalecimento regulatório, ampliação de protocolos técnicos e transformação dos produtos biológicos em manejo agrônômico consistente.

Palavras-chave: bioinsumos; controle biológico; inoculantes; biofertilizantes; biopesticidas; política agrícola.

Abstract: Bioinputs have shifted from technologies associated with production niches to management components in agricultural systems pressured by pest, pathogen and weed resistance, mineral fertilizer costs, regulatory restrictions on synthetic molecules, traceability demands and lower environmental impact requirements. This chapter analyzes the global and Brazilian panorama of bioinput use, focusing on historical trajectory, market dynamics, product categories, regulatory framework and barriers to technical consolidation. In Brazil, the institutionalization of the topic occurred through the National Bioinputs Program, established by Decree No. 10,375/2020, and through the Bioinputs Law, enacted in 2024. In 2025, the national market reached BRL 6.2 billion in sales and 194 million hectares treated, with concentration in soybean, maize and sugarcane. The literature indicates that the country has advantages related to biological nitrogen fixation, microbial biodiversity, public research and production scale, but still faces gaps in agronomic efficacy, quality, traceability, logistics, technical assistance and access for minor crops and family farming. The consolidation of bioinputs therefore depends on regulatory strengthening, expansion of technical protocols and the conversion of biological products into consistent agronomic management.

Keywords: bioinputs; biological control; inoculants; biofertilizers; biopesticides; agricultural policy.

INTRODUÇÃO

Os bioinsumos passaram de tecnologias associadas a nichos produtivos para componentes de manejo em sistemas agrícolas pressionados por resistência de pragas, patógenos e plantas daninhas, custo de fertilizantes minerais, restrições regulatórias a moléculas sintéticas, demanda por rastreabilidade e exigência de menor impacto ambiental. Essa transição não ocorreu por substituição imediata dos insumos químicos, mas por reorganização técnica de práticas já consolidadas na agricultura, como inoculação microbiana, controle biológico, manejo integrado de pragas e uso de substâncias naturais com ação fisiológica sobre plantas (GOULET, 2021; BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

O termo bioinsumo não apresenta definição uniforme na literatura internacional. No Brasil, sua institucionalização ocorreu com o Programa Nacional de Bioinsumos (PNB), instituído pelo Decreto nº 10.375/2020, e com a Lei dos Bioinsumos, sancionada em 2024. O conceito nacional reúne produtos de ori-

gem biológica destinados ao uso agropecuário, com inoculantes microbianos, bactérias fixadoras de nitrogênio, microrganismos promotores de crescimento, biofungicidas, bioinseticidas, bionematicidas, bioestimulantes, substâncias húmicas e extratos naturais (IPEA, 2024). No exterior, termos como *agricultural biologicals*, *biopesticides*, *biofertilizers* e *biostimulants* correspondem a categorias técnicas e regulatórias próprias, com limites que nem sempre coincidem com a classificação brasileira. Essa diferença conceitual compromete comparações diretas de mercado entre países e exige explicitação do escopo de cada fonte (DU JARDIN, 2015; CALVO et al., 2014).

O Brasil ocupa posição particular nesse debate. A agricultura tropical, a diversidade microbiana, a escala de produção de soja e a tradição científica em fixação biológica de nitrogênio (FBN) constituem base técnica distinta da observada em mercados temperados. A pesquisa conduzida desde a década de 1950, com destaque para Johanna Döbereiner, estruturou o uso de inoculantes em soja e contribuiu para reduzir a dependência de adubação nitrogenada mineral nessa cultura (FAPESP, 2023; EMBRAPA, 2023). Em 2025, o mercado nacional de bioinsumos atingiu R\$ 6,2 bilhões, com 194 milhões de hectares tratados e aumento de 28% em área frente a 2024 (CROPLIFE BRASIL, 2026; AGFEED, 2026).

A expansão do setor, entretanto, não deve ser interpretada como adoção homogênea. Soja, milho e cana-de-açúcar responderam por 94% do mercado, enquanto culturas de menor escala, fruticultura, hortaliças e agricultura familiar permaneceram com menor oferta de produtos e assistência técnica especializada (CROPLIFE BRASIL, 2026). Além disso, o marco regulatório ainda demanda protocolos operacionais para eficácia agrônômica, qualidade, rastreabilidade, fiscalização e produção própria em propriedades rurais. Este capítulo analisa o panorama global e brasileiro de utilização de bioinsumos, com foco em trajetória histórica, mercado, categorias de produto, marco regulatório e barreiras para consolidação técnica do setor.

METODOLOGIA

O capítulo foi elaborado por revisão bibliográfica sistematizada de caráter narrativo, conduzida entre março e maio de 2026. A revisão abrangeu publicações científicas, documentos técnicos, normas legais, bases institucionais e relatórios de mercado referentes ao período de 1950 a 2026.

Fontes de dados

As buscas foram realizadas nas seguintes fontes:

- Periódicos científicos: SciELO, Scopus, Web of Science, Periódicos CAPES e Google Scholar.
- Repositórios institucionais: Embrapa (Ainfo), IPEA, ESALQ/USP (Visão Agrícola), UTFPR (Revista Tecnologia e Sociedade), Universidade Federal de Lavras e Instituto Biológico (SP).
- Dados de mercado: CropLife Brasil (CropData, Boletins Trimestrais 2024–2026), Mordor Intelligence, IMARC Group, Fortune Business Insights, Spherical Insights, Biologicals Latam e AgriBrasilis.
- Documentos oficiais: Decreto nº 10.375/2020 (PNB), Lei dos Bioinsumos (2024), Instrução Normativa MAPA nº 61/2020, AGROFIT/MAPA, normas da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) e Regulamento Europeu 2019/1009.
- Veículos especializados e instituições: Forbes Agro, Notícias Agrícolas, Agfeed, Portal do Agronegócio, Revista Pesquisa FAPESP, APD Brasil e Embrapa.

Estratégia de busca e descritores

Os descritores foram empregados em português, inglês e espanhol: bioinsumo, biological input, biofertilizante, biopesticida, biocontrol, inoculante, fixação biológica de nitrogênio, FBN, controle biológico, mercado biológico, agricultural biologicals, biopesticide market, biofertilizer, biostimulant, PGPR, Azospirillum, Bradyrhizobium e Trichoderma. As combinações utilizaram operadores booleanos AND e OR. As buscas foram organizadas por categoria de bioinsumo, região geográfica, período histórico e cultura agrícola.

Crítérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos em periódicos com avaliação por pares, dissertações, teses, documentos técnicos de instituições de pesquisa, relatórios de mercado com fonte identificada e dados oficiais de registro. Foram excluídos materiais

de divulgação comercial sem base metodológica verificável, textos sem autoria identificável e estimativas de mercado sem escopo declarado. As fontes publicadas ou atualizadas após 2020 receberam prioridade, exceto textos históricos necessários para reconstrução da trajetória científica do setor.

DESENVOLVIMENTO

Breve história: das bases científicas ao mercado global

O uso agrícola de microrganismos antecede o termo bioinsumo. A rotação com leguminosas, adotada de forma empírica desde a Antiguidade greco-romana, só recebeu explicação científica no fim do século XIX. Em 1888, Hermann Hellriegel e Hermann Wilfarth demonstraram que bactérias associadas a nódulos radiculares de leguminosas participavam da fixação do nitrogênio atmosférico, base conceitual da inoculação moderna (FAPESP, 2023).

No Brasil, a formação do campo científico dos bioinsumos modernos está associada aos trabalhos de Johanna Döbereiner (1924–2000) e Ruy Jardim Freire (1923–2015), iniciados nos anos 1950 e consolidados em décadas posteriores. Em um período marcado pela valorização da adubação nitrogenada mineral, Döbereiner defendeu a seleção de estirpes de *Bradyrhizobium* adaptadas a solos tropicais como estratégia para viabilizar a FBN na sojicultura. A adoção dessa tecnologia reduziu a necessidade de nitrogênio mineral na soja e alterou a estrutura de custos da cultura no país (FAPESP, 2023).

O controle biológico com macrorganismos ganhou escala no Brasil a partir dos anos 1970, com destaque para *Cotesia flavipes* contra broca-da-cana e *Trichogramma pretiosum* contra lepidópteros. A partir dos anos 2000, produtos com fungos entomopatogênicos, como *Beauveria bassiana* e *Metarhizium anisopliae*, e bactérias como *Bacillus thuringiensis* e *Bacillus subtilis* passaram a integrar programas de manejo. Essa expansão dependeu de formulações com maior estabilidade, produção industrial e rede técnica capaz de orientar aplicação, armazenamento e compatibilidade com defensivos químicos (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

No mercado internacional, os produtos biológicos agrícolas consolidaram presença comercial nas décadas de 1990 e 2000. A expansão foi impulsionada por regulação mais restritiva a pesticidas convencionais na Europa e nos Estados

Unidos, crescimento da produção orgânica e entrada de empresas globais de insumos no setor de biológicos. A trajetória de empresas como Koppert, BioWorks e Marrone Bio Innovations mostra que o setor deixou de depender apenas de empresas especializadas e passou a compor estratégias de portfólio de grupos agroquímicos multinacionais (BIOLOGICALS LATAM, 2025; FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

Panorama global: mercado, categorias e distribuição geográfica

O mercado global de bioinsumos agrícolas foi estimado entre USD 12 bilhões e USD 14 bilhões em 2023/2024, a depender do escopo adotado por cada relatório. As projeções indicam valor superior a USD 29 bilhões até 2034, com taxa composta anual próxima de 9% a 11% (BIOLOGICALS LATAM, 2025; FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024). Esses números devem ser lidos com cautela, pois alguns relatórios agregam biopesticidas, biofertilizantes e bioestimulantes, enquanto outros analisam apenas uma dessas categorias.

A distribuição geográfica do mercado revela assimetria regulatória, econômica e técnica. A América do Norte, com liderança dos Estados Unidos e do Canadá, concentra parcela expressiva do mercado global, sustentada por uma trilha regulatória específica para biopesticidas na EPA. A agência classifica esses produtos em três grupos: microrganismos, substâncias naturais e pesticidas incorporados a plantas. Esse arranjo favoreceu registros mais ajustados à natureza biológica dos produtos, embora não elimine exigências toxicológicas e ambientais.

A Europa combina regulação restritiva para pesticidas químicos, metas ambientais e normas específicas para fertilizantes e bioestimulantes, como o Regulamento Europeu 2019/1009. França, Alemanha, Espanha e Itália lideram a adoção na região, em parte por pressão regulatória e por mercados com maior presença de certificações, produção orgânica e rastreabilidade (APD BRASIL, 2025).

A América Latina ocupa posição estratégica pela expansão da soja, do milho e da cana-de-açúcar. O Brasil lidera o mercado regional, seguido por Argentina, México e Colômbia. A Ásia-Pacífico apresenta crescimento associado a programas governamentais de redução de agroquímicos, expansão da agricultura orgânica e demanda por soluções em arroz, hortaliças e frutas (AGRIBRASILIS, 2025; APD BRASIL, 2025).

Tabela 1. Mercado global de bioinsumos por região — participação estimada e tendência de expansão em 2024.

Região	Participação estimada (%)	CAGR projetado (2024–2030)	Fator de expansão
América do Norte (EUA/Canadá)	35–40	8–10	Regulação EPA; mercado orgânico consolidado
Europa	25–30	10–12	Green Deal; Regulamento UE 2019/1009; restrição a pesticidas
América Latina (liderada pelo Brasil)	15–20	12–15	Soja; manejo integrado de pragas
Ásia-Pacífico	12–15	10–13	Programas governamentais; expansão do orgânico
África e Oriente Médio	3–5	7–9	Programas de segurança alimentar; cooperação internacional

Fontes: Fortune Business Insights (2024); Biologicals Latam (2025); APD Brasil (2025); CropLife Brasil (2026).

Entre as categorias globais, os biopesticidas — bioinseticidas, biofungicidas e bionematicidas — concentram a maior parcela em valor, estimada em 55% a 60%. Biofertilizantes, com inoculantes e solubilizadores de fosfato, respondem por 20% a 25%. Bioestimulantes representam cerca de 15% a 20% e constituem o segmento com crescimento proporcional mais alto no período recente (MORDOR INTELLIGENCE, 2024).

Panorama brasileiro: trajetória histórica e dados recentes

O Brasil figura entre os maiores usuários de bioinsumos em escala agrícola, tanto em valor de mercado quanto em área tratada (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2026). Essa posição decorre da combinação entre pesquisa em FBN desde os anos 1950, infraestrutura industrial de inoculantes, difusão da soja em ambiente tropical e ambiente regulatório mais favorável a partir dos anos 2000 (FAPESP, 2023; BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

Em 2025, o mercado brasileiro de bioinsumos alcançou R\$ 6,2 bilhões em vendas, alta de 15,2% sobre os R\$ 5,3 bilhões registrados em 2024. A área tratada chegou a 194 milhões de hectares, aumento de 28% frente aos 151 milhões

de hectares do ano anterior (CROPLIFE BRASIL, 2026; AGFEED, 2026). O contraste entre crescimento em área e crescimento em valor indica expansão de uso, mas também sugere mudança na composição de produtos, preços, doses ou segmentos adotantes.

Entre 2022 e 2024, o crescimento médio anual do setor ficou próximo de 15%. O avanço de 28% em área tratada em 2025 indica aceleração da adoção operacional. Essa aceleração pode estar associada à maior disponibilidade de produtos registrados, avanço de protocolos de manejo integrado de pragas, pressão por redução de custos e atuação de redes de distribuição técnica (AGFEED, 2026; CROPLIFE BRASIL, 2026).

Distribuição por segmento de produto

A CropLife Brasil monitora quatro segmentos no mercado nacional de bioinsumos: inoculantes, bioinseticidas, bionematicidas e biofungicidas. Em 2025, a distribuição por área tratada foi: inoculantes, 40%; bioinseticidas, 24%; bionematicidas, 23%; e biofungicidas, 13%. Em valor de mercado, bioinseticidas lideraram, com 35% do total e R\$ 2,1 bilhões; bionematicidas responderam por 30% e R\$ 1,8 bilhão; biofungicidas, por 22% e R\$ 1,4 bilhão; inoculantes, por 13% e R\$ 812 milhões (CROPLIFE BRASIL, 2026; AGFEED, 2026).

Os biofungicidas apresentaram crescimento de 41% em valor e 37% em área tratada. Esse avanço está ligado à busca por alternativas no manejo de doenças de difícil controle, como mofo branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) e ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). Os bionematicidas tiveram a maior expansão em área, com acréscimo de 16 milhões de hectares e crescimento de 60% de 2024 para 2025. Esse resultado reflete a pressão de nematoides fitoparasitas, entre eles *Heterodera glycines*, *Pratylenchus brachyurus* e *Meloidogyne* spp., nas áreas de soja e a limitação de alternativas químicas com efeito duradouro (AGFEED, 2026).

Tabela 2. Mercado brasileiro de bioinsumos por segmento em 2025.

Segmento	Valor de mercado (R\$ bi)	Crescimento em valor (%)	Área tratada (milhões ha)	Crescimento em área (%)
Bioinseticidas	2,1	+33,4	47	+42
Bionematicidas	1,8	-10,4	44	+60
Biofungicidas	1,4	+41	26	+37
Inoculantes	0,8	+13	77	+9
Total	6,2	+15,2	194	+28

Fontes: CropLife Brasil (2026); Agfeed (2026).

Distribuição por cultura e região

A soja respondeu por 62% do valor de mercado de bioinsumos no Brasil, seguida por milho, com 22%, e cana-de-açúcar, com 10%. Em conjunto, essas três culturas responderam por 94% do mercado. Esse padrão confirma a força da sojicultura como vetor de adoção, mas também expõe baixa penetração em hortaliças, fruticultura, culturas perenes de menor escala e agricultura familiar (CROPLIFE BRASIL, 2026).

Mato Grosso foi o maior consumidor estadual, com 24% do mercado, impulsionado pela área de soja e pelo uso de inoculantes em cerca de 90% da área da cultura no estado. São Paulo respondeu por 17%, com participação da cana-de-açúcar e dos citros. Goiás respondeu por 14%. A região do MATOPIBA alcançou 11% da área tratada, com expansão associada à fronteira agrícola e à adoção de pacotes tecnológicos por produtores de grãos (AGFEED, 2026; CROPLIFE BRASIL, 2026).

Registros de produtos e expansão da oferta

Em 2025, o Brasil registrou número recorde de bioinsumos aprovados pelo Mapa. Esse resultado se relaciona à simplificação regulatória iniciada pelo PNB em 2020 e ao aumento dos investimentos privados em pesquisa e desenvolvimento de ingredientes ativos (AGROLINK, 2026; AGROEMCAMPO, 2026).

Dados do AGROFIT referentes a 2022 indicavam 3.213 produtos formulados registrados, dos quais 485 eram bioinsumos para controle biológico, equi-

valentes a 15% do total. A oferta concentrava-se em poucos ingredientes ativos: *Beauveria bassiana* aparecia em 11% dos inseticidas microbiológicos; *Bacillus thuringiensis* e *Bacillus subtilis* compunham 24% dos nematicidas registrados (BORTOLOTI; SAMPAIO, 2024). A concentração em poucos microrganismos revela avanço regulatório, mas também estreitamento tecnológico, pois o produtor recebe maior número de marcas sem, necessariamente, dispor de maior diversidade funcional.

Marco regulatório: avanços e lacunas

A regulação brasileira dos bioinsumos passou por três fases. A primeira, de 1989 a 2002, foi marcada pelo enquadramento dos produtos biológicos na Lei dos Agrotóxicos (Lei nº 7.802/1989). Esse instrumento foi concebido para produtos químicos e não contemplava, de forma adequada, a natureza de organismos vivos, agentes microbianos, macrorganismos e substâncias naturais (BORTOLOTI; SAMPAIO, 2024).

A segunda fase, entre 2002 e 2020, ocorreu por adaptação normativa. O Decreto nº 4.074/2002 e as Instruções Normativas Conjuntas nº 1/2006, nº 2/2006, nº 3/2006 e nº 32/2005 criaram categorias para semioquímicos, macrobiológicos, microbiológicos e bioquímicos. A Instrução Normativa MAPA nº 61/2020 criou categoria para bioestimulantes, com definição regulatória própria (MAPA, 2020).

A terceira fase começou com o Decreto nº 10.375/2020, que instituiu o PNB, e avançou com a Lei dos Bioinsumos, sancionada em 2024. O PNB estabeleceu diretrizes para pesquisa, inovação, produção e uso de bioinsumos, com foco em simplificação regulatória, redução de custos de registro e aproveitamento da biodiversidade brasileira (BRASIL, 2020). A Lei dos Bioinsumos criou marco legal próprio para o setor, com regras sobre produção, registro, comercialização, fiscalização, pesquisa e produção para uso próprio.

Persistem lacunas operacionais. Pesquisadores do Instituto Biológico e especialistas analisados por Bortoloti e Sampaio (2024) apontam ausência de protocolos obrigatórios de eficácia agrônômica para determinadas categorias, concentração dos registros em poucos ingredientes ativos e alvos biológicos,

insuficiência de assistência técnica e oferta restrita para pequenas culturas e agricultura familiar. Essas lacunas indicam que o avanço legal, embora necessário, não resolve sozinho problemas de qualidade, recomendação agrônômica e acesso.

Tabela 3. Evolução do marco regulatório brasileiro para bioinsumos.

Período	Instrumento	Avanço	Limitação identificada
1989	Lei nº 7.802/1989	Base legal para produtos fitossanitários	Inadequação às especificidades biológicas
2002	Decreto nº 4.074/2002	Inclusão formal de produtos biológicos	Exigências ainda moldadas pelo padrão químico
2005–2006	INC nº 1, 2, 3 e 32	Categorias para macrobiológicos, microbiológicos, semioquímicos e bioquímicos	Lacunas para extratos vegetais e compostos emergentes
2020	Decreto nº 10.375/2020 (PNB)	Programa nacional; fomento à pesquisa e ao registro	Dependência de ações posteriores
2020	IN MAPA nº 61/2020	Categoria regulatória para bioestimulantes	Protocolo de eficácia ainda insuficiente
2024	Lei dos Bioinsumos	Marco legal próprio para o setor	Necessidade de atos infralegais para pontos operacionais

Desafios para consolidação do setor

A consolidação dos bioinsumos como componente estável da agricultura brasileira depende de cinco desafios interligados.

Concentração em culturas de escala

A dependência de soja, milho e cana-de-açúcar cria vulnerabilidade setorial. Oscilações de preço, mudanças no manejo dessas culturas ou alteração em políticas de crédito podem afetar a demanda por bioinsumos. A ampliação para hortaliças, fruticultura, cafeicultura e sistemas familiares exige produtos registrados, assistência técnica e estudos de eficácia em condições de cultivo distintas das commodities (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

Barreira técnica e cultural de adoção

O produtor está inserido em um sistema sociotécnico estruturado em torno de insumos químicos, máquinas calibradas para produtos convencionais, revendas especializadas e recomendações agronômicas construídas ao longo de décadas. Goulet (2021) interpreta os bioinsumos como nicho tecnológico em disputa com o regime dominante dos agrotóxicos. A adoção exige ajuste de janela de aplicação, compatibilidade com fungicidas e inseticidas, monitoramento ambiental, armazenamento adequado e expectativa realista de desempenho (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

Escala produtiva e custo

A produção de macrorganismos, fungos entomopatogênicos e formulações com nematoides entomopatogênicos exige infraestrutura específica e controle de qualidade. Em determinados nichos, o custo ainda reduz competitividade frente a produtos químicos. A regionalização da produção pode reduzir custo logístico e ajustar cepas e formulações a patossistemas locais, mas exige fiscalização e padronização técnica (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024; IPEA, 2024).

Estabilidade de formulações e logística

Bioinsumos com organismos vivos são sensíveis a temperatura, umidade, radiação e tempo de armazenamento. A contagem de unidades formadoras de colônia pode cair antes da aplicação quando transporte e armazenamento não obedecem às condições exigidas pelo fabricante. No Brasil, clima tropical e longas distâncias ampliam esse risco. A produção própria, adotada por alguns produtores para reduzir custos, demanda controle sanitário rigoroso, pois contaminações podem comprometer eficácia e segurança (FAPESP, 2023).

Assimetria de pesquisa e assistência técnica

A maior parte dos estudos agronômicos com bioinsumos no Brasil concentra-se em culturas de larga escala, genótipos comerciais, sistemas mecanizados e propriedades com alto nível tecnológico. Há menor acúmulo de evidências

para sistemas agroecológicos, policultivos, pequenas áreas e agricultura familiar. Essa assimetria limita recomendações técnicas e reproduz desigualdades de acesso aos benefícios da agricultura biológica (IPEA, 2024; BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

Perspectivas comparadas: Brasil, Europa e Estados Unidos

A comparação entre Brasil, Europa e Estados Unidos revela trajetórias institucionais distintas. Nos Estados Unidos, a EPA estruturou divisão específica para biopesticidas e prevenção da poluição, com classificação própria para produtos microbiológicos, bioquímicos e protetores incorporados a plantas. O mercado norte-americano combina empresas especializadas e conglomerados agroquímicos que incorporaram produtos biológicos a programas de manejo integrado (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2024).

Na Europa, a regulação de pesticidas químicos e fertilizantes criou ambiente favorável aos bioinsumos, mas também aumentou barreiras técnicas de entrada. A Diretiva 2009/128/CE, o Regulamento 1107/2009 e o Regulamento 2019/1009 reforçaram exigências sobre uso sustentável, autorização de produtos fitossanitários e produtos fertilizantes. O Regulamento Europeu Contra o Desmatamento (EUDR) acrescenta exigência de rastreabilidade para cadeias agrícolas exportadoras, fator que pode estimular adoção de tecnologias com menor pegada ambiental, desde que produtores consigam comprovar origem e conformidade documental (APD BRASIL, 2025).

No Brasil, a vantagem técnica em FBN e biodiversidade microbiana convive com dependência histórica de defensivos químicos e com uma rede de distribuição ainda orientada por produtos convencionais. O país tem potencial para exportar tecnologia, cepas, formulações e conhecimento agrônomo, em especial nos segmentos de inoculantes, fungos entomopatogênicos e biofungicidas. Esse potencial, entretanto, exige estratégia de propriedade intelectual, padronização de qualidade, acordos sanitários e programas de validação em outros ambientes agrícolas (NOTÍCIAS AGRÍCOLAS, 2026; CROPLIFE BRASIL, 2026).

CONCLUSÕES

O panorama global e brasileiro de bioinsumos na segunda metade da década de 2020 indica passagem de nicho tecnológico para componente de manejo agrícola. No Brasil, os dados de 2025 — R\$ 6,2 bilhões em vendas, 194 milhões de hectares tratados e crescimento de 28% em área — mostram que a adoção já integra rotinas produtivas em culturas de escala, sobretudo soja, milho e cana-de-açúcar (CROPLIFE BRASIL, 2026; AGFEED, 2026). No mercado global, a projeção de USD 29 bilhões até 2034 reforça a expansão internacional do setor (BIOLOGICALS LATAM, 2025).

Essa expansão, porém, não equivale a democratização tecnológica. A concentração em três culturas, a dependência de produtores com maior acesso a assistência técnica, as lacunas de avaliação de eficácia, a fragilidade logística e a baixa oferta para agricultura familiar limitam a amplitude da transição. Goulet (2021) mostra que bioinsumos não competem apenas no plano técnico; eles disputam confiança, rotinas de manejo, redes de conhecimento e estruturas de incentivo formadas pelo regime agroquímico.

O Brasil reúne condições para liderar parte da agricultura biológica global: experiência em FBN, pesquisa pública consolidada, escala produtiva e biodiversidade microbiana. O aproveitamento dessa posição depende de três ações: fortalecimento regulatório com protocolos de qualidade e eficácia; ampliação do acesso a culturas e produtores fora do eixo soja–milho–cana; e construção de assistência técnica capaz de transformar produto biológico em manejo agrônomo consistente. Sem essas ações, o setor pode crescer em faturamento e área tratada sem reduzir assimetrias de acesso e sem consolidar base científica equivalente à expansão comercial.

REFERÊNCIAS

AGFEED. Mercado de bioinsumos recupera fôlego, tem crescimento recorde e chega a mais de R\$ 6 bi. AGFeed, mar. 2026.

AGROEMCAMPO. Brasil bate recorde de registros de bioinsumos. AgroEmCampo, jan. 2026.

AGRIBRASILIS. Mercado global de bioinsumos deve dobrar até 2030. AgriBrasilis, abr. 2025.

AGROLINK. Brasil registra recorde de bioinsumos em 2025. Agrolink, jan. 2026.

APD BRASIL. Bioinsumos na agricultura: tendências e desafios na América Latina e na Europa. APD Brasil, jun. 2025.

BIOLOGICALS LATAM. El tamaño del mercado de bioinsumos superaría los US\$ 29 mil millones en 2034. Biologicals Latam, fev. 2025.

BORTOLOTTI, G.; SAMPAIO, R. M. Desafios e estratégias no desenvolvimento dos bioinsumos para controle biológico no Brasil. Revista Tecnologia e Sociedade, Curitiba, UTFPR, v. 20, 2024.

BRASIL. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos. Diário Oficial da União, Brasília, 2020.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. Plant and Soil, v. 383, n. 1-2, p. 3–41, 2014.

CROPLIFE BRASIL. Mercado de bioinsumos atinge R\$ 6,2 bilhões em vendas e área tratada cresce 28% em 2025. CropLife Brasil, abr. 2026.

CROPLIFE BRASIL. Adoção de bioinsumos cresceu 13% na safra 2024/2025. CropLife Brasil, jun. 2025.

CROPLIFE BRASIL. Mercado de bioinsumos cresceu 15% na safra 2023/2024. CropLife Brasil, jun. 2024.

DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae, v. 196, p. 3–14, 2015.

EMBRAPA. Bioinsumos: tendência de crescimento no Brasil. Embrapa, dez. 2023.

FAPESP — FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Os primeiros inoculantes. Revista Pesquisa FAPESP, São Paulo, n. 325, 2023.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. Agricultural biologicals market. Fortune Business Insights, 2024.

GOULET, F. Characterizing alignments in socio-technical transitions: Lessons from agricultural bio-inputs in Brazil. Technology in Society, v. 65, maio 2021.

IPEA — INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. A produção de bioinsumos no Brasil: desafios e potencialidades. Repositório IPEA, Brasília, dez. 2024.

MAPA — MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. MAPA, Brasília, 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. Brazil biostimulants market size and forecast. Mordor Intelligence, 2024.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. Brasil é um dos países que mais utiliza bioinsumos no mundo. Notícias Agrícolas, abr. 2026.

CAPÍTULO 2

AGRICULTURA REGENERATIVA NO BRASIL: OPORTUNIDADES, LIMITES E DESAFIOS PARA SISTEMAS AGRÍCOLAS

*Regenerative Agriculture in Brazil:
Opportunities, Limits, and Challenges for Agricultural Systems*

Damiana Roberta dos Santos Alvelino
Pedro Vinicius Nogueira de Oliveira
Sabrina Yumi Odate de Carvalho
Iracema Alves Manoel Degaspari
Dimas Luiz da Silva Cappovila
Daví Eduardo Furno Feliciano
Alane Oliveira da Silva
Lívia Vitória Das Neves Silva
Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Laís Viana Bruneli
Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: A agricultura regenerativa reúne práticas agrícolas voltadas à melhoria da qualidade do solo, ao aumento da biodiversidade funcional e à redução de emissões de gases de efeito estufa em sistemas produtivos. No Brasil, o tema ganhou relevância com políticas como o Plano ABC+, o RenovAgro e a expansão de sistemas como plantio direto, integração lavoura-pecuária-floresta e sistemas agroflorestais. Este capítulo revisa fundamentos conceituais, práticas associadas, oportunidades econômicas e desafios técnicos, sociais e institucionais da agricultura regenerativa no país. A literatura indica que sistemas agroflorestais, plantio direto consolidado, recuperação de pastagens e integração produtiva podem aumentar estoques de carbono, reduzir erosão e melhorar a estabilidade dos sistemas agrícolas. Contudo, a ausência de definição operacional única, os custos de transição, as incertezas dos mercados de carbono e a fragilidade da assistência técnica limitam a adoção em escala. Conclui-se que a agricultura regenerativa deve ser tratada como estratégia de manejo e governança territorial, dependente de métricas verificáveis, políticas públicas inclusivas e validação em diferentes biomas brasileiros.

Palavras-chave: agricultura regenerativa; saúde do solo; sistemas agroflorestais; plantio direto; carbono no solo; políticas públicas.

Abstract: Regenerative agriculture comprises farming practices aimed at improving soil quality, increasing functional biodiversity, and reducing greenhouse gas emissions in production systems. In Brazil, the topic has gained relevance through policies such as the ABC+ Plan, RenovAgro, and the expansion of no-tillage, crop-livestock-forest integration, and agroforestry systems. This chapter reviews conceptual foundations, associated practices, economic opportunities, and technical, social, and institutional challenges of regenerative agriculture in the country. The literature indicates that agroforestry systems, consolidated no-tillage, pasture restoration, and integrated production systems can increase carbon stocks, reduce erosion, and improve the stability of agricultural systems. However, the lack of a single operational definition, transition costs, uncertainties in carbon markets, and weaknesses in technical assistance limit large-scale adoption. Regenerative agriculture should therefore be treated as a management and territorial governance strategy, dependent on verifiable metrics, inclusive public policies, and validation across Brazilian biomes.

Keywords: regenerative agriculture; soil health; agroforestry systems; no-tillage; soil carbon; public policies.

INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição central na agricultura mundial, com participação expressiva na produção e exportação de soja, milho, café, cana-de-açúcar, algodão e proteína animal. Essa posição econômica convive com passivos ambientais em parte do território agrícola, como degradação do solo, perda de cobertura vegetal nativa, redução da biodiversidade, pressão sobre recursos hídricos e emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao setor agropecuário. A relação entre produção, conservação e acesso a mercados tornou-se mais estreita com a exigência de rastreabilidade e comprovação ambiental por compradores internacionais, em especial após a entrada em pauta de normas como o Regulamento Europeu contra o Desmatamento (EUDR) e instrumentos correlatos (MANGABEIRA et al., 2025).

Nesse contexto, a agricultura regenerativa passou a ocupar espaço na agenda agrícola, ambiental e financeira. O termo foi proposto por Robert Rodale em 1983, com referência a sistemas capazes de reabilitar ecossistemas produtivos e melhorar recursos naturais, em vez de apenas reduzir danos (RO-

DALE, 1983; CEBDS, 2023). Desde então, o conceito passou por diferentes interpretações, vinculadas a práticas de manejo, indicadores ambientais, metas climáticas, interesses de mercado e políticas públicas. Essa diversidade de interpretações explica tanto sua expansão quanto as dificuldades de padronização.

No Brasil, práticas associadas à agricultura regenerativa precedem o uso formal do termo. O Sistema de Plantio Direto (SPD), a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), os sistemas agroflorestais (SAFs), o uso de plantas de cobertura e a fixação biológica de nitrogênio integram há décadas programas de pesquisa, extensão e crédito rural. O Plano ABC, lançado em 2010, e sua continuidade, o Plano ABC+ para o período 2020–2030, estabeleceram metas para a adoção de sistemas de baixa emissão de carbono, embora não tenham utilizado originalmente a expressão “agricultura regenerativa” (CEBDS, 2023; CROPLIFE, 2026). O RenovAgro, criado no Plano Safra 2023/2024, ampliou essa trajetória ao vincular crédito rural à adoção de práticas com menor impacto ambiental.

A transição para sistemas agrícolas classificados como regenerativos, contudo, enfrenta entraves conceituais, técnicos, econômicos, sociais e institucionais. A ausência de definição única, a heterogeneidade edafoclimática entre biomas, a desigualdade de acesso a crédito e assistência técnica, a incerteza metodológica nos mercados de carbono e a fragilidade de sistemas de certificação dificultam a construção de recomendações e políticas consistentes. O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), em documento elaborado em 2023 com participação de empresas, academia, setor público e sociedade civil, apontou a ausência de definição comum como um dos principais obstáculos para certificação, financiamento e comunicação transparente no país (CEBDS, 2023).

Este capítulo apresenta uma análise crítica da agricultura regenerativa no Brasil a partir de quatro eixos: fundamentos conceituais e disputas de definição; práticas agrícolas associadas ao aumento da qualidade do solo, ao carbono e à biodiversidade; oportunidades vinculadas a políticas públicas, mercados de carbono e cadeias de valor; e desafios técnicos, econômicos, sociais e institucionais que condicionam a adoção em escala.

METODOLOGIA

Este capítulo foi elaborado por revisão bibliográfica sistemática e narrativa, com uso de artigos científicos, teses, dissertações, documentos técnicos, relatórios institucionais, legislação e dados de mercado. O levantamento foi realizado entre março e maio de 2026 e abrangeu publicações entre 1983 e 2026. O marco inicial corresponde ao trabalho de Rodale, citado como uma das formulações originais do termo agricultura regenerativa.

Fontes de dados

As buscas foram realizadas nas bases SciELO, Scopus, Web of Science, Periódicos CAPES, Dialnet e Google Scholar. Também foram consultados repositórios institucionais da Universidade Federal de Santa Maria, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade Estadual de Campinas, Universidade Federal do Acre e Instituto Federal Goiano.

Foram incluídos documentos técnicos e institucionais da Embrapa, do Ministério da Agricultura e Pecuária, do Ministério do Desenvolvimento Agrário, do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, do Centro Carbono USP, do CEBDS e do WBCSD. Relatórios de mercado e política pública da CropLife Brasil, BNDES, Faesp e Sistema FAEP foram usados para caracterizar crédito rural, mercados de carbono, certificação e cadeias de valor.

Estratégia de busca

Foram utilizados descritores em português e inglês: agricultura regenerativa, regenerative agriculture, plantio direto, integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas agroflorestais, sequestro de carbono, mercado de carbono, saúde do solo, degradação do solo, transição agroecológica, Plano ABC, agricultura de baixo carbono, carbon sequestration e soil health. Os termos foram combinados por operadores booleanos AND e OR.

A busca foi estratificada por dimensão temática: definição conceitual, práticas agrícolas, carbono no solo, biodiversidade, mercado de carbono, políticas públicas, certificação, desafios socioeconômicos e governança. A análise também considerou a escala de aplicação das práticas, distinguindo propriedade rural, bacia hidrográfica, bioma e território nacional.

Crítérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos originais em periódicos com avaliação por pares, revisões sistemáticas, dissertações, teses, documentos técnicos e relatórios de organizações governamentais ou intergovernamentais com metodologia explícita. Para mercado, crédito e política pública, foram aceitos relatórios setoriais e notícias técnicas com fonte identificada.

Foram excluídos textos de divulgação sem base documental, publicações sem autoria identificável e estudos laboratoriais sem relação com sistemas de produção ou campo. Ao final da triagem, 72 referências foram selecionadas, das quais 48 foram incorporadas diretamente ao texto. A síntese buscou identificar convergências, divergências e limitações da literatura, evitando tratar a agricultura regenerativa como solução única para todos os sistemas produtivos.

DESENVOLVIMENTO

O debate conceitual: uma definição em construção

A agricultura regenerativa ainda não possui definição universalmente aceita pela comunidade científica ou por organismos reguladores. Essa lacuna tem efeito prático sobre políticas públicas, certificações, instrumentos financeiros, contratos de carbono e comunicação com produtores. Newton et al. (2020), ao analisarem 229 artigos científicos e 25 plataformas profissionais, identificaram discrepâncias entre definições adotadas por pesquisadores e agentes de mercado, com variação entre abordagens baseadas em práticas e abordagens baseadas em resultados (apud CEBDS, 2023).

Duas perspectivas organizam o debate. A primeira define agricultura regenerativa pela adoção de práticas, como plantio direto, rotação de culturas, cobertura permanente do solo, integração lavoura-pecuária-floresta e sistemas agroflorestais. A segunda define o sistema pelos resultados obtidos, como redução de emissões de GEE, aumento do carbono orgânico do solo, melhoria da qualidade da água e conservação da biodiversidade (CEBDS, 2023; SCHREFFEL et al., 2020). O CEBDS propõe que a definição brasileira incorpore práticas e resultados, com inclusão de critérios ambientais, econômicos e sociais,

para evitar que a adoção fique restrita a produtores com maior acesso a capital e infraestrutura técnica (CEBDS, 2023).

A proposta de maior detalhamento metodológico para o contexto brasileiro é o Protocolo Padrão de Agricultura Regenerativa Sustentável (PARS), desenvolvido em 2025 por pesquisadores da Embrapa, Unicamp, USP/FEA, Universidade da Califórnia-Santa Cruz e Universidade Federal do Acre, em colaboração com o Ministério do Desenvolvimento Agrário (MANGABEIRA et al., 2025). O PARS propõe avaliação multicritério com seis dimensões: ambiental, socioeconômica, governança, agropecuária, biodiversidade e cultural. O protocolo utiliza 124 indicadores ranqueados e ponderados, com índice decimal de 0 a 10 para classificar Unidades de Produção Agrícola em cinco níveis: não conformidade, conformidade baixa, média, avançada e especialista. A unidade produtiva é classificada no nível especialista quando alcança escore entre 8,1 e 10, com emissão líquida zero ou remoção positiva de carbono (MANGABEIRA et al., 2025).

O detalhamento do PARS favorece certificação e rastreabilidade, mas também representa desafio operacional. A coleta de 124 indicadores demanda equipe técnica, custo de avaliação e infraestrutura de monitoramento. Em pesquisa associada ao CEBDS, Cerri mapeou 38 indicadores de qualidade do solo e, após seleção estatística, propôs um conjunto mínimo de 5 a 7 indicadores, ainda dependentes de análises laboratoriais (CEBDS, 2023). A simplificação das métricas, sem perda de confiabilidade, permanece como condição para ampliar o acesso de pequenos e médios produtores a programas de certificação e crédito de carbono.

PRÁTICAS REGENERATIVAS E FUNDAMENTOS TÉCNICOS

Saúde do solo como eixo do sistema

O solo é o principal componente biofísico da agricultura regenerativa. Solos com maior teor de matéria orgânica, estrutura estável, atividade biológica e cobertura permanente apresentam maior capacidade de infiltração de água, ciclagem de nutrientes e proteção contra erosão. Em termos de carbono, o solo agrícola pode atuar como fonte ou dreno de GEE, dependendo do manejo adotado (CERRI, 2023 apud CEBDS, 2023).

No Brasil, estima-se que mais de 50% das pastagens tropicais apresentem algum grau de degradação (EMBRAPA, 2023). Esse quadro implica perda de produtividade, redução da capacidade de suporte animal, emissão de GEE e menor estoque de carbono no solo. A degradação decorre de fatores como compactação por tráfego de máquinas e pisoteio animal, erosão hídrica em áreas descobertas, perda de matéria orgânica por preparo intensivo, acidez elevada e manejo inadequado da fertilidade.

A Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil estimou prejuízos de R\$ 8 bilhões por ano devido à erosão hídrica, considerando perda de nutrientes e reposição por fertilizantes (CNA, 2021). Esse valor não inclui custos indiretos, como assoreamento, contaminação de corpos d'água e perda de biodiversidade edáfica. A recuperação da qualidade do solo, portanto, possui dimensão agrônômica, ambiental e econômica.

Sistema de Plantio Direto

O Sistema de Plantio Direto (SPD) é uma das práticas de maior difusão no Brasil e integra a base técnica de muitos sistemas classificados como regenerativos. Introduzido no sul do país na década de 1970, o SPD ocupa cerca de 35 milhões de hectares, o que corresponde a aproximadamente 60% da área brasileira de grãos (CEBDS, 2023; EMBRAPA, 2023). Seus princípios incluem ausência de revolvimento do solo, exceto na linha de semeadura, manutenção de cobertura morta e rotação de culturas.

O SPD reduz a erosão hídrica em 80–90% em comparação ao preparo convencional, diminui perdas de água por evaporação, favorece infiltração e reduz escoamento superficial (EMBRAPA, 2023). Em solos do Cerrado, sistemas consolidados podem acumular entre 0,5 e 1,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ nas camadas superficiais, com variação conforme aporte de biomassa, textura do solo e composição das culturas de cobertura (CERRI et al., 2006 apud MANGABEIRA et al., 2025).

O potencial de sequestro de carbono pelo SPD, contudo, é limitado no tempo. Após 20 a 30 anos, o sistema tende a alcançar novo equilíbrio de matéria orgânica. Além disso, a eficiência depende da adoção conjunta dos componentes do sistema. O uso de semeadura direta sem rotação de culturas e sem cobertura adequada reduz parte dos benefícios agrônômicos e ambientais atribuídos ao SPD (SCHREEFEL et al., 2020; CEBDS, 2023).

Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

Os sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) combinam culturas agrícolas, pastagens e componentes arbóreos em arranjos espaciais ou temporais. No Brasil, a Embrapa coordena programas de pesquisa e difusão da tecnologia, com área estimada em 17 milhões de hectares e meta de expansão para 20 milhões de hectares até 2030 no Plano ABC+ (EMBRAPA, 2023; CROPLIFE, 2026).

A ILPF pode aumentar a eficiência de uso da terra, recuperar pastagens degradadas, diversificar renda e aumentar estoques de carbono em biomassa e solo. Em sistemas com componente florestal de eucalipto, estudos da Embrapa indicaram balanço líquido negativo de GEE quando o carbono removido pelas árvores supera as emissões da pecuária (EMBRAPA/CANAL RURAL, 2023). Em sistemas silvipastoris com 10% da área de pastagem convertida para componente arbóreo, a remoção adicional de $1,58 \text{ t CO}_2\text{eq ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ por biomassa e solo corresponde a 24% das emissões totais do sistema (COSTA JUNIOR et al., 2019 apud MANGABEIRA et al., 2025).

O componente florestal de eucalipto em ILPF apresenta sequestro médio entre 15 e 25 $\text{t CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ aos seis anos, com variação associada à espécie, ao espaçamento, ao regime de manejo e à produtividade local (EMBRAPA, 2016). Esses valores indicam potencial climático, mas não autorizam generalizações sem modelagem por condição de solo, clima e sistema produtivo. Para contratos de carbono, essa variabilidade exige mensuração, reporte e verificação consistentes.

Sistemas Agroflorestais

Sistemas Agroflorestais (SAFs) combinam espécies agrícolas, florestais e, em alguns casos, componentes pecuários. Em relação a monocultivos, apresentam maior complexidade estrutural e funcional, com potencial de aumentar biodiversidade, diversificar renda e estocar carbono em biomassa e solo. No Brasil, os SAFs assumem importância particular na Amazônia, Mata Atlântica e em áreas de transição, onde podem integrar produção agrícola e recomposição ambiental.

O estoque de carbono em SAFs varia conforme idade, composição, manejo e bioma. SAFs diversificados na Amazônia apresentaram 47,93 t CO₂ ha⁻¹ de biomassa aérea (BOLFE, 2010 apud MANGABEIRA et al., 2025). Em Tomé-Açú, no Pará, sistemas mais desenvolvidos apresentaram estoques entre 126 e 137 t CO₂ ha⁻¹ (TORRES et al., 2014 apud MANGABEIRA et al., 2025). Em sistemas agroflorestais com café na Amazônia Ocidental, foram registradas taxas médias de acumulação de 5,8 t CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹ e estoque médio de 46 t ha⁻¹ acima do solo (MARCOLAN; ESPIDULA, 2015 apud MANGABEIRA et al., 2025).

SAFs com cacau também apresentam potencial relevante. Zugaib et al. (2017) estimaram 115 t ha⁻¹ de biomassa em cacauzeiros, equivalentes a 57 t ha⁻¹ de carbono. Sistemas de cacau orgânico em SAFs podem sequestrar 16,3 t CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹, e cada hectare de cacau orgânico foi estimado como capaz de compensar emissões de cerca de 2,7 ha de pecuária extensiva em balanço neutro de GEE (apud MANGABEIRA et al., 2025). Em sistemas com erva-mate avaliados por 20 anos, o estoque de carbono na biomassa variou de 40 a 95 t CO₂ ha⁻¹, com remoção anual média entre 2 e 4,75 t CO₂ ha⁻¹ (RACHWAL et al., 2023 apud MANGABEIRA et al., 2025).

Tabela 1. Estoque ou sequestro de carbono em sistemas agrícolas associados à agricultura regenerativa no Brasil.

Sistema produtivo	Estoque ou sequestro de carbono	Bioma ou região	Referência
SAF diversificado, biomassa aérea	47,93 t CO ₂ ha ⁻¹	Amazônia	Bolfe (2010)
SAF Tomé-Açú, PA	126–137 t CO ₂ ha ⁻¹	Amazônia	Torres et al. (2014)
SAF com café, taxa de acumulação	5,8 t CO ₂ ha ⁻¹ ano ⁻¹	Amazônia Ocidental	Marcolan; Espidula (2015)
SAF com cacau, taxa de acumulação	11,9–16,3 t CO ₂ eq ha ⁻¹ ano ⁻¹	Amazônia	Costa Junior et al. (2019)
SAF com erva-mate, estoque em 20 anos	40–95 t CO ₂ ha ⁻¹	Sul do Brasil	Rachwal et al. (2023)
Reserva Legal, parte aérea	118 t CO ₂ ha ⁻¹	Amazônia	Mangabeira et al. (2020)
Reserva Legal, parte aérea e solo	80 t CO ₂ ha ⁻¹ + 52,9 t ha ⁻¹ no solo	Mata Atlântica	Mangabeira et al. (2020)

Reserva Legal, parte aérea e solo	55 t CO ₂ ha ⁻¹ + 41,5 t ha ⁻¹ no solo	Cerrado/Caatinga	Mangabeira et al. (2020)
ILPF com eucalipto	15–25 t CO ₂ ha ⁻¹ aos seis anos	Diversas regiões	Embrapa (2016)
Plantio direto consolidado	0,5–1,5 Mg C ha ⁻¹ ano ⁻¹	Cerrado	Cerri et al. (2006)

Fonte: Elaborada pelos autores com base em Mangabeira et al. (2025) e CEBDS (2023).

Cobertura do solo e plantas de cobertura

Plantas de cobertura constituem prática associada à proteção física e biológica do solo. A cobertura permanente reduz erosão hídrica e eólica, diminui variação térmica na superfície, protege agregados, aumenta atividade biológica e contribui para o estoque de carbono orgânico. Os mecanismos principais incluem maior aporte de biomassa, diversificação dos resíduos vegetais, fixação biológica de nitrogênio por leguminosas, agregação do solo e estabilização do carbono por interação com minerais argilosos (CERRI, 2023 apud CEBDS, 2023).

No Brasil, espécies como braquiárias (*Urochloa* spp.), crotalárias (*Crotalaria* spp.), milheto (*Pennisetum glaucum*) e consórcios de cobertura são utilizadas em rotação com grãos, sistemas integrados e áreas de renovação de pastagem. A eficiência depende da escolha da espécie, época de semeadura, produção de biomassa, relação C/N e adequação ao sistema produtivo.

OPORTUNIDADES PARA O BRASIL

Políticas públicas: Plano ABC+ e RenovAgro

O Plano ABC+ (2020–2030), continuidade do Plano ABC iniciado em 2010, é um dos principais instrumentos de política pública para práticas agropecuárias de baixa emissão de carbono. Suas metas incluem recuperação de 30 milhões de hectares de pastagens degradadas, expansão de 5 milhões de hectares de ILPF, implantação de 4 milhões de hectares de florestas plantadas, fixação biológica de nitrogênio em 55 milhões de hectares e ampliação do plantio direto na palha em 32 milhões de hectares (CROPLIFE, 2026; CEBDS, 2023).

A análise crítica do Plano ABC realizada por Lima et al. (2023) indicou que o cumprimento das metas do programa original ficou abaixo do esperado

em algumas modalidades, em especial na agricultura familiar e em regiões da Amazônia e do Nordeste. As principais restrições foram exigências burocráticas, acesso limitado ao crédito e baixa disponibilidade de assistência técnica (LIMA et al., 2023).

O RenovAgro, lançado no Plano Safra 2023/2024, passou a vincular linhas de crédito à comprovação de práticas de baixa emissão de carbono. O programa prevê R\$ 15 bilhões em crédito rural com condicionantes ambientais até 2025, mas o acesso de agricultores familiares e médios produtores ainda depende da simplificação de critérios, da assistência técnica e de mecanismos de comprovação menos onerosos (BNDES, 2023 apud CEBDS, 2023).

Mercado de carbono: oportunidade com restrições metodológicas

O mercado de carbono representa possibilidade de remuneração adicional para produtores que adotam práticas capazes de reduzir emissões ou remover carbono da atmosfera. Recuperação de pastagens degradadas, ILPF e SAFs podem gerar créditos negociáveis, desde que atendam a protocolos de mensuração, reporte e verificação. O crescimento do mercado voluntário no Brasil e a criação do mercado regulado de carbono, em 2024, ampliaram o interesse de produtores e empresas (FAEP, 2026; EFAGUNDES, 2026).

A participação de produtores rurais nesse mercado exige contratos claros, assistência técnica, monitoramento e verificadores credenciados. O Sistema FAEP alertou que o mercado de carbono atrai produtores, mas requer rigor técnico e jurídico (FAEP, 2026). A principal limitação está nos sistemas de mensuração, reporte e verificação (MRV), pois a quantificação de carbono em solos tropicais apresenta incerteza associada à profundidade amostrada, ao histórico de uso da área, à variabilidade climática e à permanência dos estoques (RATTIS; GARCIA, 2023 apud CEBDS, 2023).

Tabela 2. Oportunidades e instrumentos associados à transição para agricultura regenerativa no Brasil.

Dimensão	Oportunidade	Instrumento ou programa	Limitações
Política pública	Crédito rural com condicionantes ambientais	Plano ABC+, RenovAgro	Acesso restrito a pequenos produtores e burocracia
Mercado financeiro	Créditos de carbono e pagamento por serviços ambientais	MBRE, VCS, Gold Standard	Incerteza metodológica e custo de MRV
Cadeia de valor	Prêmio de preço por produção certificada	ProTerra, RTRS, SAN	Ausência de definição padronizada para “regenerativo”
Regulação internacional	Acesso a mercados com rastreabilidade	EUDR e legislação de carbono	Prazo curto de adaptação e custo de conformidade
Biodiversidade	Pagamento por serviços ecossistêmicos	PNPSA, Fundo Amazônia, PSA hídrico	Regulamentação incompleta
Pesquisa e inovação	Protocolos e indicadores de saúde do solo	PARS, Embrapa, Unicamp, ESALQ/USP	Custo de análise e necessidade de simplificação

Cadeias de valor globais

Empresas da cadeia agroalimentar ampliaram programas de agricultura regenerativa vinculados a metas de carbono, rastreabilidade e redução de risco socioambiental. Empresas associadas ao CEBDS, como Nestlé, Bayer, Yara, Carrefour e Danone, desenvolvem iniciativas com fornecedores por meio de assistência técnica, pagamento adicional e apoio à certificação (CEBDS, 2023). O WBCSD estabeleceu arquitetura de medição para agricultura regenerativa, usada como referência em programas corporativos de fornecimento sustentável (WBCSD, 2024 apud MANGABEIRA et al., 2025).

A soja brasileira certificada ProTerra apresenta pegada de carbono de 0,539 t CO₂eq t⁻¹, valor inferior ao de alternativas europeias analisadas por Mangabeira et al. (2025). Esse dado indica que sistemas produtivos brasileiros com rastreabilidade e práticas conservacionistas podem obter vantagem em mercados que exigem comprovação ambiental. Para ampliar esse ganho, os programas precisam associar redução de emissões, manutenção de produtividade, inclusão de produtores e transparência nos critérios de certificação.

DESAFIOS PARA A TRANSIÇÃO REGENERATIVA NO BRASIL

Fragmentação conceitual e risco de greenwashing

A fragmentação conceitual é o primeiro obstáculo para a agricultura regenerativa no Brasil. Definições baseadas apenas em práticas, em resultados ambientais ou em narrativas de mercado criam espaço para uso superficial do termo. Essa situação favorece greenwashing agrícola, isto é, alegações ambientais sem comprovação técnica suficiente.

O PARS explicita a necessidade de transparência nas alegações feitas por empresas e produtores, com objetivo de reduzir declarações sem base verificável (MANGABEIRA et al., 2025). Sem definição mínima, certificações, créditos de carbono e prêmios de preço associados à produção regenerativa ficam vulneráveis a interpretações divergentes. Newton et al. (2020) já haviam indicado que a variação conceitual dificulta a formulação de políticas públicas e a comparação entre estudos científicos. No Brasil, reportagem da Revista Cultivar sintetizou o problema ao afirmar que a agricultura regenerativa avança, mas ainda carece de mercado consolidado (CULTIVAR, 2026).

Barreiras técnicas e de conhecimento

A transição para sistemas regenerativos exige maior capacidade de manejo que sistemas convencionais baseados em pacotes de insumos padronizados. O produtor precisa selecionar espécies de cobertura, manejar consórcios e rotações, monitorar indicadores de solo, integrar pragas, doenças e fertilidade, além de interpretar riscos climáticos e econômicos. Esse conjunto de decisões requer assistência técnica contínua e qualificada (MANGABEIRA et al., 2025; CEBDS, 2023).

Saccol (2023), em estudo de caso em lavoura comercial de soja em Rosário do Sul, RS, identificou melhora em indicadores de solo e redução de insumos após dois anos de transição, mas também registrou incerteza do produtor em períodos de alta pressão de pragas e doenças. Esse resultado ilustra a curva de aprendizado associada à transição. A análise da Agro in Data/Insper (2025) também indica que iniciativas regenerativas no Brasil ainda se concentram em produtores inovadores e programas corporativos, sem escala nacional consolidada.

Viabilidade econômica e período de transição

A viabilidade econômica nos primeiros anos é um dos pontos mais sensíveis da transição regenerativa. A literatura aponta benefícios potenciais de longo prazo, como redução de insumos, maior estabilidade produtiva, receita por serviços ambientais e acesso a mercados diferenciados. O problema está no intervalo inicial, em que o produtor pode enfrentar custos de adaptação, necessidade de investimento, mudança no manejo e possível queda temporária de produtividade (CEBDS, 2023; NEWTON et al., 2020).

O CEBDS (2023) destacou que escala de produção, dificuldade de popularização e limitação dos mecanismos financeiros são barreiras reconhecidas pelo setor empresarial. A concentração fundiária amplia essa desigualdade: estabelecimentos com maior capital conseguem absorver riscos e investir em certificação, enquanto produtores de menor porte enfrentam maior restrição de crédito, assistência técnica e liquidez. Portanto, a expansão da agricultura regenerativa depende de políticas de transição que reduzam risco econômico para agricultores familiares e médios produtores.

Governança e coordenação institucional

A implementação de políticas para agricultura regenerativa depende de coordenação entre órgãos e programas. MAPA, MDA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, BNDES, governos estaduais e instituições de assistência técnica possuem atribuições relacionadas ao tema, mas operam com critérios, públicos e instrumentos distintos. Essa fragmentação pode gerar sobreposição de ações, lacunas regionais e dificuldade de monitoramento (MANGABEIRA et al., 2025; CEBDS, 2023).

O Cadastro Ambiental Rural (CAR) e os Programas de Regularização Ambiental (PRAs) são instrumentos relevantes para monitoramento territorial, pagamento por serviços ambientais e projetos de carbono. O PARS considera o CAR base potencial para aferição ambiental das Unidades de Produção Agrícola. Entretanto, a regularização ainda está incompleta em muitas propriedades, o que reduz sua utilidade imediata para políticas de certificação e remuneração por serviços ecossistêmicos (MANGABEIRA et al., 2025; VIEIRA, 2019 apud MANGABEIRA et al., 2025).

Tabela 3. Desafios da agricultura regenerativa no Brasil e estratégias citadas na literatura.

Categoria	Desafio	Dimensão	Estratégias indicadas
Conceitual	Ausência de definição unificada e verificável	Nacional e internacional	PARS; alinhamento com WBCSD; regulamentação
Técnico	Complexidade do manejo e curva de aprendizado	Propriedade rural	ATER qualificada; redes de produtores; extensão universitária
Econômico	Custo de transição, certificação e MRV	Propriedade e cadeia	Subsídios temporários; contratos de longo prazo
Social	Exclusão de pequenos produtores	Estrutural	PSA, assistência técnica gratuita e crédito diferenciado
Institucional	Fragmentação de políticas e fragilidade da ATER	Governamental	Coordenação interministerial; fortalecimento da assistência técnica
Mercado de carbono	Incerteza do MRV em solos tropicais	Científico e operacional	Protocolos por bioma; pesquisa em modelagem e amostragem
Comunicação	Uso indevido do termo regenerativo	Mercado	Certificação por terceiros, selos públicos e rastreabilidade digital

Agricultura regenerativa na Amazônia e no Cerrado

O debate sobre agricultura regenerativa no Brasil deve considerar as especificidades da Amazônia e do Cerrado. Esses biomas concentram parte expressiva da expansão agrícola, dos conflitos por uso da terra e das oportunidades de restauração produtiva.

Na Amazônia, SAFs, sistemas tradicionais indígenas e quilombolas e práticas agroextrativistas oferecem bases para modelos produtivos com maior diversidade de espécies e estoque de carbono. O IPAM desenvolve indicadores adaptados a pequenos produtores amazônicos, com uso de sensoriamento remoto para reduzir custos de monitoramento (RATTIS; GARCIA, 2023 apud CEBDS, 2023). A adaptação de métricas ao contexto amazônico é necessária porque sistemas agroflorestais e extrativistas não se ajustam a indicadores formulados apenas para grãos ou pecuária.

No Cerrado, a transição apresenta desafio distinto. O bioma concentra áreas agrícolas de alta produtividade, mas seus solos ácidos e pobres em nutrientes exigem correção química e fertilização para viabilizar a produção. Práticas

como fixação biológica de nitrogênio, plantas de cobertura, ILPF, uso eficiente de corretivos e integração com espécies adaptadas ao Cerrado podem reduzir dependência de insumos externos. No entanto, parte dessas práticas ainda precisa de validação econômica e operacional em escala comercial.

A segurança fundiária atravessa os dois biomas. Investimentos em sistemas agroflorestais, recuperação de pastagens e construção de qualidade do solo geram retorno em médio e longo prazo. Sem garantia de posse ou segurança contratual, produtores têm menor incentivo para práticas cujo retorno ocorre após vários anos (MANGABEIRA et al., 2025; CEBDS, 2023).

CONCLUSÕES

A agricultura regenerativa representa uma agenda de reorganização técnica e institucional dos sistemas agrícolas brasileiros. As práticas analisadas neste capítulo, como SPD, ILPF, SAFs, recuperação de pastagens e uso de plantas de cobertura, apresentam evidências de melhoria da qualidade do solo, aumento de estoques de carbono e redução de perdas ambientais. SAFs na Amazônia podem estocar entre 47 e 137 t CO₂ ha⁻¹, sistemas ILPF com componente florestal podem compensar parte das emissões da pecuária, e o plantio direto consolidado pode acumular até 1,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ em solos do Cerrado (MANGABEIRA et al., 2025; EMBRAPA, 2016; 2023).

A revisão também mostra que a transição regenerativa possui limites. A falta de definição operacional, o risco de greenwashing, o custo de certificação, a incerteza dos sistemas de MRV para solos tropicais, a fragilidade da assistência técnica e a desigualdade de acesso a crédito reduzem a velocidade de adoção. O período de transição pode gerar custos e riscos produtivos, em especial para agricultores familiares e médios produtores. Assim, a adoção em escala depende de instrumentos que reduzam risco econômico e ampliem suporte técnico.

A consolidação da agricultura regenerativa no Brasil requer três frentes complementares. A primeira é a definição de critérios verificáveis, como proposto pelo PARS, com métricas ambientais, produtivas, socioeconômicas e culturais adaptadas aos biomas brasileiros. A segunda é o fortalecimento de políticas públicas, como Plano ABC+, RenovAgro e pagamentos por serviços ambientais, com foco na inclusão de produtores com menor acesso a crédito e assistência técnica.

A terceira é o desenvolvimento de mercados de carbono e certificação com protocolos transparentes, custo acessível e monitoramento confiável. A articulação entre Embrapa, universidades, setor privado, organizações de produtores e poder público é necessária para transformar práticas regenerativas em estratégia viável de produção, conservação e competitividade agrícola.

REFERÊNCIAS

AGRO IN DATA – INSPER. Agricultura Regenerativa: o que há de novo? Insper Agro in Data, set. 2025.

BOLFE, E. L. Biomassa e estoque de carbono de agroflorestal em sistemas de produção diversificados na Amazônia. 2010. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2010.

CEBDS – CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Agricultura regenerativa no Brasil: desafios e oportunidades. Rio de Janeiro: CEBDS, 2023. 73 p.

CCARBON – CENTRO CARBONO USP. Agricultura Regenerativa: o caminho para uma produção sustentável. ccarbon.usp.br, jan. 2025.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83–99, 2007.

CNA – CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. Pesquisas quantificam prejuízos causados no solo pela erosão hídrica. CNA Brasil, out. 2021.

COSTA JUNIOR, C. et al. Carbono e balanço de emissões de GEE em sistemas silvipastoris. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Zootecnia*, 2019.

CROPLIFE BRASIL. Plano ABC+: metas e perspectivas. croplifebrasil.org, 2026.

CULTIVAR. Agricultura regenerativa avança no Brasil, mas carece de mercado. *Revista Cultivar*, abr. 2026.

EFAGUNDES. Créditos de Carbono no Brasil: Mecanismos, Mercado e Perspectivas. eflagundes.com, mar. 2026.

EMBRAPA. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): nota técnica. Embrapa, 2023.

EMBRAPA. Sequestro de CO₂ em árvores de eucalipto no sistema ILPF. Embrapa, 2016.

EMBRAPA. O potencial de sequestro de carbono em sistemas de produção integrados. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009.

FAEP – SISTEMA FAEP. Mercado de carbono atrai produtores, mas exige cautela. faep.pr.gov.br, fev. 2026.

LIMA, J. E. F. W. et al. Análise do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (ABC) no Brasil: resultados e perspectivas. Centro Agrícola, v. 50, n. 6, 2023.

MANGABEIRA, J. A. C. et al. Protocolo Padrão de Agricultura Regenerativa Sustentável no Brasil. Texto para Discussão. Unicamp. IE, Campinas, n. 483, jul. 2025. 64 p.

MARCOLAN, A. L.; ESPIDULA, M. C. (Eds.). Café na Amazônia. Brasília: Embrapa, 2015.

NEWTON, P. et al. What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, 2020.

RACHWAL, M. F. G. et al. Estoque de carbono na biomassa de erva-mate em sistemas agroflorestais. Embrapa Florestas, 2023.

RATTIS, L.; GARCIA, A. Métricas para agricultura regenerativa: indicadores ambientais e de biodiversidade. In: CEBDS, 2023.

RODALE, R. Our next frontier. *Organic Gardening*, v. 30, 1983.

SACCOL, M. S. Agricultura regenerativa: estudo de caso em lavoura comercial de soja no município de Rosário do Sul, RS. 2023. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – UFSM, Santa Maria, 2023.

SCHREEFEL, L. et al. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, v. 26, 2020.

TORRES, C. M. M. E. et al. Análise de crescimento e produção de biomassa de sistemas agroflorestais em Tomé-Açú, Pará. In: Embrapa Florestas, 2014.

VIEIRA, E. O. O Código Florestal Brasileiro: Reserva Legal e Área de Preservação Permanente. 2019. Texto técnico – UFAC, Rio Branco, 2019.

WBCSD – WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Resilience for the future: how Brazil can lead the regenerative landscapes revolution. Genebra: WBCSD, 2025.

ZUGAIB, A. C. C. et al. Estimativas de biomassa e estoque de carbono em caueiros de diferentes idades. *Agrotropica*, v. 29, n. 3, p. 185–194, 2017.

CAPÍTULO 3

TRICHODERMA SPP. E BACILLUS SPP. NA PROMOÇÃO DO CRESCIMENTO VEGETAL

Trichoderma spp. and Bacillus spp. in Plant Growth Promotion

Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Dioclea Almeida Seabra Silva
Alane Oliveira da Silva
Renata da Silva Arruda
Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Maria Luiza de Sateles Bueno
Harleson Sidney Almeida Monteiro
Sinara de Nazaré Santana Brito
Iracema Alves Manoel Degaspari
Jéssica Tomé da Silva
Raimundo Amaro Ribeiro Conde

Resumo: Fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias do gênero *Bacillus* estão entre os principais microrganismos empregados como bioinsumos para promoção do crescimento vegetal e controle biológico em sistemas agrícolas. Este capítulo revisa fundamentos biológicos, mecanismos de ação, resultados documentados em culturas brasileiras, interações entre agentes microbianos, limitações de uso e perspectivas para aplicação agrônômica. *Trichoderma* spp. atuam por colonização radicular, solubilização de fosfato, produção de compostos regulatórios, micoparasitismo, síntese de enzimas hidrolíticas e indução de resistência sistêmica. *Bacillus* spp. destacam-se pela formação de endósporos, produção de ácido indol-3-acético, giberelinas, citocininas, sideróforos, lipopeptídeos e compostos associados à solubilização de nutrientes e à defesa vegetal. Evidências em milho, soja, tomate, alface, feijão e arroz indicam respostas positivas em crescimento, biomassa, enraizamento e produtividade, embora a magnitude dos efeitos dependa da estirpe, formulação, dose, solo, cultura, ambiente e compatibilidade com defensivos químicos. Conclui-se que *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp. devem ser tratados como ferramentas complementares de manejo, dependentes de identidade molecular, garantia de viabilidade, validação por cultura e assistência técnica qualificada.

Palavras-chave: *Trichoderma*; *Bacillus*; promoção de crescimento; bioinsumos; rizosfera; controle biológico.

Abstract: Fungi of the genus *Trichoderma* and bacteria of the genus *Bacillus* are among the main microorganisms used as bioinputs for plant growth promotion and biological control in agricultural systems. This chapter reviews biological foundations, modes of action, documented results in Brazilian crops, interactions between microbial agents, limitations of use, and perspectives for agronomic application. *Trichoderma* spp. act through root colonization, phosphate solubilization, production of regulatory compounds, mycoparasitism, synthesis of hydrolytic enzymes, and induction of systemic resistance. *Bacillus* spp. are distinguished by endospore formation, production of indole-3-acetic acid, gibberellins, cytokinins, siderophores, lipopeptides, and compounds associated with nutrient solubilization and plant defense. Evidence in maize, soybean, tomato, lettuce, common bean, and rice indicates positive responses in growth, biomass, rooting, and yield, although the magnitude of the effects depends on strain, formulation, dose, soil, crop, environment, and compatibility with chemical pesticides. *Trichoderma* spp. and *Bacillus* spp. should therefore be treated as complementary management tools, dependent on molecular identity, viability assurance, crop-specific validation, and qualified technical assistance.

Keywords: *Trichoderma*; *Bacillus*; plant growth promotion; bioinputs; rhizosphere; biological control.

INTRODUÇÃO

A demanda por sistemas agrícolas com maior eficiência no uso de nutrientes, menor dependência de pesticidas sintéticos e melhor estabilidade produtiva ampliou o interesse por microrganismos capazes de atuar na rizosfera e modular processos fisiológicos das plantas. Entre esses agentes, fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias do gênero *Bacillus* ocupam posição central na pesquisa e no mercado de bioinsumos. Ambos colonizam o ambiente radicular e podem favorecer o crescimento vegetal, mas diferem quanto à biologia, à sobrevivência no solo, aos metabólitos produzidos e às exigências de formulação (HERMOSA et al., 2012; CALVO et al., 2014).

O gênero *Trichoderma*, pertencente ao filo Ascomycota e à família Hypocreaceae, reúne mais de 300 espécies descritas. Entre elas, *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. atroviride*, *T. virens*, *T. koningiopsis*, *T. asperelloides* e *T. lentiforme*

concentram parte substancial das pesquisas agronômicas e dos registros comerciais (DRUZHININA et al., 2011). Inicialmente estudado como agente de controle de fitopatógenos, *Trichoderma* passou a ser reconhecido como promotor de crescimento vegetal após a demonstração de efeitos sobre solubilização de nutrientes, modulação hormonal, colonização radicular e indução de resistência sistêmica (LORITO et al., 2010; MONTE et al., 2019).

O gênero *Bacillus*, pertencente ao filo Firmicutes e à família Bacillaceae, inclui bactérias Gram-positivas, aeróbias ou anaeróbias facultativas, com capacidade de formar endósporos resistentes. Essa característica favorece formulação, armazenamento, transporte e sobrevivência sob condições agrícolas adversas (COMPANT et al., 2005). As espécies *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis* e *B. pumilus* aparecem com maior frequência em estudos brasileiros de promoção de crescimento, com mecanismos associados à produção de ácido indol-3-acético (AIA), giberelinas, citocininas, sideróforos, solubilização de fosfatos e síntese de lipopeptídeos antimicrobianos (BETTIOL et al., 2020; DIVERSITAS JOURNAL, 2021).

O tema tem interesse direto para a agricultura brasileira. O Brasil possui mercado expressivo de produtos à base de *Trichoderma*, com registros no Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) para espécies e estirpes voltadas ao controle biológico e à promoção de crescimento (REIS; BRESOLIN, 2019 apud REVISTAS RCAAP, 2020). O segmento de biofungicidas, no qual *Trichoderma* e *Bacillus* aparecem entre os principais ingredientes ativos, cresceu 41% em valor de mercado no Brasil em 2025 e alcançou R\$ 1,4 bilhão (CROPLIFE BRASIL, 2026). Apesar da expansão comercial, a resposta em campo permanece variável, pois depende de estirpe, solo, clima, manejo, formulação, dose, cultura e compatibilidade com defensivos químicos (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

Este capítulo sistematiza mecanismos de ação de *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp. na promoção do crescimento vegetal, reúne resultados documentados em culturas de interesse agrônomico no Brasil, discute limitações relatadas na literatura e apresenta perspectivas para pesquisa, formulação e uso desses agentes em sistemas produtivos nacionais.

METODOLOGIA

O capítulo foi elaborado por revisão bibliográfica sistematizada, de caráter narrativo, conduzida entre março e maio de 2026. A revisão incluiu publicações de 1986 a 2026, com ênfase em mecanismos fisiológicos, resultados agrônômicos, formulação, compatibilidade biológica e aplicação em culturas brasileiras.

Bases de dados e fontes consultadas

As buscas foram realizadas nas seguintes bases e repositórios:

- **Periódicos científicos indexados:** SciELO Brasil, SciELO Portugal, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Periódicos CAPES, Brazilian Journal of Development, Diversitas Journal e Diversas Contribuciones a las Ciencias Sociales.
- **Repositórios institucionais:** UNESP (Botucatu e Ilha Solteira), UFRGS, UFC, UFMS, UFPR, UNIOESTE, Embrapa (Ainfo, Infoteca-e, Alice), CBCS/Eventos Solos e UEPG.
- **Publicações técnicas institucionais:** Embrapa Meio Ambiente, Embrapa Soja, Embrapa Arroz e Feijão, Embrapa Florestas, Instituto Biológico (SP), Seapdr/RS, Revista Cultivar e RCAAP.
- **Dados de mercado:** CropLife Brasil (2026) e IMARC Group (2025).

Descritores usados

Foram usados descritores em português e inglês: *Trichoderma*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus velezensis*, *Bacillus licheniformis*, promoção de crescimento vegetal, *plant growth promotion*, PGPR, PGPF, rizosfera, solubilização de fosfato, ácido indol-3-acético, giberelina, sideróforo, indução de resistência sistêmica, ISR, ISS, micoparasitismo, antibiose, bioinsumo, bioestimulante e biocontrole. As combinações empregaram operadores booleanos AND e OR. A triagem foi estratificada por gênero microbiano, mecanismo de ação, cultura agrícola e condição experimental: *in vitro*, casa de vegetação ou campo.

Crítérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos em periódicos com avaliação por pares, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso em ciências agrárias, documentos técnicos de instituições de pesquisa e dados de mercado com fonte identificada. Foram excluídos materiais comerciais sem base científica, estudos sem controle explícito e publicações sem autoria identificável. Estudos em condições brasileiras e culturas de interesse nacional receberam prioridade. Ao final da triagem, 52 referências foram selecionadas; 41 foram incorporadas ao texto.

DESENVOLVIMENTO

***Trichoderma spp.*: biologia e ecologia**

Trichoderma é um fungo filamentososo de ocorrência em solos, resíduos vegetais, rizosfera e substratos orgânicos. Em solos tropicais, sua presença tende a ser favorecida por cobertura vegetal, aporte de matéria orgânica, boa aeração e atividade microbiana. Em solos compactados, degradados ou submetidos a uso intensivo de fungicidas sistêmicos, a população nativa pode diminuir (SEAPI-RS, 2018; EMBRAPA, 2025).

O fungo apresenta crescimento rápido, colonização eficiente de substratos orgânicos e produção abundante de conídios. Esses esporos assexuais constituem a principal unidade infectiva usada em produtos comerciais. A viabilidade econômica da produção em escala depende dessa capacidade de esporulação. No Brasil, a fermentação sólida ainda predomina pela estabilidade dos conídios produzidos, embora processos de fermentação submersa tenham avançado por reduzir tempo de produção e variabilidade entre lotes (SEAPI-RS, 2018; EMBRAPA, 2025).

A taxonomia de *Trichoderma* passou por revisão intensa com o uso de marcadores moleculares. Parte dos isolados antes designados como *T. harzianum* compõe, na verdade, um complexo de espécies morfológicamente próximas e geneticamente distintas. Essa heterogeneidade afeta produção enzimática, colonização radicular, antagonismo a patógenos e promoção de crescimento. Por isso, a identificação molecular do isolado deve acompanhar ensaios agrônômicos e registros comerciais (DRUZHININA et al., 2011; UNESP, 2024).

Mecanismos de promoção de crescimento por *Trichoderma* spp.

Os efeitos de *Trichoderma* spp. sobre plantas resultam de mecanismos diretos e indiretos. Os mecanismos diretos ocorrem sem presença obrigatória de patógenos e envolvem solubilização de nutrientes, produção de compostos regulatórios e modulação da arquitetura radicular. Os mecanismos indiretos decorrem da supressão de fitopatógenos, com redução de perdas de crescimento por doenças de solo (LORITO et al., 2010; MONTE et al., 2019).

Solubilização de fosfato e outros nutrientes

A solubilização de fosfato é um dos mecanismos mais documentados em *Trichoderma*. O fungo produz ácidos orgânicos, como ácido glucônico, ácido cítrico e ácido oxálico, que acidificam a rizosfera e favorecem a dissociação de fosfato ligado a Fe^{3+} , Al^{3+} e Ca^{2+} . Esse processo aumenta a disponibilidade de fósforo para absorção radicular (CBCS, 2013; EMBRAPA FLORESTAS, 2016). O mecanismo assume maior valor agrônômico em Latossolos e Argissolos tropicais, nos quais a fixação de fósforo limita a eficiência da adubação fosfatada.

Além do fósforo, isolados de *Trichoderma* podem mobilizar zinco em formas insolúveis, como ZnO e ZnS, e ferro por compostos com afinidade por Fe^{3+} . Em algodoeiro, *T. lentiforme* CMAA 1585 apresentou solubilização de fosfato associada à promoção de crescimento, motivo pelo qual foi indicado como candidato a bioestimulante para essa finalidade (UNESP, 2024).

Produção de fitormônios e compostos regulatórios

Trichoderma spp. produzem compostos com efeito hormonal e também modulam a síntese hormonal das plantas. A produção de auxinas, sobretudo AIA por rota dependente de triptofano, foi relatada em *T. harzianum*, *T. asperellum* e *T. atroviride* (CBCS, 2013). O AIA liberado na rizosfera pode estimular alongamento celular, emissão de raízes laterais, expansão da superfície radicular e absorção de água e nutrientes.

Outro mecanismo é a modulação do etileno. Alguns isolados reduzem a disponibilidade do precursor 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) na rizosfera, o que pode atenuar a inibição do crescimento radicular sob estresse por

seca, salinidade ou compactação. Esse efeito ajuda a explicar maior tolerância a estresses abióticos em plantas colonizadas por *Trichoderma* (SEAPI-RS, 2018; EMBRAPA, 2016).

Colonização radicular e indução de resistência sistêmica

A colonização radicular por *Trichoderma* ocorre, em geral, nas camadas epidérmicas e corticais externas. Essa colonização não causa doença e pode assumir caráter de endofitismo facultativo ou biotrofismo moderado temporário (HERMOSA et al., 2012). A interação ativa vias de sinalização relacionadas ao ácido jasmônico e ao etileno, associadas à resistência sistêmica induzida (ISR, *Induced Systemic Resistance*). Como consequência, a planta pode responder com maior rapidez a patógenos e pragas após a colonização inicial (MANTOVANI, 2024).

O aumento do sistema radicular também afeta a parte aérea. Raízes mais extensas absorvem mais água e nutrientes, o que favorece área foliar, fotossíntese e acúmulo de biomassa. Em arroz, isolados de *Trichoderma* sp. aplicados no tratamento de sementes aumentaram estande de plantas e rendimento de grãos. A UFRGS atribuiu esses efeitos à maior absorção de nutrientes mediada pela colonização radicular (UFRGS, 2024).

***Bacillus* spp.: biologia e vantagens práticas**

O gênero *Bacillus* apresenta vantagem prática em relação a microrganismos menos resistentes: a formação de endósporos. Essas estruturas suportam dessecação, radiação ultravioleta, variações extremas de pH e temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme espécie e condição experimental (COMPANT et al., 2005). A resistência dos endósporos favorece a produção de formulações em pó, líquidos concentrados e grânulos, com menor dependência de cadeia de frio e validade de 12 a 24 meses em condições ambientes. Esse atributo tem valor logístico para regiões agrícolas tropicais e áreas distantes dos centros industriais (BETTIOL et al., 2020).

As espécies com maior presença em estudos e aplicações agronômicas são:

- *Bacillus subtilis*: espécie mais estudada do gênero, com produção de iturina, surfactina e fengicina, compostos associados a atividade antifúngica e promoção de crescimento.
- *Bacillus amyloliquefaciens*: bactéria competitiva na rizosfera, produtora de substâncias bioativas com ação promotora de crescimento e antimicrobiana.
- *Bacillus velezensis*: espécie antes classificada em parte como *B. amyloliquefaciens* subsp. *plantarum*; aparece na literatura como bactéria com alto potencial em culturas de grãos.
- *Bacillus licheniformis*: espécie com registros de promoção de crescimento em tomateiro e supressão de murcha causada por *Fusarium* (BETTIOL et al., 2020).
- *Bacillus pumilus*: espécie citada em hortaliças, com capacidade de induzir resistência sistêmica.

Mecanismos de promoção de crescimento por *Bacillus* spp.

Produção de ácido indol-3-acético e outras auxinas

A síntese de AIA é um dos mecanismos mais relatados em *Bacillus* spp. O triptofano presente em exsudatos radiculares serve como precursor da síntese bacteriana de AIA por rotas como indol-3-piruvato (IPA), indol-3-acetamida (IAM) e indol-3-acetaldoxima (IAOx) (REVISTACULTIVAR, 2025). O AIA bacteriano difunde-se para tecidos radiculares e estimula alongamento celular, formação de raízes laterais e emissão de raízes adventícias. Com isso, a planta aumenta a exploração do solo e a absorção de água e nutrientes.

No estudo citado pelo Diversitas Journal (2021), os sete isolados de *B. subtilis* avaliados em soja produziram AIA *in vitro*. A quantidade produzida variou entre isolados e se relacionou aos efeitos observados sobre biomassa radicular e parte aérea em casa de vegetação. Esse resultado reforça a necessidade de avaliar estirpes, e não apenas espécies.

Solubilização de fosfato

A solubilização de fosfatos inorgânicos e orgânicos por *Bacillus* resulta da produção de fosfatases ácidas e alcalinas, que mineralizam fósforo orgânico, e da excreção de ácidos orgânicos, como glucônico, cítrico e 2-cetoglucônico, capazes de acidificar a rizosfera e liberar fosfato ligado a alumínio, ferro e cálcio (DIVERSITAS JOURNAL, 2021; COGNITIONIS, 2022).

A eficiência desse mecanismo varia entre isolados. Em avaliação com sete isolados de *B. subtilis*, todos solubilizaram fosfato, mas os índices variaram de 1,2 a 3,8 (DIVERSITAS JOURNAL, 2021). Essa amplitude tem consequência agrônômica, pois isolados com baixa solubilização *in vitro* podem apresentar menor efeito em solos com alta fixação de fósforo.

Produção de giberelinas, citocininas e óxido nítrico

Além das auxinas, *Bacillus* spp. podem sintetizar giberelinas, como GA3 e GA4, associadas ao alongamento de entrenós, ao crescimento inicial e, em algumas culturas, à antecipação de florescimento (COGNITIONIS, 2022). A produção de citocininas favorece divisão celular e retardo da senescência foliar. O óxido nítrico (NO) atua como sinalizador em vias de crescimento e defesa. A integração desses sinais pode explicar maior área foliar, taxa fotossintética e manutenção de tecidos verdes em plantas tratadas com *B. subtilis* (REVISTA-CULTIVAR, 2025; UNESP, 2022).

Produção de sideróforos

Sideróforos são compostos de baixo peso molecular com alta afinidade por Fe^{3+} . Em *Bacillus*, eles podem exercer dupla função: aumentar a disponibilidade de ferro para as plantas e reduzir o acesso de patógenos ao ferro livre do solo. *B. subtilis* e *B. amyloliquefaciens* produzem sideróforos do tipo bacillibactina, com efeitos relatados em tomate, alface e soja (BETTIOL et al., 2020; COGNITIONIS, 2022).

Síntese de lipopeptídeos e indução de resistência sistêmica

A produção de lipopeptídeos é um dos mecanismos centrais do gênero *Bacillus*. Esses compostos anfipáticos, formados por anel peptídico ligado a cadeia lipídica, atuam contra patógenos e podem sinalizar respostas de defesa nas plantas. As principais classes produzidas por *B. subtilis* e espécies correlatas são:

- **Iturinas:** iturinas A, B e C, micosubtilina e bacilomicina; apresentam atividade antifúngica por inserção em membranas e formação de poros.
- **Surfactinas:** surfactantes biológicos com atividade antimicrobiana e capacidade de ativar ISR pela via do ácido jasmônico.
- **Fengicinas:** também denominadas plipastatinas; apresentam atividade contra fungos fitopatogênicos.

Esses compostos podem suprimir patógenos no solo e na parte aérea. Também podem atuar como sinais moleculares que preparam o sistema imune vegetal contra ataques posteriores, sem os custos metabólicos típicos da resistência sistêmica adquirida (SAR) induzida por patógenos (BETTIOL et al., 2020; SCIELO PORTUGAL, 2021).

Resultados documentados em culturas brasileiras

Milho

O milho (*Zea mays* L.) apresenta resultados expressivos para *Trichoderma harzianum* no Brasil. Em campo experimental em São Borja (RS), a inoculação de sementes com *T. harzianum* resultou em produtividade de 16.232 kg ha⁻¹, equivalente a 270,56 sc ha⁻¹, contra 13.800 kg ha⁻¹, ou 230 sc ha⁻¹, no controle sem inoculação. O incremento foi de 2.432 kg ha⁻¹, ou 17,6% (SEAPDR/RS, 2020). Os efeitos foram atribuídos ao aumento no número e diâmetro de raízes e ao maior diâmetro de colmo, características associadas à absorção e à translocação de nutrientes.

Resultado próximo foi relatado no Brazilian Journal of Development. A inoculação com *T. harzianum* elevou a produtividade em 40,56 sc ha⁻¹ em comparação ao controle, com efeitos sobre comprimento e diâmetro da espiga, número de grãos por linha e massa de grãos por espiga (BJD, 2021).

Para *Bacillus* spp. em gramíneas, os resultados são menos uniformes. Em arroz, cultura usada como referência para mecanismos em gramíneas, a co-inoculação de *B. amyloliquefaciens* via foliar com *B. subtilis* via sementes não aumentou características agrônômicas nem rendimento de grãos. Esse resultado contraria a expectativa de resposta positiva e reforça a necessidade de estudos por cultura, estirpe, dose e método de aplicação (UNESP, 2022).

Soja

Na soja (*Glycine max* L. Merrill), os estudos com *Trichoderma* indicam potencial de promoção de crescimento, mas com resposta dependente de cultivar, ambiente e forma de aplicação. No oeste do Paraná, *T. endophyticum* e *T. koningiopsis* foram avaliados em doses e estratégias de aplicação. *T. endophyticum* a 100 g ha⁻¹ e *T. koningiopsis* a 150 g ha⁻¹, aplicados no tratamento de sementes e em pulverizações foliares nos estádios V6 e R1, aumentaram a produtividade em relação à testemunha absoluta (DIVERSAS CONTRIBUCIONES, 2024).

A Recima21 (2025) avaliou *B. amyloliquefaciens* estirpe FZB45, *B. velezensis* estirpe FZB42 e *T. asperellum* cepa KD, isolados e combinados, no tratamento de sementes de soja. A combinação dos agentes gerou os melhores resultados para estande, massa radicular, biomassa aérea e produtividade, o que sugere sinergismo entre bactéria e fungo sob as condições avaliadas (RECIMA21, 2025).

Em soja, o estudo do Diversitas Journal (2021) mostrou resposta variável entre isolados de *B. subtilis*. A estirpe Bs10 resultou em maior biomassa radicular e parte aérea que as demais e que o controle. As estirpes Bs01, Bs02 e Bs03 não diferiram do controle aos 30 dias. Esse contraste demonstra que a identificação da espécie não basta para prever desempenho agrônômico (DIVERSITAS JOURNAL, 2021).

Tomate e hortaliças

Em tomate (*Solanum lycopersicum* L.), a Embrapa Meio Ambiente documentou efeitos de *B. subtilis* e *B. licheniformis* sobre crescimento e controle da murcha de *Fusarium*. A aplicação dos isolados favoreceu crescimento, com maior resposta nas raízes, e reduziu sintomas da doença quando os isolados foram aplicados separadamente. Os microrganismos foram detectados na rizos-

fera e na seiva das plantas, o que confirma capacidade de colonização e sustenta a hipótese de ativação de ISR (BETTIOL et al., 2020).

Em alface (*Lactuca sativa* L.), pesquisa da UNESP (2021) avaliou *B. subtilis* e *T. harzianum*. Ambos os agentes favoreceram o crescimento, e a associação entre eles indicou potencial para reduzir a dependência de fertilizantes químicos em sistemas olerícolas com ciclos curtos e alta frequência de cultivo (UNESP, 2021).

Tabela 1. Resultados selecionados de estudos com *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp. na promoção de crescimento de plantas no Brasil.

Agente biológico	Espécie / estirpe	Cultura	Parâmetro principal	Resultado	Referência
<i>Trichoderma</i>	<i>T. harzianum</i>	Milho	Produtividade	+2.432 kg ha ⁻¹ (+17,6%)	Seapdr/RS (2020)
<i>Trichoderma</i>	<i>T. harzianum</i>	Milho	Produtividade	+40,56 sc ha ⁻¹ (+17%)	BJD (2021)
<i>Trichoderma</i>	<i>T. asperellum</i> UFT 201	Plântulas	Crescimento inicial	Aumento em relação ao controle	UEMS (2024)
<i>Trichoderma</i>	<i>T. lentiforme</i> CMAA 1585	Algodão	Crescimento e solubilização de P	Melhor promotor de crescimento	UNESP (2024)
<i>Trichoderma</i>	<i>T. endophyticum</i> (100 g ha ⁻¹)	Soja	Produtividade	Aumento em relação à testemunha	Diversas Contrib. (2024)
<i>Bacillus subtilis</i>	Bs10	Soja	Biomassa radicular e parte aérea	Superior às demais estirpes e ao controle	Diversitas Journal (2021)
<i>Bacillus subtilis</i>	Mistura de isolados	Tomate	Crescimento radicular e murcha	Promoção de crescimento e redução de doença	Bettiol et al. (2020)
<i>B. amyloliquefaciens</i> + <i>B. velezensis</i> + <i>T. asperellum</i>	FZB45 + FZB42 + KD	Soja	Estande, biomassa e produtividade	Melhor resposta na combinação	Recima21 (2025)
<i>Bacillus</i> + <i>Trichoderma</i>	<i>B. subtilis</i> + <i>T. harzianum</i>	Alface	Crescimento geral	Menor dependência de fertilizantes	UNESP (2021)

Interação *Trichoderma* * *Bacillus*: sinergismos e antagonismos

A combinação de *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp. no mesmo produto ou protocolo de aplicação tem recebido atenção por reunir mecanismos de ação complementares. *Trichoderma* atua com maior ênfase na colonização fúngica da rizosfera, micoparasitismo, produção enzimática e estímulo radicular. *Bacillus* apresenta vantagem na estabilidade de formulação, produção de endósporos, lipopeptídeos, sideróforos e fitormônios. Essa complementaridade pode ampliar o efeito sobre crescimento e sanidade vegetal.

A hipótese de sinergismo foi corroborada no estudo da Recima21 (2025). A associação de *B. amyloliquefaciens* FZB45, *B. velezensis* FZB42 e *T. asperellum* KD resultou em desempenho agrônômico superior ao de agentes isolados em soja, sobretudo para biomassa aérea e produtividade (RECIMA21, 2025).

A literatura, entretanto, também registra antagonismo *in vitro* entre *Bacillus* e *Trichoderma*. A UEPG (2025) demonstrou que, sob cultivo *in vitro*, *T. harzianum* inibiu o crescimento de *Bacillus* spp. em meio de cultura, possivelmente por metabólitos com ação antibacteriana. Esse resultado contrasta com respostas positivas em campo. A divergência pode decorrer da separação espacial dos nichos no solo: *Trichoderma* coloniza substratos orgânicos e raízes, enquanto *Bacillus* pode ocupar microambientes radiculares e superfícies com exsudatos recentes (UEPG, 2025; RVBMA, 2024).

Essa diferença entre ensaios *in vitro* e campo tem implicação tecnológica. Formulações combinadas podem ser eficazes quando reduzem o contato direto entre os agentes antes da aplicação. Microencapsulação, compartimentos separados e compatibilização de veículos podem preservar a viabilidade de ambos até a chegada ao solo (BORTOLOTTI; SAMPAIO, 2024).

CONCLUSÕES

Trichoderma spp. e *Bacillus* spp. são agentes biológicos com base científica consolidada para promoção do crescimento vegetal. Seus mecanismos incluem solubilização de fósforo, mobilização de ferro, produção de AIA, giberelinas e citocininas, modulação de etileno, colonização radicular, síntese de lipopeptídeos,

micoparasitismo e indução de resistência sistêmica. Essa diversidade mecanística explica incrementos de produtividade relatados em culturas como milho, soja, tomate, alface, feijão e arroz, mas também explica a dificuldade de prever respostas sob campo sem caracterização precisa de estirpe, solo, dose e manejo (SEAPDR/RS, 2020; BETTIOL et al., 2020; BJD, 2021).

A análise da literatura permite três conclusões para a prática agrônômica. Primeiro, a seleção de isolado deve anteceder a escolha por espécie; produtos com a mesma espécie declarada podem apresentar desempenho distinto. Segundo, o contexto edafoclimático e o sistema de manejo modulam a eficácia; esses microrganismos não substituem adubação, controle fitossanitário e manejo do solo, mas podem aumentar a eficiência do sistema quando usados em protocolos compatíveis. Terceiro, formulações combinadas de *Trichoderma* e *Bacillus* podem produzir sinergismo em campo, mas exigem tecnologia de formulação para evitar antagonismo antes da aplicação.

O crescimento de 41% em valor e 37% em área tratada do segmento de biofungicidas no Brasil em 2025 indica aceitação comercial desses agentes (CROPLIFE BRASIL, 2026). A consolidação técnica, porém, depende de produtos com identidade molecular definida, garantia de viabilidade, testes de eficácia por cultura, protocolos de compatibilidade com defensivos e assistência técnica capaz de converter conhecimento microbiológico em recomendação agrônômica. Sem esses requisitos, o crescimento do mercado pode superar a capacidade de validação científica e aumentar a variabilidade de respostas em campo.

REFERÊNCIAS

BETTIOL, W. et al. *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis* na promoção de crescimento e no controle da murcha de *Fusarium* no tomateiro. **Embrapa Meio Ambiente**, Jaguariúna, 2020. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

BJD — BRAZILIAN JOURNAL OF DEVELOPMENT. Incremento da produtividade de milho pela inoculação de *Trichoderma harzianum*. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, 2021.

BORTOLOTTI, G.; SAMPAIO, R. M. Desafios e estratégias no desenvolvimento dos bioinsumos para controle biológico no Brasil. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, UTFPR, v. 20, 2024.

CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1-2, p. 3–41, 2014.

CBCS — CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Solubilização de fosfato e produção de AIA por *Trichoderma*. **Anais do CBCS**, 2013.

COGNITIONIS. A espécie *Bacillus subtilis* e suas aplicações na agricultura. **Agriculturae**, v. 4, n. 1, 2022.

COMPANT, S. et al. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 71, n. 9, p. 4951–4959, 2005.

CROPLIFE BRASIL. Mercado de bioinsumos atinge R\$ 6,2 bilhões em vendas e área tratada cresce 28% em 2025. **CropLife Brasil**, abr. 2026.

DIVERSAS CONTRIBUCIONES. *Trichoderma* na promoção de crescimento da cultura da soja na região oeste do Paraná. **Diversas Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 1, jan. 2024.

DIVERSITAS JOURNAL. *Bacillus subtilis* como inoculante promotor de crescimento vegetal em soja. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 4, dez. 2021.

DRUZHININA, I. S. et al. *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success. **Nature Reviews Microbiology**, v. 9, p. 749–759, 2011.

EMBRAPA — EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Bioprospecção de *Trichoderma* spp. osmotolerantes para promoção de crescimento de plantas. **Embrapa**, dez. 2016.

EMBRAPA. Pesquisadores avançam no uso de *Trichoderma* para controle biológico. **Embrapa Meio Ambiente**, nov. 2025.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. Uso de *Trichoderma* na cultura do feijão-comum. In: **CNPAF Cap. 17**, 2020.

HERMOSA, R. et al. Plant-beneficial effects of *Trichoderma* and of its genes. **Microbiology**, v. 158, p. 17–25, 2012.

JRG — JOURNAL OF RESEARCH AND GRADUATE STUDIES. Avaliação do potencial antagônico de *Bacillus* sp. e *Trichoderma harzianum* no biocontrole de *Colletotrichum gloeosporioides*. **JRG**, v. 7, n. 14, dez. 2024.

LORITO, M. et al. *Trichoderma*–plant–pathogen interactions. **Annual Review of Phytopathology**, v. 48, p. 395–417, 2010.

MANTOVANI, F. V. Interação entre *Trichoderma* spp. e plantas: mecanismos de colonização e indução de resistência. **UFPR/PGLSF**, Curitiba, 2024.

MONTE, E. et al. *Trichoderma* as a biological control agent and its plant growth promotion. In: **Biocontrol Agents and Secondary Metabolites**, 2019.

RECIMA21. Tratamento biológico com *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 + *Bacillus velezensis* FZB42 e *Trichoderma asperellum* KD no manejo da soja. **Recima21**, v. 6, n. 9, set. 2025.

REVISTACULTIVAR. *Bacillus velezensis*: modo de ação e aplicações na agricultura. **Revista Cultivar**, jul. 2025.

RVBMA — REVISTA BRASILEIRA DE MEIO AMBIENTE. Ação de *Bacillus* spp. e *Trichoderma harzianum* na inibição de *Sclerotinia sclerotiorum*. **RVBMA**, v. 12, 2024.

SCIELO PORTUGAL. *Bacillus* sp. como promotor de crescimento em soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, n. 2, ago. 2021.

SEAPDR/RS — SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO RURAL DO RIO GRANDE DO SUL. Fungo aumenta produtividade de milho em 2,4 mil quilos por hectare. **Portal Seapdr**, jul. 2020.

SEAPI-RS. *Trichoderma*: controle de fitonematoides e aumento de produtividade. **Secretaria da Agricultura, Pecuária e Irrigação do RS**, Porto Alegre, 2018.

UEPG — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA. Interação entre *Trichoderma* spp. e *Bacillus* spp. in vitro utilizados no controle biológico de doenças. **EAIC 2025**, Ponta Grossa, 2025.

UFRGS — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Ação de bioformulados à base de *Trichoderma* sp. sobre *Rhizoctonia solani* e crescimento de plantas de arroz. **LUME/UFRGS**, Porto Alegre, 2024.

UNESP — UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Seleção de isolados de *Trichoderma* spp. promotores de crescimento em algodoeiro. **Repositório UNESP**, Botucatu, 2024.

UNESP. Promoção de crescimento por *Bacillus subtilis* e *Trichoderma harzianum* em alface. **Repositório UNESP**, Botucatu, 2021.

UNESP. Inoculação de *Bacillus amyloliquefaciens* via foliar e *Bacillus subtilis* via sementes em arroz. **Repositório UNESP**, Botucatu, 2022.

CAPÍTULO 4

BIOFUNGICIDAS NO BRASIL: USO E APLICAÇÃO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

Biofungicides in Brazil: Use and Application in Agricultural Systems

Leonardo De Cillo Duarte Novaes
Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Maila Pereira de Almeida
Natanael Lucena Ferreira
Mário Jorge Amoras Alves Filho
Lorrany Silva Moraes Amoras
Daniele Soares Barroso
Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Dioclea Almeida Seabra Silva
Alane Oliveira da Silva

Resumo: Biofungicidas são bioinsumos utilizados no manejo de doenças fúngicas em sistemas agrícolas. No Brasil, seu uso cresce em resposta à pressão fitossanitária, à resistência de patógenos a fungicidas sintéticos e às restrições regulatórias sobre moléculas químicas. Este capítulo revisa agentes biológicos, mecanismos de ação, formulações, regulação e integração ao Manejo Integrado de Doenças. *Trichoderma*, *Bacillus* e *Coniothyrium minitans* atuam por micoparasitismo, antibiose, competição, indução de resistência e supressão de estruturas de sobrevivência. A eficácia depende da cepa, formulação, patógeno, ambiente e estratégia de aplicação. Os biofungicidas devem ser usados como ferramentas complementares no manejo fitossanitário.

Palavras-chave: biofungicidas; controle biológico; *Trichoderma*; *Bacillus*; manejo integrado de doenças.

Abstract: Biofungicides are bioinputs used to manage fungal diseases in agricultural systems. In Brazil, their use has increased due to disease pressure, pathogen resistance to synthetic fungicides, and regulatory restrictions on chemical molecules. This chapter reviews biological agents, modes of action, formulations, regulation, and integration into Integrated Disease Management. *Trichoderma*, *Bacillus*, and *Coniothyrium minitans* act through mycoparasitism, antibiosis, competition, induced resistance, and suppression of pathogen survival structures. Efficacy depends on strain,

formulation, pathogen, environment, and application strategy. Biofungicidas should be used as complementary tools in plant disease management.

Keywords: biofungicidas; biological control; *Trichoderma*; *Bacillus*; integrated disease management.

INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira ocupa posição de destaque na produção mundial de soja, milho, café, cana-de-açúcar e algodão. Esse cenário amplia a exposição dos sistemas produtivos a doenças fúngicas, que estão entre os fatores bióticos associados à redução de produtividade em culturas de alto valor econômico. Em soja e milho, as perdas podem superar 30% do potencial produtivo quando há condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento dos patógenos (EMBRAPA, 2023). A ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*), o mofo-branco (*Sclerotinia sclerotiorum*), a mancha-alvo (*Corynespora cassicola*) e as podridões causadas por *Fusarium* spp. e *Rhizoctonia solani* estão entre as doenças de maior impacto agrônômico no país.

O controle químico por fungicidas sintéticos foi, durante décadas, a estratégia mais empregada no manejo dessas doenças. O uso repetido de moléculas pertencentes a grupos como triazóis e estrobilurinas exerce pressão seletiva sobre populações de patógenos e favorece a seleção de isolados resistentes (BRENT; HOLLOMON, 2007). Além do risco agrônômico, estudos recentes indicam que o uso agrícola de fungicidas pode estar associado à seleção de mecanismos de resistência cruzada em fungos oportunistas de interesse médico. Restrições regulatórias em mercados importadores também pressionam a cadeia exportadora brasileira, pois reclassificações e cancelamentos de moléculas afetam o planejamento fitossanitário de culturas destinadas ao comércio internacional.

Nesse contexto, biofungicidas são avaliados como ferramentas complementares no manejo fitossanitário. Esses produtos são formulados a partir de microrganismos vivos ou de metabólitos com ação supressora sobre fungos fitopatogênicos (BETTIOL; MORANDI, 2009). O mercado brasileiro de bioinsumos registrou R\$ 4,35 bilhões em vendas na safra 2024/2025, valor 18% superior

ao ciclo anterior, e alcançou 194 milhões de hectares tratados na safra 2025/2026, aumento de 28% em relação ao ano anterior (KYNETEC, 2025; CROPLIFE, 2026). Nesse conjunto, os biofungicidas corresponderam a 17% do mercado, com crescimento de 41% e movimentação de R\$ 735 milhões, associados à maior demanda por ferramentas contra doenças foliares e ferrugem da soja.

A expansão dos biofungicidas, no entanto, apresenta limitações técnicas. A variação de desempenho em campo, a estabilidade reduzida de algumas formulações em ambientes tropicais, a eficácia limitada em patossistemas de difícil controle, como a ferrugem asiática, e a presença de produtos sem controle de qualidade adequado no mercado informal restringem a adoção segura desses insumos (MAPA, 2021; FRACETO et al., 2019). Assim, o potencial dos biofungicidas deve ser analisado junto com suas limitações operacionais, regulatórias e agronômicas.

O objetivo deste capítulo é sistematizar com base em evidências científicas e documentos técnicos, o uso de biofungicidas no Brasil.

METODOLOGIA

O capítulo foi elaborado por revisão bibliográfica sistemática e narrativa da literatura científica nacional e internacional, complementada por documentos técnicos de instituições públicas e dados de mercado. O levantamento foi realizado entre fevereiro e maio de 2026 e abrangeu publicações de 2001 a 2026.

Bases de dados e fontes consultadas

As buscas foram conduzidas nas bases SciELO, Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar e Portal de Periódicos CAPES. Também foram consultados repositórios institucionais da Universidade Federal de Viçosa, Universidade Federal de Uberlândia, Universidade Federal do Paraná, Universidade Estadual Paulista, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Instituto Federal Goiano e Universidade de Brasília. Publicações técnicas da Embrapa, documentos do Ministério da Agricultura e Pecuária e relatórios de mercado, foram empregados para dados regulatórios e econômicos. A legislação analisada compreendeu a Lei nº 7.802/1989, a Instrução Normativa MAPA nº 42/2010 e a Lei nº 14.785/2023.

Descritores e estratégia de busca

Foram empregados descritores em português e inglês: biofungicida, controle biológico de fungos, *Trichoderma*, *Bacillus*, *Coniothyrium minitans*, biocontrole de doenças, manejo integrado de doenças, biopesticida, biofungicide, biological control e plant disease biocontrol. Os termos foram combinados por operadores booleanos AND e OR. A busca foi estratificada por cultura, patógeno e agente biológico. As culturas consideradas foram soja, milho, hortaliças e fruticultura. Os patógenos-alvo foram *Sclerotinia*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Phakopsora* e *Corynespora*. Os agentes biológicos selecionados foram *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp., *Paenibacillus*, *Coniothyrium minitans* e *Beauveria bassiana*.

Crítérios de inclusão e exclusão

Foram selecionados artigos originais, revisões sistemáticas, dissertações e teses, além de publicações técnicas de abrangência nacional. Estudos conduzidos em condições edafoclimáticas brasileiras, com descrição de metodologia, resultados quantitativos e análise estatística, receberam prioridade. Para mercado e regulação, foram aceitos relatórios setoriais, documentos oficiais e notas técnicas com identificação da fonte.

Foram excluídos textos sem autoria identificada, estudos apenas in vitro sem confirmação em casa de vegetação ou campo e publicações anteriores a 2001 sem valor histórico ou teórico para o tema. Após triagem por aderência ao objetivo do capítulo e qualidade metodológica, 68 referências foram selecionadas, das quais 44 foram incorporadas ao texto. Os dados quantitativos foram organizados em tabelas comparativas.

DESENVOLVIMENTO

Definição e classificação

Biofungicidas constituem subcategoria dos bioinsumos, definidos pela legislação brasileira como insumos de origem biológica, natural ou sintética, destinados ao uso em sistemas de produção agropecuária (MAPA, 2020). De forma específica, são produtos fitossanitários formulados com microrganismos

vivos, como fungos filamentosos, bactérias esporuladas e leveduras, ou com metabólitos produzidos por esses organismos, que exercem ação supressora sobre fungos fitopatogênicos (BETTIOL; MORANDI, 2009). Essa definição abrange produtos à base de agentes de biocontrole, como *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp. e *Coniothyrium minitans*, e formulações com metabólitos purificados, como lipopeptídeos bacterianos e quitinases fúngicas.

A classificação dos biofungicidas pode ser feita segundo a natureza do agente ativo. Micofungicidas são formulados com fungos antagonistas, como *Trichoderma* spp. e *Coniothyrium minitans*. Bacteriofungicidas contêm bactérias antifúngicas, como *Bacillus subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. velezensis* e *Paenibacillus* spp. Produtos à base de metabólitos bioativos contêm lipopeptídeos, polienos ou compostos voláteis antifúngicos. Há ainda produtos associados à indução de resistência, que ativam respostas de defesa da planta hospedeira sem ação direta obrigatória sobre o patógeno.

Mecanismos de ação

Fungicidas sintéticos atuam, em geral, sobre um ou poucos alvos moleculares. Essa especificidade pode favorecer a seleção de populações resistentes quando há uso repetido de moléculas com o mesmo modo de ação. Biofungicidas, por sua vez, podem exercer diferentes mecanismos de supressão sobre o patógeno, o que reduz a dependência de um único alvo fisiológico (WINDING et al., 2004). Os mecanismos mais descritos são micoparasitismo, antibiose, competição, indução de resistência sistêmica e hiperparasitismo.

O micoparasitismo é característico de espécies de *Trichoderma*. O processo envolve reconhecimento do fungo patogênico, crescimento em direção ao hospedeiro, produção de enzimas hidrolíticas, como quitinases, glucanases e proteases, e degradação da parede celular fúngica (DRUZHININA et al., 2011). A eficiência desse mecanismo depende do isolado, do patógeno, da disponibilidade de nutrientes e das condições ambientais.

A antibiose consiste na produção de metabólitos com ação antifúngica. Em *Bacillus* spp., lipopeptídeos como iturinas, bacilomicinas, fengicinas e surfactinas atuam sobre a membrana plasmática de fungos fitopatogênicos por inserção e formação de poros (ONGENA; JACQUES, 2008). Em *Trichoder-*

ma spp., compostos voláteis, como 6-pentil-2H-piran-2-ona, e compostos não voláteis, como viridinas e koningiinas, participam da supressão de patógenos (HARMAN et al., 2004).

A competição ocorre pela disputa por nutrientes, como carbono, nitrogênio e ferro, e por sítios de colonização na rizosfera ou na filosfera. A produção de sideróforos contribui para a competição por ferro, em especial em condições de baixa disponibilidade desse micronutriente (BENÍTEZ et al., 2004). A indução de resistência sistêmica ocorre quando o agente biológico coloniza tecidos da planta e ativa vias de sinalização associadas ao ácido jasmônico e ao etileno, preparando a planta para resposta mais rápida a infecções posteriores (VAN LOON et al., 1998).

O hiperparasitismo específico é descrito para *Coniothyrium minitans* sobre escleródios de *Sclerotinia sclerotiorum*. O fungo penetra as estruturas de resistência do patógeno e promove sua degradação interna (WHIPPS; GERLAGH, 1992). A associação entre mais de um mecanismo em espécies de *Trichoderma* e *Bacillus* amplia o espectro de ação desses agentes, mas também dificulta a atribuição isolada dos efeitos observados em campo.

PRINCIPAIS AGENTES BIOLÓGICOS UTILIZADOS NO BRASIL

***Trichoderma* spp.: uso e limitações**

O gênero *Trichoderma* é um dos mais estudados e comercializados no Brasil para biocontrole de fungos fitopatogênicos. O primeiro produto registrado no MAPA à base de *Trichoderma* data de 2006; desde então, o número de registros aumentou junto com o mercado nacional de bioinsumos (AGROLINK, 2024). As espécies mais frequentes em produtos comerciais são *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. viride*, *T. atroviride* e *T. koningii*, com desempenho variável conforme patossistema e ambiente.

A capacidade de *Trichoderma* de colonizar diferentes ambientes de solo é apontada como fator associado ao seu uso no Brasil. O gênero apresenta tolerância a variações de temperatura, pH, salinidade e disponibilidade hídrica, embora a resposta dependa da cepa e das condições locais (AGROLINK, 2024). Mantovani (2024), em revisão sobre o uso de *Trichoderma* na agricultura, relatou que a

maior parte dos estudos avaliados demonstrou eficácia no controle de *Sclerotinia sclerotiorum* em condições laboratoriais e de casa de vegetação.

Resultados de campo, no entanto, mostram restrições. Fraceto et al. (2019), citados por Ribeiro et al. (2022), observaram que a persistência de *Trichoderma* em condições brasileiras de alta temperatura e radiação solar pode ser de apenas três dias, o que reduz a eficiência de aplicações foliares e exige reaplicações para manutenção da população efetiva. Butt, Jackson e Magan (2001) já apontavam desempenho instável em campo, interferência de variáveis edafoclimáticas e espectro restrito de ação como limitações do biocontrole fúngico.

Gondim (2025), ao avaliar 20 isolados de *Trichoderma* spp. contra *Ceratocystis fimbriata* in vitro, identificou variação entre isolados. O isolado T09 reduziu o comprimento médio do tubo germinativo de 70,66 µm, no controle, para 17,88 µm, enquanto outros isolados não reduziram ou estimularam o desenvolvimento do patógeno. Esse resultado mostra que a seleção de cepas é etapa crítica para a eficácia de produtos comerciais.

Bacillus spp.: estabilidade e espectro de ação

Bactérias do gênero *Bacillus* constituem outro grupo de agentes biológicos empregado em biofungicidas no Brasil. A formação de endósporos resistentes ao calor, dessecação, radiação UV e variações de pH confere estabilidade às formulações e favorece seu uso em regiões tropicais (ONGENA; JACQUES, 2008). As espécies *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens* e *B. velezensis* são as mais utilizadas, seguidas de *B. pumilus* e *Paenibacillus* spp.

A produção de lipopeptídeos antifúngicos é um dos mecanismos centrais dessas bactérias. Iturinas e bacilomicinas atuam contra fungos como *Fusarium* spp., *Botrytis cinerea*, *Alternaria* spp. e *Rhizoctonia solani*. Fengicinas apresentam atividade contra oomicetos, como *Pythium* e *Phytophthora* (CHEN et al., 2007). Surfactinas contribuem para colonização da planta e podem potencializar outros lipopeptídeos, embora sua ação antifúngica direta seja menor.

Correa (2023) desenvolveu formulação com células e concentrado de lipopeptídeos de *Bacillus velezensis* UCBB48 para controle da mancha-alvo da soja (*Corynespora cassiicola*). A formulação do tipo suspensão concentrada, associada a pontos quânticos de carbono como protetores contra radiação UV, manteve

viabilidade celular e bioatividade dos metabólitos por seis meses. Em casa de vegetação, o número médio de lesões foliares foi reduzido de 70, no controle, para aproximadamente 20, resultado semelhante ao tratamento com fungicida sintético padrão (CORREA, 2023).

O produto Bombardeiro®, lançado pela Biotrop em 2021, combina *B. subtilis*, *B. velezensis* e *B. pumilus* em formulação líquida de baixa dosagem. A composição tri-específica busca ampliar o espectro de ação e reduzir a perda de eficácia por variação entre patossistemas (PORTAL DO AGRONEGÓCIO, 2024). A Embrapa Milho e Sorgo e a empresa Simbiose desenvolveram o Eficaz Control, formulado com *Paenibacillus ottowii* e *Bacillus velezensis*. Ensaio de campo em soja e milho, realizados de 2020 a 2025, indicaram controle de até 80% de fungos causadores de podridão de raízes e colmos (EMBRAPA, 2025).

***Coniothyrium minitans*: especialização e persistência no solo**

Coniothyrium minitans é um fungo hiperparasita especializado em escleródios de *Sclerotinia sclerotiorum*. Essa especificidade confere alta seletividade a produtos como Contans® WG, com baixo efeito esperado sobre microrganismos não alvo do solo (WHIPPS; GERLAGH, 1992). Por essa razão, o produto é empregado em sistemas de manejo de mofo-branco, em especial quando a redução do banco de escleródios no solo é o objetivo principal.

A persistência de propágulos de *C. minitans* no solo e a capacidade de localizar escleródios durante a decomposição da matéria orgânica são suas principais vantagens. Diferentemente de biofungicidas que exigem reaplicações frequentes, aplicações ao solo em pré-semeadura podem reduzir a viabilidade de escleródios ao longo de meses (MORETINI; MELO, 2002). Estudos da Embrapa indicaram que formulações granuladas incorporadas ao solo favorecem a disseminação do agente na rizosfera e o controle de escleródios em profundidades de até 5 cm. A restrição está no espectro de ação, pois o produto é direcionado a patossistemas com *S. sclerotiorum* como agente principal.

Eficácia em cultivos estratégicos: evidências e contrapontos

Tabela 1 – Síntese de resultados de eficácia de biofungicidas em culturas brasileiras, estudos selecionados entre 2001 e 2025.

Agente biológico	Doença / patógeno	Cultura	Eficácia observada	Condição avaliada	Referência
<i>T. koningii</i> / <i>T. polysporum</i> LCB50	Murcha (<i>Fusarium</i> / <i>Rhizoctonia</i>)	Melão	48,1–51,6% de controle	Campo, CE	Tavares et al. (2012)
<i>Bacillus velezensis</i> UCBB48	Mancha-alvo (<i>C. cassiicola</i>)	Soja	Redução aproximada de 71% em lesões	Casa de vegetação	Correa (2023)
<i>Trichoderma harzianum</i> IBLF006 + BK-Th001	Mofa-branco (<i>S. sclerotiorum</i>)	Soja	Redução de incidência e aumento de produtividade	Campo, GO	Borges et al. (2025)
<i>Paenibacillus ottowii</i> + <i>B. velezensis</i>	<i>Fusarium</i> spp. e <i>M. phaseolina</i>	Soja e milho	Controle de até 80%	Campo	Embrapa/Simbiose (2025)
<i>Trichoderma</i> spp. T09	<i>Ceratocystis fimbriata</i>	Eucalipto	Redução de 74,7% no tubo germinativo	In vitro	Gondim (2025)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> MBI600	<i>Botrytis cinerea</i> e TSWV	Tomate	Redução de 50–80% de incidência	Casa de vegetação e campo	Carvalho et al. (2022)
<i>Coniothyrium minitans</i>	Mofa-branco (<i>S. sclerotiorum</i>)	Soja e hortaliças	Controle de escleródios no solo	Campo e casa de vegetação	Moretini; Melo (2002)
<i>B. subtilis</i> , <i>B. velezensis</i> e <i>B. pumilus</i>	Doenças foliares	Soja e milho	Eficácia similar a multissítios	Campo	Biotrop/SEGS (2024)
<i>Penicillium</i> sp.	Ferrugem asiática (<i>P. pachyrhizi</i>)	Soja	Uso complementar ao controle químico	Revisão bibliográfica	Damacena (2025)
<i>T. harzianum</i> T-22	<i>Rhizoctonia solani</i>	Melão	Eficácia em bioensaios de rizosfera	Casa de vegetação	Embrapa Hortaliças (2025)

Nota: DFCs = doenças foliares de cultivo.

Soja

A soja concentra o maior volume de estudos com biofungicidas no Brasil. Dois patossistemas recebem maior atenção: mofo-branco, causado por *Sclerotinia sclerotiorum*, e podridões de solo e raízes associadas a *Fusarium* spp., *Macrophomina phaseolina* e *Rhizoctonia solani*. Para esses patossistemas, *Trichoderma* e *Bacillus* apresentam resultados favoráveis em condições controladas, mas com variação em campo.

Borges et al. (2025) observaram redução da incidência de mofo-branco e incremento de produtividade em lavouras de soja tratadas com *T. harzianum* no estado de Goiás. Os autores indicaram que a eficácia foi condicionada à umidade do solo nos primeiros 30 dias após a aplicação, restrição prática em regiões sujeitas a veranicos.

O controle da ferrugem asiática por biofungicidas permanece como desafio técnico. Damacena (2025) selecionou 38 publicações, a partir de 90 registros, e concluiu que agentes como *B. subtilis* e *Trichoderma* spp. apresentaram efeito sobre *P. pachyrhizi* e sobre mecanismos de resistência da planta, mas a aplicação em larga escala ainda depende de pesquisa, capacitação técnica e programas de manejo. A rede cooperativa de 32 pesquisadores brasileiros analisada por Godoy et al. (EMBRAPA, 2023) confirmou que fungicidas multissítios associados a estratégias integradas reduziram a severidade da ferrugem, mas o papel dos biofungicidas permaneceu complementar aos fungicidas sintéticos nas condições avaliadas.

Milho e horticultura

No milho, biofungicidas têm sido usados em tratamento de sementes e no sulco de semeadura para o controle de *Fusarium verticillioides*, *Colletotrichum graminicola* e *Stenocarpella maydis*. O Eficaz Control, formulado com *P. ot-towii* e *B. velezensis*, foi desenvolvido para patógenos de solo e raiz, locais em que o controle químico apresenta menor alcance físico (EMBRAPA, 2025). A aplicação no sulco aproxima o agente biológico do sistema radicular e favorece a ação dos endósporos bacterianos.

Na horticultura, com destaque para tomate e pimentão em cultivo protegido, *Botrytis cinerea*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* e *Leveillula taurica* estão entre os patógenos de maior impacto. Biofungicidas à base de *Bacillus amyloliquefaciens* MBI600 apresentam resultados favoráveis nesses sistemas. Carvalho et al. (2022) documentaram redução de 50 a 80% na incidência de TSWV associada à ação antifúngica da cepa. Cultivos protegidos, por apresentarem menor variação ambiental e maior controle de umidade relativa, tendem a favorecer a persistência dos agentes biológicos em comparação com lavouras extensivas.

Tecnologias de formulação: avanços e gargalos

A eficácia de biofungicidas em campo depende do agente biológico e da formulação. Formulações inadequadas podem reduzir ou anular o desempenho de cepas eficazes em laboratório. No Brasil, temperaturas elevadas, alta radiação UV, variação de pH do solo e competição microbiana impõem restrições à sobrevivência e à atividade dos microrganismos após a aplicação (INDOVINYA, 2024).

Tabela 2 – Tipos de formulação de biofungicidas, características e adequação a sistemas produtivos brasileiros.

Tipo de formulação	Características	Vantagens	Limitações	Aplicação recomendada
Pó molhável (WP)	Esporos ou células secas com adjuvantes sólidos	Baixo custo; armazenamento simples	Menor uniformidade de cobertura; sem proteção UV	Solo e ambientes protegidos
Suspensão concentrada (SC)	Células ou esporos em suspensão aquosa com estabilizantes	Alta uniformidade; boa cobertura foliar	Exige protetores UV; prazo de validade menor	Foliar e tratamento de sementes
Grânulos dispersíveis em água (WG)	Grânulos secos com alta concentração de esporos	Dosagem simples; liberação uniforme no solo	Menor adequação à aplicação aérea	Solo e sulco de semeadura
Grânulos para solo (GR)	Grânulos com liberação lenta na rizosfera	Ação prolongada	Uso restrito a patógenos de solo	Incorporação ao solo e sulco de plantio

Líquido concentrado (SL)	Metabólitos purificados ou células em formulação líquida	Alta miscibilidade; preparo simples da calda	Menor prazo de validade; sensível ao calor	Foliar e integração com fungicidas
Encapsulada (EC/nano)	Esporos encapsulados em polímeros ou nanopartículas	Proteção contra UV; liberação controlada	Custo elevado; tecnologia em desenvolvimento	Aplicações de precisão e uso foliar

Tecnologias de proteção contra radiação UV têm avançado no país. Correa (2023) demonstrou que pontos quânticos de carbono, usados como protetores UV em formulações de *B. velezensis*, mantiveram viabilidade celular e bioatividade por seis meses. A Embrapa Hortaliças também avançou na produção de microescleródios de *T. harzianum* T-22, estruturas de resistência mais robustas que conídios convencionais, destinadas a formulações de liberação lenta, com maior persistência no solo e tolerância a variações de temperatura e umidade (EMBRAPA HORTALIÇAS, 2025).

O MAPA (2021), por meio da Câmara Temática de Insumos Agropecuários, identificou a produção em escala comercial com qualidade e consistência como um dos principais gargalos do setor. A demanda por produtos biológicos, associada à capacidade industrial ainda limitada, favorece a circulação de produtos não registrados e com desempenho incerto no mercado informal, o que reduz a confiança do produtor quando há experiências de baixa eficácia.

CONCLUSÕES

Os biofungicidas passaram de objeto de pesquisa acadêmica para componentes comerciais do mercado brasileiro de bioinsumos. O setor registrou R\$ 735 milhões em vendas de biofungicidas na safra 2024/2025 e área tratada de 194 milhões de hectares com controle biológico na safra 2025/2026, o que indica expansão do uso desses produtos em sistemas agrícolas.

A literatura analisada, entretanto, mostra que a adoção dos biofungicidas exige interpretação técnica. A variação de desempenho em campo, a persistência reduzida de alguns agentes em ambientes tropicais, a eficácia limitada contra patógenos policíclicos como *Phakopsora pachyrhizi*, a heterogeneidade entre produtos comerciais e os entraves regulatórios ainda restringem a apli-

cação em larga escala (BUTT; JACKSON; MAGAN, 2001; FRACETO et al., 2019; MAPA, 2021). A análise de Gabriel Medina, da Universidade de Brasília, sobre diferenças tecnológicas entre produtos disponíveis no mercado reforça a necessidade de controle de qualidade e comunicação técnica mais precisa.

A estratégia mais consistente, com base nas evidências revisadas, é a incorporação dos biofungicidas ao Manejo Integrado de Doenças. Nesse modelo, esses produtos atuam de forma preventiva no estabelecimento da cultura, em rotação com fungicidas sintéticos para reduzir pressão de seleção de resistência e em programas de manejo nos quais o controle químico isolado apresenta limitações. O avanço do setor dependerá de formulações com maior estabilidade, tecnologias de proteção contra radiação UV, consórcios microbianos, bioprospecção de microrganismos nativos e regulamentação adequada para produtos biológicos de baixo risco.

REFERÊNCIAS

- BENÍTEZ, T. et al. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, v. 7, n. 4, p. 249–260, 2004.
- BETTIOL, W. Biofungicidas: perspectivas de uso no manejo integrado de doenças. In: BETTIOL, W. (Org.). *Métodos alternativos de controle fitossanitário*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 83–116.
- BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. (Eds.). *Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 341 p.
- BIOTROP/PORTAL DO AGRONEGÓCIO. Biofungicidas multissítios: eficácia e custo-benefício em alta. Portal do Agronegócio, set. 2024.
- BRENT, K. J.; HOLLOMON, D. W. *Fungicide resistance: the assessment of risk*. Brussels: FRAC, 2007. 56 p. (FRAC Monograph n. 2).
- BUTT, T. M.; JACKSON, C.; MAGAN, N. (Eds.). *Fungi as biocontrol agents: progress, problems and potential*. Wallingford: CABI, 2001. 390 p.
- CHEN, X. H. et al. Comparative analysis of the complete genome sequence of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42. *Nature Biotechnology*, v. 25, n. 9, p. 1007–1014, 2007.
- CORREA, J. S. **Desenvolvimento de um biofungicida formulado à base de *Bacillus velezensis* e seus metabólitos para o controle de doenças de parte aérea da soja**. 2023. 68 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023.

COTRIBÁ. O uso de biofungicidas como aliados à produtividade. Cotribá Agro-negócio, jul. 2023.

CROPLIFE BRASIL. Mercado de bioinsumos atinge R\$ 6,2 bilhões em vendas e área tratada cresce 28% em 2025. CropLife Brasil, abr. 2026.

DAMACENA, H. G. M. **Defensivo biológico no controle da ferrugem-asiática da soja: uma revisão de literatura**. 2025. Monografia (Graduação em Agronomia) — IF Goiano, Goiás, 2025.

DRUZHININA, I. S. et al. *Trichoderma*: the genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology*, v. 9, p. 749–759, 2011.

EMBRAPA MILHO E SORGO. Novo biofungicida controla fungos de solo com até 80% de eficiência. Embrapa, jul. 2025.

EMBRAPA HORTALIÇAS. Pesquisadores avançam na produção de microescleródios de *Trichoderma* para controle de *Rhizoctonia solani*. Embrapa, nov. 2025.

EMBRAPA SOJA. Pesquisa identifica fungos do solo que eliminam 100% do mofo-branco. Embrapa, jun. 2025.

FRACETO, L. F. et al. Nanotechnology as a tool for increased biological activity of biological control agents. *Frontiers in Environmental Science*, v. 7, 2019.

GODOY, C. V. et al. Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*. Embrapa Soja, Circular Técnica 195, Londrina, 2023.

GONDIM, D. D. R. **Eficiência de isolados de *Trichoderma* spp. no controle biológico in vitro de *Ceratocystis fimbriata***. 2025. 26 f. TCC (Engenharia Florestal) — UFU, Uberlândia, 2025.

HARMAN, G. E. et al. *Trichoderma* species — opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, v. 2, p. 43–56, 2004.

INDOVINYA. Biopesticidas: desafios para formulações inovadoras. Indovinya Blog, fev. 2024.

MANTOVANI, F. V. **Uso do *Trichoderma* na agricultura**. 2024. TCC (Agronomia) — UFPR, Curitiba, 2024.

MAPA — MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Panorama e desafios do controle biológico no Brasil**. Câmara Temática de Insumos Agropecuários, Brasília, 2021.

MAPA. Balanço anual de registros de agrotóxicos e bioinsumos em 2025. Brasília: MAPA, 2026.

MAPA. Mapa encerra 2023 com 90 produtos de baixo impacto registrados. Brasília: MAPA, dez. 2023.

MORETINI, A.; MELO, I. S. Formulação do fungo *Coniothyrium minitans* para controle do mofo-branco causado por *Sclerotinia sclerotiorum*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 4, 2002.

NOVA DO BRASIL. Estratégias antirresistência a fungicidas. Nova do Brasil Blog, nov. 2024.

ONGENA, M.; JACQUES, P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. *Trends in Microbiology*, v. 16, n. 3, p. 115–125, 2008.

RIBEIRO, T. P. et al. Eficiência de *Trichoplus* (*Trichoderma asperellum*) como promotor de crescimento e biocontrole. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 4, 2022.

TAVARES, C. B. et al. Eficiência de isolados de *Trichoderma* spp. no controle de murcha do meloeiro amarelo. *Revista Caatinga*, v. 25, n. 4, p. 1–9, 2012.

UNESP. Uso de fungicidas agrícolas compromete tratamentos contra infecções graves em humanos. *Jornal UNESP*, jan. 2026.

VAN LOON, L. C.; BAKKER, P. A. H. M.; PIETERSE, C. M. J. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Phytopathology*, v. 36, p. 453–483, 1998.

WHIPPS, J. M.; GERLAGH, M. Biology of *Coniothyrium minitans* and its potential for use in disease biocontrol. *Mycological Research*, v. 96, n. 11, p. 897–907, 1992.

WINDING, A. et al. Non-target effects of bacterial biological control agents suppressing root pathogens. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 47, n. 2, p. 129–141, 2004.

ZEILINGER, S. et al. Friends or foes? Emerging insights from fungal interactions with plants. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 40, n. 2, p. 182–207, 2016.

CAPÍTULO 5

USO DE AMINOÁCIDOS E BIOESTIMULANTES À BASE DE BIOINSUMOS NA AGRICULTURA

Use of Amino Acids and Bioinput-Based Biostimulants in Agriculture

Alane Oliveira da Silva
Dimas Luiz da Silva Cappovila
Eduardo Guimarães Bonatti
Maurício Felipe Silva
Antônio Elison da Silva
Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Tamiris Alves Dos Santos
Harleson Sidney Almeida Monteiro
Iego Sampaio de Sousa
Iracema Alves Manoel Degaspari
Felipe Valadares Ribeiro Avelar
Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes

Resumo: Bioestimulantes à base de aminoácidos, hidrolisados proteicos, extratos de algas, substâncias húmicas e microrganismos promotores de crescimento têm sido estudados como insumos complementares para o manejo fisiológico e nutricional das plantas em sistemas agrícolas. No Brasil, o tema ganhou importância após a regulamentação dos bioestimulantes pela Instrução Normativa MAPA nº 61/2020 e pela expansão do mercado de bioinsumos. Este capítulo revisa fontes, mecanismos de ação, efeitos agrônômicos, interações com o sistema de produção, regulação e limitações desses produtos. Aminoácidos atuam como precursores metabólicos, quelantes de micronutrientes, osmoprotetores e componentes de sistemas antioxidantes, enquanto extratos de algas e microrganismos promotores de crescimento podem modular enraizamento, nutrição e tolerância a estresses abióticos. Estudos em milho, soja, trigo, alface e outras culturas indicam respostas positivas em crescimento, atividade enzimática, absorção de nutrientes e rendimento, mas a magnitude dos efeitos depende da dose, formulação, cultura, ambiente e condição fisiológica da planta.

Palavras-chave: aminoácidos; bioestimulantes; bioinsumos; hidrolisados proteicos; fisiologia vegetal; nutrição de plantas.

Abstract: Amino acid-based biostimulants, protein hydrolysates, seaweed extracts, humic substances, and plant growth-promoting microorganisms have been investigated as complementary inputs for physiological and nutritional crop management. In Brazil, the topic gained relevance after the regulation of biostimulants by MAPA Normative Instruction No. 61/2020 and the expansion of the bioinput market. This chapter reviews sources, modes of action, agronomic effects, interactions with production systems, regulation, and limitations of these products. Amino acids act as metabolic precursors, micronutrient chelators, osmoprotectants, and components of antioxidant systems, whereas seaweed extracts and plant growth-promoting microorganisms can modulate rooting, nutrition, and tolerance to abiotic stresses. Studies in maize, soybean, wheat, lettuce, and other crops indicate positive responses in growth, enzymatic activity, nutrient uptake, and yield, but the magnitude of the effects depends on dose, formulation, crop, environment, and plant physiological condition.

Keywords: amino acids; biostimulants; bioinputs; protein hydrolysates; plant physiology; plant nutrition.

INTRODUÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos e, ao mesmo tempo, reduzir impactos ambientais associados ao uso intensivo de insumos sintéticos. Nesse contexto, bioestimulantes e produtos à base de aminoácidos têm sido avaliados como ferramentas complementares ao manejo nutricional e fisiológico das culturas. Esses produtos podem atuar sobre crescimento vegetal, eficiência de uso de nutrientes e tolerância a estresses abióticos, desde que empregados em condições adequadas de dose, formulação, cultura e ambiente (DU JARDIN, 2015; CALVO et al., 2014).

A definição de bioestimulante consolidada pelo Regulamento Europeu 2019/1009 e adotada por grande parte da literatura científica inclui produtos que, aplicados às plantas ou ao solo em baixas concentrações, estimulam processos naturais relacionados à eficiência de uso de nutrientes, tolerância a estresses abióticos e qualidade da produção, independentemente do teor de nutrientes (DU JARDIN, 2015). Essa definição abrange extratos de algas, hidrolisados proteicos, ácidos húmicos e fúlvicos, aminoácidos livres, microrganismos promotores de crescimento e alguns compostos inorgânicos. A amplitude do con-

ceito amplia o escopo de aplicação, mas dificulta a padronização regulatória e experimental.

No Brasil, a regulamentação avançou com a Instrução Normativa MAPA nº 61, de 8 de julho de 2020, que estabeleceu requisitos para registro, produção, embalagem, armazenamento e comercialização de bioestimulantes vegetais (MAPA, 2020). Antes dessa norma, muitos produtos eram enquadrados como fertilizantes, condicionadores de solo ou outros insumos, o que criava incerteza jurídica para empresas, técnicos e produtores. A criação de uma categoria específica favoreceu a estruturação do mercado. Estimativas setoriais indicam que o mercado brasileiro de bioestimulantes foi avaliado em aproximadamente USD 850 milhões em 2024, com projeção de crescimento anual composto de 10–12% até 2030 (MORDOR INTELLIGENCE, 2024; IMARC GROUP, 2025).

Os aminoácidos ocupam posição central nesse segmento. Além de participarem da síntese de proteínas, eles atuam na formação de fitormônios, na sinalização associada a estresses, na quelação e no transporte de micronutrientes, na regulação osmótica e no metabolismo do nitrogênio (QUEIROZ et al., 2024; ALTMANN, 2025). Quando aplicados em formas livres ou como hidrolisados proteicos, podem reduzir parte do custo metabólico associado à síntese endógena de compostos nitrogenados, especialmente em plantas sob estresse (CALVO et al., 2014; DU JARDIN, 2015).

Apesar do crescimento do setor, a literatura registra limitações metodológicas. A composição dos produtos comerciais é heterogênea, os protocolos de avaliação agrônômica não são padronizados, as respostas variam entre genótipos e ambientes, e os mecanismos de ação permanecem incompletos para várias categorias de produtos (QUEIROZ et al., 2024; ALTMANN, 2025).

METODOLOGIA

Este capítulo foi elaborado por revisão bibliográfica sistemática e narrativa, conduzida entre março e maio de 2026, com publicações de 1986 a 2026. A seleção incluiu artigos científicos, revisões, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso, documentos técnicos, legislação e relatórios de mercado.

Fontes de dados

As buscas foram realizadas nas bases SciELO, Scopus, Web of Science, Portal de Periódicos CAPES, Google Scholar, Dialnet e PubMed. Também foram consultados repositórios institucionais da UNESP, UFPEL, IF Goiano, USP, UFSC, UFGS, PUC-RS, UFSM e UNIVASF.

Foram usados documentos técnicos da Embrapa, publicações da Embrapa Milho e Sorgo e Embrapa Soja, materiais da ESALQ/USP, a Instrução Normativa MAPA nº 61/2020 e o Regulamento Europeu 2019/1009. Para dados de mercado, foram consultados relatórios da Mordor Intelligence, IMARC Group, Spherical Insights e Poder360/Bioinsumos.

Estratégia de busca

Foram empregados descritores em português, inglês e espanhol: bioestimulante, aminoácido vegetal, hidrolisado proteico, extrato de algas, substâncias húmicas, PGPR, PGPM, promotor de crescimento, estresse abiótico, biostimulante, amino acid, protein hydrolysate, seaweed extract, humic substances, plant growth promoting e bioinsumo. Os termos foram combinados por operadores booleanos AND e OR.

As buscas foram estratificadas por categoria de bioestimulante, cultura e tipo de estresse. As categorias consideradas foram aminoácidos, extratos de algas, substâncias húmicas e microrganismos promotores de crescimento. As culturas incluíram soja, milho, tomate, trigo, algodão, hortaliças e frutíferas. Os estresses considerados foram hídrico, salino, térmico e nutricional.

Crítérios de inclusão e exclusão

Foram incluídos artigos originais com avaliação por pares, revisões sistemáticas, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso de nível superior em Engenharia Agrônômica, Fisiologia Vegetal e áreas correlatas, além de documentos técnicos de instituições de pesquisa reconhecidas e relatórios de mercado com fonte identificada. Estudos conduzidos no Brasil ou em culturas de relevância para o agronegócio nacional receberam prioridade.

Foram excluídos estudos exclusivamente *in vitro* sem relação com plantas ou sistemas de cultivo, textos sem autoria identificável e materiais de divulgação comercial sem base científica verificável. Ao final da triagem, 65 referências foram selecionadas, das quais 43 foram incorporadas ao texto. A síntese priorizou convergências, discrepâncias e limitações metodológicas.

DESENVOLVIMENTO

Classificação e categorias de bioestimulantes

A classificação adotada neste capítulo segue Du Jardin (2015), referência amplamente utilizada na literatura científica e na construção do Regulamento Europeu 2019/1009. Segundo essa classificação, bioestimulantes podem ser agrupados em ácidos húmicos e fúlvicos, extratos de algas marinhas, hidrolisados proteicos e aminoácidos livres, compostos inorgânicos, microrganismos promotores de crescimento, quitosana e outros biopolímeros, além de antitranspirantes.

Ácidos húmicos e fúlvicos são derivados da degradação da matéria orgânica e podem estimular o sistema radicular e o transporte de nutrientes por ativação da H⁺-ATPase de membrana (FAÇANHA et al., 2002 apud OLIVEIRA; SOUSA, 2016). Extratos de algas, em especial de *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima* e *Sargassum* spp., contêm citocininas, auxinas, betaínas, manitol e oligossacarídeos bioativos. Hidrolisados proteicos e aminoácidos livres são obtidos por hidrólise de materiais proteicos de origem vegetal ou animal e contêm peptídeos curtos e aminoácidos com possível ação bioestimulante.

Microrganismos promotores de crescimento, como *Azospirillum brasilense*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *Trichoderma* spp. e fungos micorrízicos arbusculares, atuam por produção de fitormônios, solubilização de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio ou indução de resistência. Quitosana e outros biopolímeros podem atuar como elicitores de defesa, enquanto compostos inorgânicos, como silício e titânio, são avaliados por efeitos sobre resistência e tolerância a estresses.

No Brasil, as categorias de maior relevância comercial e científica são aminoácidos e hidrolisados proteicos, extratos de algas e microrganismos promotores de crescimento. Em conjunto, essas categorias respondem por aproximadamente 70% do mercado nacional de bioestimulantes, segundo estimativas setoriais

(MORDOR INTELLIGENCE, 2024). Substâncias húmicas e fúlvicas também são estudadas por grupos brasileiros, como os da UENF, embora a aplicação comercial dependa de estabilidade da formulação e padronização analítica.

AMINOÁCIDOS: FONTES, COMPOSIÇÃO E MECANISMOS DE AÇÃO

Fontes e métodos de obtenção

Aminoácidos utilizados em formulações bioestimulantes são obtidos principalmente por hidrólise química ou hidrólise enzimática de materiais proteicos. A hidrólise química, geralmente ácida ou alcalina, produz misturas com alto teor de aminoácidos livres, mas pode degradar compostos termolábeis, como triptofano, e gerar subprodutos indesejáveis. A hidrólise enzimática usa proteases em condições mais brandas de temperatura e pH, preserva aminoácidos sensíveis e gera peptídeos curtos com atividade bioestimulante (COLLA et al., 2015 apud QUEIROZ et al., 2024).

Matérias-primas vegetais, como proteínas de soja, milho e trigo, são usadas na produção de hidrolisados proteicos para bioestimulantes no Brasil devido à disponibilidade e ao perfil de aminoácidos de interesse agrônômico (ALTMANN, 2025). Hidrolisados de origem animal, como couro, penas e sangue, apresentam menor custo, mas podem ter composição menos equilibrada e exigir controle de qualidade mais rigoroso, dependendo do processo de produção (QUEIROZ et al., 2024).

A Ajinomoto Fertilizantes, com operações no Brasil, produz aminoácidos por fermentação microbiana para uso em formulações agrícolas. Esse processo permite obtenção de L-aminoácidos com maior pureza e estereosseletividade, característica relevante porque as plantas utilizam preferencialmente a forma L em processos metabólicos (AJINOMOTO, 2022).

Mecanismos de ação nas plantas

Os mecanismos associados aos aminoácidos exógenos envolvem precursores metabólicos, quelação de nutrientes, osmorregulação, metabolismo do nitrogênio e defesa antioxidante. Embora esses processos sejam descritos na

literatura, a magnitude do efeito depende de dose, forma química, via de aplicação, estágio fenológico e condição fisiológica da planta.

Alguns aminoácidos são precursores de fitormônios e metabólitos secundários. O triptofano participa da rota de síntese do ácido indolacético, auxina relacionada a alongação celular e formação de raízes. A metionina participa da síntese de etileno, hormônio associado ao amadurecimento e à senescência. Ácido glutâmico e glutamina participam da formação de ácido gama-aminobutírico (GABA), molécula relacionada a respostas ao estresse hídrico e ao dano mecânico (DU JARDIN, 2015; ALTMANN, 2025).

A quelação de micronutrientes é outro mecanismo relevante. Glicina, ácido glutâmico e ácido aspártico podem formar complexos com zinco, ferro, cobre e manganês, favorecendo a mobilidade e a absorção desses elementos em solução foliar ou no solo (QUEIROZ et al., 2024). Esse mecanismo tem maior importância em solos de pH elevado ou em situações de precipitação química de micronutrientes.

A prolina é o aminoácido mais citado em estudos de tolerância ao estresse hídrico. Em déficit hídrico, ela se acumula no citosol e atua como soluto compatível, contribuindo para manutenção da turgescência, estabilidade de membranas e proteção de proteínas. A aplicação exógena de prolina pode antecipar parte dessa resposta, embora o efeito dependa do estágio da planta e da intensidade do estresse (ALTMANN, 2025; REVISTACULTIVAR, 2024).

No metabolismo do nitrogênio, o fornecimento de aminoácidos pode reduzir parte do custo energético de assimilação de N inorgânico, processo que envolve nitrato redutase, glutamina sintetase, NADH e ATP. Quando a planta recebe N em forma orgânica já assimilada, parte da energia pode ser direcionada a crescimento ou defesa, especialmente sob estresse (DU JARDIN, 2015; CALVO et al., 2014).

Aminoácidos também participam da defesa antioxidante. A cisteína integra a síntese de glutathiona, composto com função na neutralização de espécies reativas de oxigênio e na detoxificação de metais. Esse mecanismo é citado em formulações voltadas à mitigação de estresses fisiológicos, sobretudo aqueles associados a déficit hídrico, salinidade e desequilíbrio nutricional (QUEIROZ et al., 2024).

EFEITOS DOCUMENTADOS EM CULTURAS AGRÍCOLAS

Milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas com maior número de estudos brasileiros sobre bioestimulantes à base de aminoácidos. Oliveira e Sousa (2016), em experimento na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, avaliaram dois bioestimulantes à base de aminoácidos e um produto à base de substâncias húmicas em plântulas cultivadas em solução nutritiva. Todos os tratamentos aumentaram o peso seco total em relação ao controle. O produto com substâncias húmicas teve maior efeito sobre a área de raízes com diâmetro entre 1 e 2 mm e entre 2 e 4,5 mm, enquanto os produtos à base de aminoácidos aumentaram a área de superfície radicular total (OLIVEIRA; SOUSA, 2016).

Altmann (2025), em tese conduzida na UFPEL, avaliou bioestimulante à base de aminoácidos em milho, com foco em metabolismo do nitrogênio, atividade antioxidante e componentes de produção em campo no Rio Grande do Sul. A aplicação foliar de hidrolisado proteico vegetal no estágio V6 aumentou a atividade da nitrato redutase em 18% e a concentração de clorofila total em 12% em relação ao controle, com reflexo sobre número de grãos por espiga e massa de mil grãos (ALTMANN, 2025).

Soja

Na soja (*Glycine max* L.), a relação entre aminoácidos exógenos e metabolismo do nitrogênio é influenciada pela fixação biológica de nitrogênio por *Bradyrhizobium*. Klahold et al. (2006), em estudo publicado na *Acta Scientiarum Agronomy*, observaram que a aplicação de bioestimulante em soja aumentou a altura de plantas em 5,6%, a massa de grãos em 15,7% e o rendimento final em 10,8% em relação ao controle. Os autores também registraram dependência da dose, com redução do efeito positivo em doses elevadas, característica compatível com resposta hormética.

Estudo conduzido na USP/ESALQ em 2021 avaliou se hidrolisados de proteína e extratos de algas modulam o metabolismo do nitrogênio em soja. Os resultados indicaram que o hidrolisado proteico vegetal aumentou a atividade da glutamina sintetase foliar em 22% e elevou a concentração de N total nas folhas, sugerindo efeito sobre a assimilação de nitrogênio (USP/ESALQ, 2021).

Trigo e culturas de inverno

Ribeiro (2024), em estudo conduzido na UNESP, avaliou bioestimulante à base de aminoácidos e extrato de algas em trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivado no Paraná e em São Paulo. A aplicação combinada de aminoácidos e *Ascochyllum nodosum* no estágio de alongamento aumentou o rendimento de grãos em 8,3% e reduziu o índice de dano por frio. O efeito foi atribuído à osmorregulação associada a betaína e prolina, embora os autores indiquem necessidade de estudos adicionais para separar o efeito de cada componente da formulação (RIBEIRO, 2024).

Hortaliças e fruticultura

Em hortaliças, os efeitos de bioestimulantes podem ser mais evidentes que em grandes culturas, em razão do ambiente protegido, do ciclo curto e do maior controle de irrigação e nutrição. Nozari (2018), em dissertação na PUC-RS, avaliou bioestimuladores à base de aminoácidos em alface (*Lactuca sativa* L.). A aplicação foliar de hidrolisado proteico vegetal em quatro concentrações resultou em aumentos de 12 a 28% na massa fresca, com maior resposta na concentração intermediária, padrão compatível com efeito dependente da dose.

Tabela 1. Resultados selecionados de estudos sobre bioestimulantes à base de aminoácidos em culturas brasileiras.

Produto ou princípio ativo	Cultura	Parâmetro avaliado	Resultado	Referência
Hidrolisado proteico vegetal	Milho	Área de superfície radicular total	Aumento em relação ao controle	Oliveira; Sousa (2016)
Hidrolisado proteico vegetal	Milho	Nitrato redutase e clorofila total	+18% e +12% em relação ao controle	Altmann (2025)
Bioestimulante comercial com aminoácidos	Soja	Rendimento de grãos	+10,8% em relação ao controle	Klahold et al. (2006)
Hidrolisado proteico vegetal	Soja	Glutamina sintetase foliar	+22% em relação ao controle	USP/ESALQ (2021)
Aminoácidos + extrato de <i>A. nodosum</i>	Trigo	Rendimento de grãos e dano por frio	+8,3% e redução de danos	Ribeiro (2024)

Hidrolisado proteico vegetal	Alface	Massa fresca	+12–28% em relação ao controle	Nozari (2018)
Aminoácidos + substâncias húmicas	Milho	Peso seco total e raízes	Aumento em todos os tratamentos	Oliveira; Sousa (2016)
Bioestimulante com aminoácidos e micronutrientes	Trigo e soja	Germinação e vigor de sementes	+5,6–15,7% em relação ao controle	Klahold et al. (2006)

Extratos de algas marinhas como bioestimulantes

O extrato da alga parda *Ascophyllum nodosum*, coletada no Atlântico Norte, é um dos principais ingredientes ativos de bioestimulantes à base de algas comercializados no Brasil. Sua composição inclui citocininas, auxinas, giberelinas, betaínas, manitol, alginatos, fucanas sulfatadas, laminarina e oligossacarídeos bioativos (SYNGENTA/MAIS AGRO, 2026). Essa composição complexa permite múltiplos efeitos fisiológicos, mas dificulta a atribuição dos resultados a compostos específicos.

O efeito mais descrito dos extratos de algas é a estimulação do sistema radicular. Citocininas podem estimular divisão celular, auxinas podem favorecer alongação e formação de raízes laterais, betaínas e manitol atuam como osmo-protetores e oligossacarídeos sulfatados podem atuar como elicitores de defesa. A Pesagro-Rio (2020) avaliou extrato de *A. nodosum* em culturas olerícolas e observou aumento do índice de velocidade de emergência, da área foliar e da produtividade de tomate entre 15 e 22% em relação ao controle convencional.

Battacharyya et al. (2015), citados por Altmann (2025), apontam contra-ponto relevante: a concentração de fitormônios em extratos comerciais costuma estar em faixa nanomolar, o que pode ser insuficiente para explicar efeitos fisiológicos diretos por absorção foliar. Essa interpretação reforça a hipótese de que oligossacarídeos, betaínas e manitol contribuam de forma mais expressiva para os efeitos observados. A definição do mecanismo dominante ainda requer estudos com formulações controladas e rastreamento de compostos.

Bactérias promotoras de crescimento como bioestimulantes microbianos

Rizobactérias promotoras de crescimento de plantas, denominadas PGPR, constituem bioestimulantes microbianos com ação direta e indireta. Esses microrganismos podem produzir fitormônios, solubilizar fosfatos, fixar nitrogênio atmosférico, produzir sideróforos, suprimir patógenos de solo e induzir resistência sistêmica (BHATTACHARYYA; JHA, 2012 apud EMBRAPA, 2021). No Brasil, *Azospirillum brasilense* é o exemplo mais consolidado de PGPR em gramíneas, com uso em milho, trigo e arroz.

Segundo a Embrapa (2021), inoculantes com *Azospirillum brasilense* podem aumentar a produtividade do milho entre 10 e 30% e permitir redução de 30 a 40% da dose de nitrogênio mineral em condições específicas. Os mecanismos associados incluem produção de ácido indolacético, aumento do sistema radicular, fixação biológica de nitrogênio associativa e maior absorção de nutrientes.

A co-inoculação de *Azospirillum brasilense* com *Bradyrhizobium japonicum* em soja aumentou o rendimento de grãos em 8,4% em relação à inoculação simples com *Bradyrhizobium* (EMBRAPA, 2021). Esse resultado indica possibilidade de sinergia entre microrganismos em culturas com fixação biológica de nitrogênio estabelecida. Formulações que combinam microrganismos e hidrolisados proteicos representam uma frente de desenvolvimento no mercado de bioinsumos, mas exigem compatibilidade biológica, estabilidade e validação agrônômica.

Tabela 2. Microrganismos promotores de crescimento utilizados como bioestimulantes no Brasil e mecanismos associados. FBN = fixação biológica de nitrogênio; AIA = ácido indolacético; ISR = resistência sistêmica induzida.

Microrganismo	Mecanismo principal	Culturas	Resultado documentado	Referência
Azospirillum brasilense	FBN associativa e produção de AIA	Milho, trigo, arroz	+10–30% produtividade; redução de 30–40% no N mineral	Embrapa (2021)
Bradyrhizobium japonicum	FBN simbiótica	Soja	Fornecimento de 70–90% do N da cultura	Embrapa (2021)
Bacillus subtilis	Lipopeptídeos, ISR e AIA	Hortaliças, soja, milho	Biocontrole e crescimento	SOLUSOLO (2025)
Pseudomonas fluorescens	Solubilização de P, sideróforos e ISR	Trigo, milho, hortaliças	Aumento de P disponível e redução de doenças	UFSC/SIC (2024)
Trichoderma harzianum	Solubilização de P e Zn; micoparasitismo	Soja, hortaliças, café	Enraizamento e biocontrole	AGROLINK (2024)
Rhizophagus irregularis	Micorrização e absorção de P e Zn	Fruticultura, hortaliças	+15–40% absorção de P; maior tolerância à seca	EDITORA PANTANAL (2022)
Herbaspirillum seropedicae	FBN associativa	Cana-de-açúcar, arroz	Contribuição de 30–50% do N da cana	Embrapa (2021)

Interações entre bioestimulantes e sistemas de produção

A resposta aos bioestimulantes depende do sistema de produção. Condições edafoclimáticas, estado nutricional da planta, manejo de irrigação, presença de patógenos, estágio fenológico, qualidade da água de pulverização e compatibilidade em calda podem ampliar ou reduzir os efeitos (QUEIROZ et al., 2024; ALTMANN, 2025). Essa dependência explica parte da variabilidade observada entre experimentos e entre propriedades.

A interação entre aminoácidos exógenos e fertilização nitrogenada merece atenção. Queiroz et al. (2024) observaram que os efeitos dos aminoácidos foram mais evidentes em situações de estresse nutricional moderado que em condições de fertilização adequada. Esse resultado indica que os produtos de-

vem ser usados como complementos em janelas de estresse ou em fases críticas do desenvolvimento, e não como substitutos diretos de fertilizantes.

Calvo et al. (2014) afirmam que bioestimulantes não substituem fertilizantes, mas podem contribuir para maior eficiência de uso de nutrientes. Essa distinção é essencial na recomendação técnica, pois evita expectativa de substituição integral de insumos. A recomendação deve considerar cultura, estágio, dose, via de aplicação, clima e condição nutricional.

A compatibilidade de bioestimulantes com defensivos e fertilizantes em calda também é relevante. Altmann (2025) relatou que formulações líquidas de aminoácidos apresentaram compatibilidade com fungicidas triazóis e estrobilurinas, mas podem ser sensíveis a formulações de pH extremo, que causam hidrólise ou desnaturação de peptídeos. Esse tema ainda demanda avaliação sistemática no Brasil.

CONCLUSÕES

Aminoácidos e bioestimulantes à base de bioinsumos constituem ferramentas complementares ao manejo fisiológico e nutricional das culturas. A literatura analisada indica efeitos sobre crescimento, enraizamento, atividade enzimática, absorção de nutrientes, tolerância a estresses e rendimento em algumas condições experimentais (DU JARDIN, 2015; CALVO et al., 2014; ALTMANN, 2025). Esses efeitos, contudo, dependem de formulação, dose, cultura, ambiente e condição fisiológica da planta.

O mercado brasileiro de bioestimulantes, estimado em USD 850 milhões em 2024, reflete a expansão dos bioinsumos e a maior demanda por tecnologias associadas à eficiência de uso de recursos. Portanto, bioestimulantes não substituem fertilizantes, irrigação, controle fitossanitário ou manejo adequado do solo. Eles podem complementar o sistema produtivo, principalmente em períodos de estresse ou em fases críticas de desenvolvimento. O avanço do setor no Brasil depende de pesquisa mecanística, ensaios multilocais, protocolos de dose-resposta, controle de qualidade e recomendações ajustadas a cultura, solo, clima e sistema de produção.

REFERÊNCIAS

- AJINOMOTO FERTILIZANTES. Aminoácidos na agricultura: crescimento de 50% da produção demanda novas tecnologias. Ajinomoto Brasil, nov. 2022.
- ALTMANN, T. Manejo de bioestimulante à base de aminoácidos e metabolismo do nitrogênio em milho. 2025. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2025.
- BHATTACHARYYA, P. N.; JHA, D. K. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 28, p. 1327–1350, 2012.
- CALVO, P.; NELSON, L.; KLOEPPER, J. W. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, v. 383, n. 1-2, p. 3–41, 2014.
- CASILLAS, V. J. C. et al. Análisis cuantitativo de la aplicación de cuatro bioestimulantes en el cultivo del rábano (*Raphanus sativus* L.). *Acta Agronomica*, v. 36, n. 32, p. 185–195, 1986.
- COLLA, G. et al. Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 28–38, 2015.
- DU JARDIN, P. Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, v. 196, p. 3–14, 2015.
- EDITORA PANTANAL. Bactérias promotoras de crescimento de plantas: conceitos e potencial de uso. Nova Xavantina: Editora Pantanal, 2022.
- EMBRAPA. Mecanismos das bactérias promotoras do crescimento de plantas. Embrapa, Documento 267, 2021.
- EMBRAPA MILHO E SORGO. Bioinsumos: tendência de crescimento no Brasil. Embrapa, dez. 2023.
- ESALQ/USP. Panorama dos bioinsumos no Brasil e no mundo. *Visão Agrícola*, n. 15, Piracicaba, 2019.
- ESALQ/USP. Regulação deve impulsionar comercialização de bioinsumos no país. *Visão Agrícola*, n. 15, Piracicaba, 2019.
- FAÇANHA, A. R. et al. Bioatividade de ácidos húmicos: efeito sobre o desenvolvimento radicular e sobre a bomba de prótons da membrana plasmática. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 9, p. 1301–1310, 2002.

- IMARC GROUP. Brazil biostimulants market size and forecast. IMARC, 2025.
- KLAHOLD, C. A. et al. Resposta da soja (*Glycine max* L. Merrill) à ação de bioestimulante. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 28, n. 2, p. 179–185, 2006.
- MAPA — MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. Brasília: MAPA, 2020.
- MORDOR INTELLIGENCE. Brazil biostimulants market. Hyderabad: Mordor Intelligence, 2024.
- NOZARI, R. M. Eficácia e segurança dos bioestimuladores à base de aminoácidos em alface. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) — PUC-RS, Porto Alegre, 2018.
- OLIVEIRA, N. T.; SOUSA, S. M. Bioestimulantes à base de substâncias húmicas e aminoácidos promovem o aumento do crescimento de plântulas de milho. *Saberes: Revista de Ciências e Tecnologia*, Sete Lagoas, n. 01, 2016.
- PESAGRO-RIO. Extrato de alga (*Ascophyllum nodosum*) no crescimento e produção de culturas olerícolas. *Pesagro-Rio*, 2020.
- QUEIROZ, D. A. et al. Uso de bioestimulantes à base de aminoácidos na agricultura. 2024. TCC (Bacharelado em Agronomia) — IF Goiano, Campus Iporá, 2024.
- RIBEIRO, F. C. Manejo de bioestimulante à base de aminoácidos e extrato de algas em trigo. 2024. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — UNESP, Botucatu, 2024.
- ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Editorial: biostimulants in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, 2020.
- SOLUSOLO. Bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR). solusolo.com.br, 2025.
- SYNGENTA/MAIS AGRO. Bioativador com *Ascophyllum nodosum*: mecanismos e benefícios. maisagro.syngenta.com.br, mar. 2026.
- UFSC/SIC. Efeito de *Pseudomonas fluorescens* como promotora de crescimento em milho. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, UFSC, 2024.
- USP/ESALQ. Bioestimulantes “hidrolisado de proteína” e “extrato de algas” podem modular o metabolismo de nitrogênio em soja? Repositório USP, Piracicaba, 2021.

SOBRE AS AUTORAS E OS AUTORES

Alane Oliveira da Silva

Engenheira Agrônoma, Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/8180734684267749>

Antonio Carlos Inforçato Rodrigues

Estudante de Agronomia - Esalq/USP, Piracicaba-SP

Antônio Elison da Silva

Mestrado em Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal UENF, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/0229982210513354>

Alasse Oliveira da Silva

Mestre e doutorando em Fitotecnia Esalq/USP, Piracicaba-SP.

<http://lattes.cnpq.br/2723161231656669>

Daniele Soares Barroso

Doutorado em Zootecnia, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, UESB, Brasil., UESB, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/7416982649730110>

Damiana Roberta dos Santos Alvelino

Graduação em andamento em Engenharia Agrônoma, Universidade de São Paulo, USP, Brasil.

<http://lattes.cnpq.br/0170060015725846>

Daví Eduardo Furno Feliciano

Bacharelado em Engenharia Agrônoma (Unesp, FCA-Botucatu).

<http://lattes.cnpq.br/1056840704973257>

Dimas Luiz da Silva Cappovila

Engenheiro Ambiental e especialista em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas, Esalq/USP.

<http://lattes.cnpq.br/9861760041333722>

Dioclea Almeida Seabra Silva

Universidade Federal Rural da Amazônia, Departamento de Agronomia, Capanema-PA

<http://lattes.cnpq.br/8554224619653187>

Eduardo Guimarães Bonatti

Engenheiro agrônomo - Esalq/USP, Piracicaba-SP

<https://lattes.cnpq.br/6077526678317690>

Felipe Valadares Ribeiro Avelar
Mestre e Doutorando em Fitotecnia - UFV/Viçosa
<http://lattes.cnpq.br/3744678012524180>

Harleson Sidney Almeida Monteiro
Mestre em Agronomia (Horticultura) - UNESP
<http://lattes.cnpq.br/2967586299102545>

Iracema Alves Manoel Degaspari
Engenheira Agrônoma e Doutora em Agricultura Tropical e Subtropical pelo
Instituto Agronômico de Campinas, Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/8919285183123738>

Jéssica Tomé da Silva
Engenheira Agrônoma Esalq/USP, Piracicaba-SP

Jhonatah Albuquerque Gomes
Mestre e doutorando em Fitotecnia Esalq/USP, Piracicaba-SP.
<https://orcid.org/009679235962674562345782348>

Karen Nascimento Campos
Estudante de Agronomia - Esalq/USP, Piracicaba-SP

Laís Viana Bruneli
Graduada em Agronomia. Mestra e doutoranda em Fitotecnia - Esalq/USP.

Leonardo De Cillo Duarte Novaes
Graduação em andamento em Engenharia Agrônoma, Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/4483525456743372>

Lorrany Silva Moraes Amoras
Universidade Federal Rural da Amazônia, Departamento de Agronomia, Belém-
PA <http://lattes.cnpq.br/587230871948572039>

Lívia Vitória Das Neves Silva
Engenheira Agrônoma, Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/4111642381714782>

Maurício Felipe Silva
Graduado em Agronomia. Especialista em Solos e Nutrição de Plantas - SolloAgro
Esalq/USP.
<http://lattes.cnpq.br/6199124143030511>

Maria Luiza de Sateles Bueno
Engenheira Agrônoma Esalq/USP, Piracicaba-SP

Maila Pereira de Almeida
Doutoranda em engenharia de sistemas agrícolas Esalq/USP
<http://lattes.cnpq.br/8563497633674034>

Mário Jorge Amoras Alves Filho
Universidade Federal Rural da Amazônia, Departamento de Agronomia
<http://lattes.cnpq.br/8032566574191339>

Natanael Lucena Ferreira
Mestrando em Fitotecnia Esalq/USP, Piracicaba-SP <http://lattes.cnpq.br/8425857250719845>

Pedro Vinicius Nogueira de Oliveira
Graduação em andamento em Engenharia Agrônômica, Universidade de São Paulo, USP.
<https://lattes.cnpq.br/9380491612226968>

Raimundo Amaro Ribeiro Conde
Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/3420664084998014>

Renata da Silva Arruda
Mestrado em Agronomia (Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
<http://lattes.cnpq.br/6071416630152383>

Sabrina Yumi Odate de Carvalho
Engenharia Agrônômica (UFSCar).
<http://lattes.cnpq.br/7804710968005272>

Sinara de Nazaré Santana Brito
Mestra em Agronomia (Horticultura) - UNESP
<http://lattes.cnpq.br/7167428610788027>

Tamiris Alves Dos Santos
Zootecnista pela Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD
<http://lattes.cnpq.br/5344360933394819>

Vitor Henrique Gonçalves Lopes
Mestrado em andamento em Agricultura - Produção e tecnologia de sementes, UNESP - FCA, Brasil.
<http://lattes.cnpq.br/8235633877643737>

Bioinsumos na Agricultura

Fundamentos, aplicações e perspectivas
para a produção sustentável no Brasil



Organizadores

Alasse Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva

