

USO DE BIOFERTILIZANTES COMO PRÁTICA AGRÍCOLA VISANDO AUMENTAR A RESILIÊNCIA E A ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA EM SISTEMAS DE AGRICULTURA FAMILIAR: UMA ANÁLISE BASEADA NA CIÊNCIA, NAS POLÍTICAS PÚBLICAS BRASILEIRAS E NO MARCO DO IPCC PARA JUSTIÇA CLIMÁTICA E TRANSIÇÃO JUSTA

USE OF BIOFERTILIZERS AS AN AGRICULTURAL PRACTICE AIMED AT INCREASING RESILIENCE AND CLIMATE ADAPTATION IN FAMILY FARMING SYSTEMS: AN ANALYSIS BASED ON SCIENCE, BRAZILIAN PUBLIC POLICIES, AND THE IPCC FRAMEWORK FOR CLIMATE JUSTICE AND JUST TRANSITION

USO DE BIOFERTILIZANTES COMO PRÁCTICA AGRÍCOLA PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA Y LA ADAPTACIÓN CLIMÁTICA EN SISTEMAS AGRÍCOLAS FAMILIARES: UN ANÁLISIS BASADO EN LA CIENCIA, LAS POLÍTICAS PÚBLICAS BRASILEÑAS Y EL MARCO DEL IPCC PARA LA JUSTICIA CLIMÁTICA Y LA TRANSICIÓN JUSTA

Mariana Rodrigues Fontenelle

Doutora em Microbiologia Agrícola

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Brazil

E-mail: mariana.fontenelle@embrapa.br

Catharine Abreu Bomfim

Doutora em Biologia Microbiana

Instituição: IPMP Bioinsumos LTDA

Endereço: Brasília, Brazil

E-mail: catharineabreu@gmail.com

Orcid: 0000-0002-0896-8062

Lucimeire Pilon

Doutora em Ciências

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Brazil

E-mail: lucimeire.pilon@embrapa.br

Orcid: 0000-0002-0896-8062

Francisco Vilela Resende

Doutor em Ciência de Cultivos

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Brazil

E-mail: francisco.resende@embrapa.br

Orcid: 0000-0002-6354-4828

Daniel Basílio Zandonadi

Doutor em Ciências Biológicas e Tecnologia
Instituição: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Endereço: Rio de Janeiro, Brazil
E-mail: danielzandonadi@gmail.com

Orcid: 0000-0003-3347-4600

Ivan Medeiros Lustosa Júnior

Doutor em Ciências Florestais
Instituição: Universidade de Brasília

Endereço: Brasília, Brazil
E-mail: ilvan.junior@ifb.edu.br

Orcid: 0000-0002-3873-737X

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Brazil.
E-mail: carlos.pacheco-lima@embrapa.br
Orcid: 0000-0002-6975-8560

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão sistemática de literatura que aborde o tema uso de biofertilizantes na agricultura familiar como estratégia de aumento da resiliência e adaptação climática, sua relação com políticas públicas brasileiras e com os referenciais do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas de justiça climática e transição justa. Para tal, foi utilizado o método PRISMA, estado da arte para trabalhos que visam revisar sistematicamente a literatura sobre um determinado tema, e um estudo de caso sobre o biofertilizante não comercial Hortbio®. Foi possível constatar a necessidade de migração do modelo convencional de se produzir alimentos para a agricultura regenerativa, incluindo o uso de bioinsumos como estratégia. Os bioinsumos apresentam em sua composição uma série de microrganismos capazes de produzir compostos semelhantes a hormônios promotores de crescimento vegetal que são capazes de aumentar a tolerância dos cultivos agrícolas a estresses abióticos. O Hortbio® se enquadra nesse contexto, com grande diversidade microbiana, produção de auxina e capacidade comprovada de aumentar a tolerância ao calor em alface. Sua fórmula aberta e seu caráter não comercial o potencializam como solução que atende aos referenciais de justiça climática e transição justa do IPCC.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Emergência Climática. Bioinsumos. Referenciais do IPCC. Políticas Públicas Nacionais Brasileiras. Hortbio®.

ABSTRACT

The objective of this study is to present a systematic review of the literature addressing the use of biofertilizers in family farming as a strategy for increasing resilience and climate adaptation, its relationship with Brazilian public policies, and with the Intergovernmental Panel on Climate Change's benchmarks for climate justice and just transition. To this end, the PRISMA method was used, which is state of the art for studies that aim to systematically review the literature on a given topic, and a case study on the non-commercial biofertilizer Hortbio®. It was possible to verify the need to migrate from the conventional model of food production to regenerative agriculture, including the use of bio-inputs as a strategy. Bio-inputs contain a series of microorganisms capable of producing compounds similar to plant growth-promoting hormones that can increase the tolerance of agricultural crops to abiotic

stresses. Hortbio® fits into this context, with great microbial diversity, auxin production, and proven ability to increase heat tolerance in lettuce. Its open formula and non-commercial nature make it a potential solution that meets the IPCC's climate justice and just transition frameworks.

Keywords: Climate Change. Climate Emergency. Bio-Inputs. IPCC referential. Brazilian National Public Policies. Hortbio®.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de biofertilizantes en la agricultura familiar como estrategia para aumentar la resiliencia y la adaptación climática, su relación con las políticas públicas brasileñas y el marco del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para la justicia climática y la transición justa. Para ello, se empleó el método PRISMA, un método de vanguardia para la revisión sistemática de la literatura sobre un tema específico, así como un estudio de caso sobre el biofertilizante no comercial Hortbio®. El estudio demostró la necesidad de cambiar del modelo convencional de producción de alimentos a la agricultura regenerativa, incluyendo el uso de bioinsumos como estrategia. Los bioinsumos contienen una serie de microorganismos capaces de producir compuestos similares a hormonas que promueven el crecimiento vegetal y aumentan la tolerancia de los cultivos a estreses abióticos. Hortbio® se enmarca en este contexto, con una importante diversidad microbiana, producción de auxinas y una capacidad demostrada para aumentar la tolerancia al calor en la lechuga. Su fórmula abierta y su naturaleza no comercial lo convierten en una solución potencial que cumple con los criterios de justicia climática y transición justa del IPCC.

Palabras clave: Cambio Climático. Emergencia Climática. Bioinsumos. Referencias del IPCC. Políticas Públicas Nacionales Brasileñas. Hortbio®.

1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas são, sem dúvida, a principal causa do aquecimento global (GW) observado nas últimas décadas. Esse aumento na temperatura média do ar se deve principalmente ao aumento das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (GEEs) observados desde a revolução industrial (IPCC, 2023). O aumento da temperatura média global (GAT) observado entre 2011 e 2020, quando comparado ao período de 1850 a 1900 (pré-industrial), foi de 1,1 °C (IPCC, 2023). Vale lembrar que o limite estabelecido pelo Acordo de Paris foi de 1,5 °C (IPCC, 2018), com vistas a evitar um colapso do sistema climático. No entanto, 2024 foi o primeiro ano a ultrapassar este limite inicial, atingindo 1,6 °C (Copernicus, 2025a), suscitando preocupações quanto a uma possível perda desta janela de oportunidade. Janeiro de 2025 foi o mês mais quente já registrado até o momento, com temperaturas 1,75°C acima da temperatura média registrada no período pré-industrial (Copernicus, 2025b).

Há uma grande confiança de que a temperatura média global desde 1970 aumentou mais rápido do que em qualquer período anterior de 50 anos nos últimos 2000 anos. Existe inequivocamente uma forte relação entre o aumento das concentrações atmosféricas de GEE e as atividades humanas, com as concentrações atmosféricas de CO₂ a atingirem um pico de 410 ppm em 2019, existindo uma elevada confiança de que este valor é superior a qualquer outro observado nos últimos 2 milhões de anos. Os níveis de CH₄ e N₂O, por sua vez, atingiram valores de 1866 ppb e 332 ppb no mesmo ano, que representam, com um nível de confiança muito alto, valores superiores aos observados nos últimos 800.000 anos (IPCC, 2021).

Dentre os impactos projetados das Mudanças Climáticas Globais (GCM), muitos decorrem da ocorrência de fenômenos extremos generalizados em ecossistemas, pessoas, populações e infraestrutura, e sua frequência e intensidade têm aumentado ao longo das últimas décadas, como ondas de calor em terra e nos oceanos, chuvas intensas, secas e incêndios, ficando cada vez mais claro que a origem desse aumento pode ser atribuída à ação humana (IPCC, 2021).

O IPCC (2021) também mostra que o GCC reduziu a segurança alimentar e hídrica, dificultando os esforços para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A produtividade agrícola global, por exemplo, desacelerou nos últimos 50 anos em todo o mundo, dificultando ações como o combate à fome. A concentração dos impactos negativos do GCC tem sido observada principalmente em baixas e médias latitudes, expondo milhões de pessoas à insegurança alimentar, nutricional e hídrica, com os maiores impactos observados em regiões da Ásia, África, América Central e América do Sul. A perda de potencial produtivo associada ao declínio da diversidade alimentar aumentou a desnutrição em comunidades como os povos indígenas, bem como

os pequenos produtores de alimentos e suas famílias de baixa renda, afetando principalmente crianças, idosos e mulheres grávidas. Cerca de metade da população mundial já experimenta grave escassez de água em pelo menos parte do ano, dificultando sua própria sobrevivência e produção de alimentos. Obviamente, prejuízos econômicos decorrentes das atividades agrícolas também têm sido observados nessas regiões (IPCC, 2023).

Este artigo tem como objetivo analisar o papel dos biofertilizantes como prática agrícola para a construção de sistemas de agricultura familiar resilientes e adaptados às mudanças climáticas com base em uma revisão sistemática da literatura e um estudo de caso do biofertilizante Hortbio®. Também visa convencer os formuladores e implementadores de políticas públicas brasileiras da importância de investir nessa área.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

O objetivo da revisão sistemática da literatura foi destacar os impactos do GCC na agricultura familiar brasileira, a necessidade de aumentar a resiliência e a adaptação climática, e descrever a agricultura regenerativa como estratégia nesse cenário, com foco no uso de bioinsumos e com base em um estudo de caso do biofertilizante Hortbio®. Para tanto, foram seguidos os princípios estabelecidos pelo protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantir transparência, reprodutibilidade e rigor técnico e científico.

2.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram utilizados apenas artigos científicos publicados em periódicos indexados, documentos oficiais do governo federal brasileiro e materiais técnicos e científicos produzidos pela Embrapa. Procurou-se restringir o período a um máximo de 10 anos para manter o estado da arte sobre o tema. Algumas exceções foram feitas a materiais clássicos relacionados ao tópico que foram amplamente citados.

2.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA

A busca foi realizada no Portal de Periódicos da Capes e complementada com consultas no Perplexity.ai, uma ferramenta generativa de inteligência artificial que fornece referências bibliográficas de periódicos indexados e revisados por pares. Para garantir a eficiência da pesquisa, foram aplicadas técnicas de engenharia e encadeamento de prompts para estruturar as consultas com instruções claras e termos de indexação específicos. Os termos de indexação incluíram: mudanças

climáticas globais, agricultura resiliente, adaptação da agricultura às mudanças climáticas, sistemas agrícolas regenerativos, sistemas agrícolas conservacionistas, sistemas agrícolas sustentáveis, agricultura familiar, impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira, justiça climática, transição justa, baixo carbono e adaptação políticas públicas brasileiras, bioinsumos como estratégia de adaptação, bioinsumos para controle do estresse abiótico, Hortbio®, entre outros. Todas as referências recuperadas por meio da ferramenta de IA foram posteriormente verificadas quanto à precisão, rastreabilidade (DOI ou link) e conformidade com os critérios de revisão por pares antes da inclusão na análise.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA

3.1 A IMPORTÂNCIA DA AGRICULTURA E A NECESSIDADE DE TRANSIÇÃO PARA SISTEMAS SUSTENTÁVEIS E RESILIENTES

Nas últimas décadas, foram observados aumentos incríveis na produtividade agrícola. Embora a população mundial tenha dobrado durante esse período, a produção de cereais, por exemplo, triplicou, usando apenas 30% mais terra do que no passado. Isso reflete o papel fundamental da ciência, tecnologia e inovação no setor, que resultou no que então foi chamado de Revolução Verde. A agricultura moderna, após a revolução verde, tem sido essencial para fornecer alimentos para uma população em constante expansão, garantindo a segurança alimentar e nutricional para uma parcela significativa da população mundial. No entanto, sua dependência de processos como alta renovação do solo, alto uso de insumos químicos e alto consumo de água para irrigação tem causado vários problemas, incluindo a degradação ambiental (Pingali, 2012).

Pingali (2012) também aponta que, embora tenham trazido importantes impactos sociais positivos, como a redução da pobreza com a queda dos preços reais dos alimentos, o aumento da disponibilidade calórica e a melhoria do consumo de proteínas, resultando em menores níveis de desnutrição, impactos negativos como a persistência das desigualdades sociais nas áreas rurais e a limitada diversificação alimentar também resultaram desse processo. Além disso, embora tenha economizado terras e florestas devido ao aumento da produtividade, impactos ambientais negativos, como degradação do solo, contaminação dos recursos hídricos por insumos químicos e uso excessivo desses recursos hídricos, também foram observados como impactos ambientais negativos. Destacam-se também as emissões de gases de efeito estufa dos sistemas agrícolas e a necessidade de mitigá-las, bem como a influência desses sistemas na perda de biodiversidade. (Sela et al., 2024).

Zhang et al. (2018) analisaram as tendências globais de pesquisa sobre os impactos ambientais dos insumos químicos na agricultura em três períodos diferentes (1990-1999; 2000-2007; 2008-2016).

Os autores apontam que os principais contaminantes da agricultura são pesticidas e fertilizantes, que afetam principalmente o solo, a água e o ar. De modo geral, o uso intensivo de fertilizantes e agrotóxicos está ligado a altas taxas de contaminação ambiental devido à sua baixa eficiência de uso, destacando-se a contribuição de metais pesados, nitratos e compostos orgânicos persistentes. Há também uma preocupação crescente com a transferência desses contaminantes ao longo das cadeias alimentares, afetando animais e a saúde humana, o que pode resultar em distúrbios graves em humanos, como câncer e desregulação endócrina, entre outros problemas crônicos. Dentre os impactos ambientais, destacam-se o potencial de acidificação e degradação do solo, eutrofização de corpos hídricos superficiais e subterrâneos, acúmulo de metais pesados e resíduos orgânicos persistentes e poluição do ar. Esses impactos resultam de processos como lixiviação, escoamento superficial e perdas por volatilização, entre outros. Nos últimos anos, tem-se verificado uma tendência de intensificação da monitorização e avaliação do risco ambiental, bem como a substituição de sistemas de produção convencionais por outros mais sustentáveis. Os autores ressaltam ainda que a integração da pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) com as políticas públicas é essencial para mudar esse cenário preocupante.

É, por isso, necessária uma mudança de paradigma, onde sistemas mais sustentáveis, resilientes e regenerativos se tornem centrais para a produção agrícola. Práticas como fertilização orgânica, plantio direto, rotação de culturas, cobertura do solo, manejo integrado de pragas e doenças, irrigação e fertilização otimizada são essenciais para a restauração do solo, recuperação da biodiversidade e mitigação da poluição e das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Em um estudo de caso na Índia, a aplicação de um método quantitativo multicritério chamado Processo de Hierarquia Analítica recomendou o uso de práticas como cobertura do solo, gerenciamento de resíduos e irrigação de precisão como prioridades para uma região de clima semiárido. Embora a necessidade de adoção de práticas regenerativas tenha sido tecnicamente comprovada, a falta de políticas públicas ainda é um obstáculo para a transição dos sistemas convencionais para os sistemas recomendados. Fica claro, portanto, que práticas e sistemas regenerativos são fundamentais para reduzir os impactos ambientais dos sistemas agrícolas, mas isso requer abandonar apenas a lógica dos resultados de curto prazo e considerar os resultados de médio e longo prazo (Sela et al., 2024).

Também é preciso lembrar que estamos vivendo um momento delicado, onde as mudanças climáticas globais (GCC) têm grande potencial de prejudicar as atividades agrícolas. A agricultura contribui para esse fenômeno ao emitir gases de efeito estufa (GEE), mas pode atuar como um sumidouro desses gases quando gerenciada de forma regenerativa (Li et al., 2024). Assad & Assad (2024) destacam que o aumento das temperaturas médias e da variabilidade das chuvas já é observado

e processos evidentes, com tendências claras de maior frequência e intensidade de eventos como secas, ondas de calor, chuvas e desastres naturais. Eles também apontam que as plantas com ciclo fotossintético C3 são mais suscetíveis aos efeitos do aumento das temperaturas e da escassez de água do que as plantas C4. Exemplos de plantas C3 incluem arroz, feijão, café e a maioria dos vegetais, enquanto as plantas C4 incluem milho e cana-de-açúcar. Muitas dessas culturas também são utilizadas por fazendas familiares, por isso é importante que seus sistemas de produção se tornem mais resilientes e adaptados às novas condições climáticas. Fenômenos como o aumento das temperaturas, associado à redução dos níveis de precipitação e ao aumento da evapotranspiração, ameaçam a segurança alimentar e nutricional no Brasil, onde aproximadamente 70% dos alimentos consumidos pelos brasileiros são provenientes da agricultura familiar (IBGE, 2017). Portanto, é essencial identificar práticas que possam potencialmente aumentar a resiliência e a adaptação climática para a agricultura familiar brasileira.

3.2 A AGRICULTURA FAMILIAR E SEUS DESAFIOS DIANTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

No Brasil, o termo agricultura familiar é definido pela Lei 11.326/2006, referindo-se às atividades rurais realizadas em uma pequena área de terra e administradas pelo produtor e seus familiares, utilizando predominantemente mão de obra própria e obtendo pelo menos 50% da renda familiar das atividades agrícolas do estabelecimento. Esse conceito é amplo, englobando agricultores, extrativistas, aquicultores, silvicultores, pescadores artesanais, povos indígenas, quilombolas e outras comunidades tradicionais.

A agricultura familiar brasileira está entre as atividades econômicas mais vulneráveis às mudanças climáticas, pois enfrenta constantemente dificuldades de acesso ao crédito, sucateamento de estruturas de extensão rural, infraestrutura menos preparada e maior dificuldade de acesso a resultados científicos e tecnológicos. A concentração do uso de recursos hídricos por grandes atividades econômicas impacta diretamente esse setor, especialmente em regiões que já enfrentam escassez hídrica, como o semiárido brasileiro. Além disso, a baixa capacidade de captação de recursos financeiros, a baixa renda e outras limitações socioeconômicas têm levado ao uso de sistemas de produção muitas vezes inadequados, resultando no esgotamento dos recursos naturais, erosão do solo, perda de biodiversidade, êxodo rural (principalmente da população mais jovem), insegurança alimentar e, consequentemente, aumento das desigualdades sociais (CONTAG & Observatório do Clima, 2025).

A Tabela 1 resume os principais impactos projetados pelo GCC em diferentes regiões brasileiras, com base em publicações cujos estudos originais utilizaram modelos climáticos de última geração.

Tabela 1. Resumo das mudanças climáticas esperadas por regiões brasileiras e potencial efeito na agricultura familiar

Região	Impacto principal	Efeito potencial na agricultura familiar
Brasil	Aumento generalizado das temperaturas em todas as regiões e aumento da frequência e intensidade de chuvas extremas e eventos de seca.	Danos à infraestrutura de produção, logística e armazenamento, necessidade de uso de práticas como cultivo protegido, conservação e reúso de água, perda de fertilidade do solo devido à erosão, aumento de doenças e pragas, perda de qualidade dos alimentos, aumento dos custos de produção, dependência da irrigação. Maiores riscos devem ser observados para os agricultores familiares, pois eles têm mais dificuldade de acesso a novos mercados e linhas de crédito, aumentando a insegurança hídrica, alimentar e nutricional. É provável que resulte em maior desigualdade social. Menos adequado para culturas dependentes de clima ameno e frio.
Setentrional	Secas mais intensas, frequentes e prolongadas, temperaturas potencialmente acima de 4°C até 2050, aumento da ocorrência de incêndios florestais e intensificação do estresse hídrico.	Declínio nos índices de produtividade, migração de lavouras para áreas mais adequadas, perdas relacionadas ao extrativismo, insegurança alimentar e nutricional, menor renda e aumento das desigualdades sociais. Maior dependência da agricultura irrigada. Aumento da necessidade de práticas capazes de reduzir a temperatura no microclima crescente. Menos adequado para culturas dependentes de clima ameno e frio.
Do sudeste	Maior frequência e intensidade de eventos extremos de chuva,	Danos à infraestrutura de produção, logística e armazenamento, necessidade de

	causando inundações, deslizamentos de terra e riscos a estruturas como barragens, aumento de ondas de calor e períodos secos potencialmente mais intensos e duradouros.	utilização de práticas como cultivo protegido, conservação e reúso de água, perda de fertilidade do solo devido à lixiviação e, principalmente, escoamento superficial e erosão hídrica, aumento de doenças e pragas, levando à perda de produtividade e qualidade dos alimentos e aumento dos custos de produção. Aumento da necessidade de práticas capazes de reduzir a temperatura no microclima crescente. Menos adequado para culturas dependentes de clima ameno e frio.
Nordestino	Redução dos níveis de precipitação, aumento da intensidade, duração e frequência dos eventos de seca, tendência à desertificação de parte do semiárido atual, aumento acentuado da temperatura.	Perdas de produtividade devido ao estresse hídrico, menos adequado para culturas dependentes de clima ameno e frio, dependência da agricultura irrigada, necessidade de utilização de práticas como conservação, reserva e reúso de água. Aumento da necessidade de práticas capazes de reduzir a temperatura no microclima crescente. O uso de práticas que reduzam significativamente a necessidade de água de irrigação, como o cultivo sem solo, é desejável.
Austral	Tendência de aumento de eventos extremos de chuva, causando inundações e deslizamentos de terra, mudanças no calendário climático, como atrasos no início da estação chuvosa, precipitação concentrada em curtos períodos de tempo, probabilidade de aumento de geadas em altitudes mais elevadas.	Danos à infraestrutura de produção, logística e armazenamento, necessidade de utilização de práticas como cultivo protegido, necessidade de utilização de infraestrutura de regulação do fluxo de água, perda de fertilidade do solo devido à lixiviação e, principalmente, escoamento superficial e erosão hídrica, aumento de doenças e pragas, levando à perda de produtividade e qualidade dos alimentos e aumento dos custos de produção.

	Possível alternância entre períodos intensamente chuvosos e intensamente secos.	
Midwest	<p>Aumento significativo das temperaturas médias e máximas anuais, que podem ultrapassar os 4,5°C até ao final do século. Maior intensidade, duração e frequência das ondas de calor. Tendência para uma redução na precipitação média anual, que, combinada com o aumento da temperatura, deve levar ao aumento da evapotranspiração, apesar da considerável incerteza que ainda existe entre as projeções do modelo atual. Eventos de chuva mais concentrados e irregulares, aumento da intensidade, duração e frequência dos eventos de seca. Eventos de chuva concentrada podem levar a extremos hidrológicos, resultando em inundações e aumento da erosão. Aumento da ocorrência de incêndios florestais cada vez mais intensos. Aumento da ocorrência</p>	<p>Perdas de produtividade, sobrecarga de estresse devido ao déficit e excesso hídrico, maiores perdas relacionadas a altas temperaturas, especialmente para culturas mais adequadas a climas frios e amenos, necessidade de práticas agrícolas mais adaptadas, aumento da insegurança alimentar, nutricional e hídrica, necessidade de utilização de práticas como reúso de efluentes tratados, conservação de água e solo e armazenamento de água, maior dependência da agricultura irrigada, maiores custos de produção, maiores gastos com o controle de incêndios florestais e aumento da desigualdade social.</p>

	de ventos fortes causando danos à infraestrutura agrícola e erosão eólica.	
--	---	--

Fonte: Os autores se baseiam em artigos de Ballarin et al. (2023), Flores et al. (2024), Kahana et al. (2024) e Marques et al. (2024).

Embora muitas das ações de adaptação climática apresentadas na Tabela 1 não correspondam a práticas regenerativas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, bem como as políticas públicas brasileiras, como o Plano de Agricultura de Baixo Carbono e Adaptação às Mudanças Climáticas (Plano ABC+), preconizam a adaptação baseada em co-benefícios (capazes de promover mitigação e adaptação ao mesmo tempo) e estratégias baseadas na natureza como as preferidas. A agricultura regenerativa se insere nesse contexto, sendo importante contextualizá-la, estudar e discutir as práticas agrícolas que adota.

3.3 AGRICULTURA FAMILIAR REGENERATIVA COMO PARTE DA SOLUÇÃO

O Projeto de Lei nº 1787 de 2025, atualmente em debate no Senado brasileiro, visa estabelecer uma Política Nacional de Fomento à Agricultura Regenerativa (PNFAR), com o objetivo de promover a adoção, o desenvolvimento e a coordenação de práticas, conhecimentos e tecnologias voltadas para a regeneração ativa de ecossistemas agrícolas, resiliência climática e segurança alimentar e nutricional.

No artigo 2º, o Projeto de Lei estabelece que o PNFAR será regido pelos seguintes princípios: respeito aos ciclos ecológicos e à capacidade evolutiva dos sistemas vivos; promoção da diversidade biológica, funcional e cultural dos agroecossistemas; integração de conhecimentos científicos, tradicionais e práticos na gestão do solo e da paisagem; reconhecimento da multifuncionalidade da agricultura e da diversidade dos atores sociais no terreno; promoção da autonomia produtiva e inovação contínua nas zonas rurais; e valorização da regeneração como um processo ativo de restauração ecológica e social.

Por sua vez, no artigo 3º, a minuta apresenta o conceito de agricultura regenerativa como uma *"abordagem sistêmica do manejo agrícola que visa regenerar a saúde do solo, da água, da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e das relações socioeconômicas que sustentam os agroecossistemas, integrando práticas de base ecológica, culturalmente contextualizadas e adaptativas"*. As práticas regenerativas são entendidas como um *"conjunto aberto de técnicas e processos, reconhecidos pela ciência ou por sistemas de validação participativa, que promovem resultados verificáveis de regeneração, como cobertura permanente do solo, adubação verde, rotação*

e consórcio de culturas, integração lavoura-pecuária-floresta, manejo agroflorestal, uso de bioinsumos, policultura e recuperação de áreas degradadas".

Percebe-se, portanto, que o uso de bioinsumos é uma das práticas recomendadas quando se utiliza a agricultura regenerativa, que, por sua vez, tem entre seus objetivos, aumentar a resiliência e a adaptação climática. Essa visão fica ainda mais evidente quando se analisa o Plano ABC+, que incentiva a adoção de sistemas, práticas, produtos e processos de produção agrícola sustentável, também conhecido pela sigla SPSABC. Entre as diversas alternativas para alcançar uma agricultura sustentável, resiliente e adaptada está o uso de bioinsumos, reconhecidos por seu potencial para mitigar as emissões atmosféricas de gases de efeito estufa e aumentar a resiliência e adaptação climática devido ao seu potencial para mitigar os efeitos de estresses abióticos, como será detalhado no próximo tópico.

O uso de bioinsumos também é incentivado por diversas outras políticas públicas brasileiras, como a Política Nacional sobre Mudança do Clima, o Plano Nacional de Adaptação, as Contribuições Não Determinadas, a Política Nacional de Agricultura Orgânica e Agroecologia, o Programa Nacional de Bioinsumos e o Programa Nacional de Agricultura Urbana e Periurbana. Também está relacionado à agenda internacional sobre sustentabilidade e mudanças climáticas, como a Agenda 2030 e os relatórios do IPCC, e está alinhado com pelo menos ODS 2, ODS 3, ODS 6, ODS 11, ODS 12, ODS 13 e ODS 15.

3.4 BIOFERTILIZANTES COMO PRODUTOS ESSENCIAIS PARA AUMENTAR A RESILIÊNCIA E A ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A demanda por biofertilizantes vem crescendo nos últimos anos. A razão para isso, além de seus benefícios agrônômicos, é que esses produtos são vistos como fundamentais para questões emergentes como GCC, sustentabilidade e saúde única. Eles podem reduzir os efeitos negativos do uso de fertilizantes sintéticos e melhorar a saúde do solo e as condições ambientais. Como resultado, houve um aumento nas políticas públicas que se concentram em incentivos e regulamentações para expandir sua adoção (Kurniawati et al., 2023).

Embora os biofertilizantes sejam frequentemente referidos como produtos iguais, existem diferenças significativas entre eles, cada um cumprindo funções específicas. Bouhzam et al. (2025), avaliando os impactos ambientais de diferentes biofertilizantes, compostos orgânicos e bioestimulantes utilizados na Europa por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), concluíram que a transição para uma economia circular utilizando biofertilizantes depende de escolhas racionais e situações específicas, especialmente em relação ao nutriente alvo, devido à grande variação em seus conteúdos. Os produtos ainda diferem em termos de impacto ambiental e eficiência, e deve ser dada prioridade

àqueles que têm um impacto baixo e um alto efeito na produtividade agrícola. Situação semelhante foi demonstrada por Cajamarca et al. (2019a), que, analisando a composição química, o potencial agrônômico e o teor de metais pesados dos resíduos agroindustriais utilizados na fabricação de biofertilizantes, encontraram alta variabilidade na composição com impacto direto no potencial de fertilização e impacto ambiental causado pela potencial contaminação por metais pesados. Um dos pontos-chave para a ampla adoção de biofertilizantes, portanto, é uma padronização mínima desses produtos para que os produtores rurais possam ter a garantia de manter a produtividade independentemente do lote de material biológico utilizado.

Os biofertilizantes não só podem atender às necessidades nutricionais das culturas agrícolas, mas também são importantes para aumentar a resiliência e a adaptação ao clima. Muitos estudos têm apontado para o potencial desses produtos para cumprir essas funções. Isso ocorre principalmente devido à presença de microrganismos promotores de crescimento vegetal (PGPM) (Bomfim et al., 2024), que podem produzir compostos semelhantes aos que atuam em diversos processos de desenvolvimento vegetal, aumentando a tolerância das plantas a estresses abióticos, como as auxinas (IAA) (Santos et al., 2020). Os IAA são reconhecidos como participantes de vários processos ligados ao desenvolvimento das plantas, como enraizamento, dominância apical, crescimento das plantas, geotropismo, fototropismo e desenvolvimento dos frutos (Alatzas, 2013).

Os biofertilizantes à base de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) têm mostrado potencial para mitigar os efeitos negativos das altas temperaturas nas lavouras de soja, melhorando seu desenvolvimento e produtividade (Junrami et al., 2022). Os autores apontam mecanismos como melhora da capacidade de absorção de nutrientes, otimização de processos fotossintéticos, melhora do ajuste osmótico, promoção de atividade antioxidante superior e melhora da capacidade reprodutiva como as razões para esses resultados. Biofertilizantes com outras classes de microrganismos em sua composição, como rizobactérias promotoras de crescimento de plantas e microrganismos endofíticos, por exemplo, também têm mostrado potencial para mitigar os efeitos adversos de estresses abióticos, sendo, portanto, uma importante estratégia de adaptação a eventos ambientais extremos. Tang et al. (2022) reconheceram o papel dos FMA como desempenhando um papel crítico no aumento da tolerância das culturas a estresses abióticos, como seca, salinidade, deficiência de nutrientes e calor. Esses autores destacam que os FMAs estabelecem relações simbióticas com as raízes de mais de 80% das plantas terrestres, tornando-as extremamente importantes na composição dos biofertilizantes. Eles concordam com os mecanismos citados por Junrami et al. (2022) e citam os seguintes compostos como responsáveis pela regulação hormonal, influenciados por microrganismos: ácido abscísico, auxinas,

giberelinas, jasmonatos e estrigolactonas, que atuam na promoção da tolerância ao estresse, ajustando o crescimento radicular e o fechamento estomático.

No entanto, o papel no aumento da tolerância ao estresse abiótico em plantas cultivadas não se restringe aos FMAs. Outros microrganismos endofíticos, como as rizobactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR), também desempenham um papel central. Entre os mecanismos de ação que promovem esse aumento da tolerância estão a colonização e as relações simbióticas, a regulação hormonal e a liberação de fitoquímicos, a atividade antioxidante, a homeostase iônica e a regulação do balanço hídrico, a expressão gênica e a sinalização molecular, a fitoproteção e o biocontrole e a fitorremediação. Os autores também concluem que os microrganismos endofíticos são essenciais para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis baseadas em biotecnologia destinadas a aumentar a resiliência das culturas agrícolas sob diferentes condições de estresse ambiental, incluindo aquelas relacionadas ao GCC. Pérez-Bernal et al. (2025), ao avaliarem a combinação de biofertilizantes compostos por FMA e PGPR com sistemas de produção consorciados, observaram melhorias na produtividade e aumento da eficiência do uso da terra, mostrando-se estratégicos para a agricultura sustentável em áreas com restrições de insumos hídricos e minerais, resultando em benefícios agrônômicos e ambientais.

A estratégia de adaptação da agricultura brasileira às mudanças climáticas é baseada em ações estruturais envolvendo PD&I, assistência técnica rural (ATR), políticas públicas setoriais e integração de mercados. Produtos, práticas e processos como o melhoramento genético, a adoção de produtos que aumentem a resiliência e a adaptação climática, o uso de sistemas de gestão conservacionistas/regenerativos e integrados, ferramentas de previsão climática e zoneamento de risco, instrumentos de financiamento, estratégias de ATER e políticas públicas são essenciais. O uso de bioinsumos se insere nesse contexto, sendo um dos principais elementos estratégicos, aumentando a sustentabilidade e, adicionalmente, reduzindo a dependência de insumos externos. Entre os objetivos do uso de biofertilizantes estão a substituição de fertilizantes nitrogenados, a promoção da conservação do solo e da biodiversidade, a promoção de ações de PD&I para o uso descentralizado de bioinsumos e a indução do uso de bioinsumos no Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (MAPA, 2023).

Na próxima seção, discutiremos um estudo de caso que abrange uma ampla gama de resultados de várias publicações, bem como resultados inéditos, sobre o potencial do biofertilizante de fórmula aberta Hortbio®, desenvolvido pela Embrapa Hortaliças, como estratégia para aumentar a resiliência e a adaptação climática, bem como a sustentabilidade agrícola.

3.5 BIOFERTILIZANTE HORTBIO® OPEN FORMULA COMO ESTUDO DE CASO

O Hortbio® é um biofertilizante orgânico, de uso e fórmula livres, registrado pela Embrapa Hortaliças. Para cada 100 L, consiste em 1 kg de farinha de sangue, 4 kg de arroz ou farelo de algodão, 1 kg de farinha de mamona, 2 kg de farinha de ossos, 1 kg de grãos ou sementes de leguminosas trituradas, 1 kg de cinzas, 0,5 kg de açúcar mascavo ou açúcar bruto, 0,5 kg de farinha de milho ou farinha de mandioca, e 88 L de água não clorada (Embrapa Hortaliças, 2012). Microrganismos eficientes são adicionados a esta mistura (EM) - 2 L. Estes são coletados por meio de uma armadilha de arroz cozido (uma bandeja cheia de arroz sem tempero e coberta com pano de sombra) enterrada no solo em áreas preservadas, como uma área com vegetação do tipo Cerradão no setor de Agricultura Orgânica da Embrapa Hortaliças. Antes de adicionar e após a remoção do solo, as colônias microbianas escuras são descartadas, usando apenas as mais claras. O biofertilizante é então arejado por 15 minutos a cada hora, usando um compressor de ar, por 10 dias. O produto final deve ser utilizado na concentração de 5% e tem validade de 30 dias.

A caracterização microbiológica do Hortbio® foi realizada por Bomfim et al. (2024), que encontraram alta diversidade microbiana, totalizando 217 isolados de microrganismos. Destes, 120 eram bactérias (incluindo actinomicetos), 61 eram leveduras e 36 eram fungos filamentosos. O sequenciamento genético mostrou que os principais grupos bacterianos presentes foram Firmicutes, Proteobacteria, Actinomycetes e Bacteroidetes, com predominância de *Bacillus*, *Klebsiella*, *Kurthia*, *Enterococcus*, *Staphylococcus* e *Pseudomonas*. Os gêneros fúngicos mais proeminentes foram *Galactomyces*, *Penicillium*, *Mucor*, *Aspergillus*, *Cladosporium* e *Trichoderma*, enquanto os principais gêneros de leveduras foram *Candida* e *Pichia*. A maior diversidade microbiana ocorreu 10 dias após a inoculação com EM, período em que também foi encontrada a maior concentração de IAA, sugerindo uma possível relação entre esses dois fatores. Assim, o período de maturação de 10 dias seria, em tese, ideal para aplicação em lavouras quando houver necessidade de mitigar estresses abióticos potencializados pelo GCC.

Dentre os microrganismos presentes no Hortbio®, os isolados de *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Klebsiella* e *Streptomyces* são reconhecidos como promotores do crescimento e aumento da tolerância ao estresse hídrico, térmico e salino por meio da síntese de fitohormônios, osmólitos e ativação de enzimas antioxidantes. Dentre os fungos, *Galactomyces candidum* é reconhecido por sua resistência a condições de estresse nutricional e é relatado como um microrganismo endofítico encontrado naturalmente em plantas cultivadas. *Trichoderma harzianum* pode aumentar a tolerância sistêmica das plantas, induzindo mecanismos de tolerância à seca, calor e salinidade por meio de processos como produção de auxina, solubilização de nutrientes e ativação do sistema antioxidante.

Por fim, as leveduras do gênero *Pichia* são descritas como potenciais solubilizantes de fosfato e produtoras de fitohormônios, que auxiliam na nutrição, crescimento e resiliência das plantas, principalmente em solos tropicais como Latossolos óxidos, que possuem alta capacidade de adsorção de fósforo (Bomfim et al., 2024). As características químicas e físico-químicas do Hortbio® também devem ser destacadas e podem ser vistas na Tabela 2.

Como mencionado anteriormente, é nítida a heterogeneidade das formulações de biofertilizantes, o que tem sido um problema para a adoção em massa desse tipo de produto e não é exclusividade da Hortbio®, como claramente demonstrado por Cajamarca et al. (2019a). Maior previsibilidade da fórmula utilizada, concentrações e balanço de nutrientes, bem como seus efeitos nas culturas, é essencial para tal adoção e deve ser o próximo passo no desenvolvimento de biofertilizantes.

Apesar de seu potencial para aumentar a resiliência e a adaptação climática, certos cuidados devem ser tomados ao usar biofertilizantes em geral e, neste caso, com foco no Hortbio®. Conforme demonstrado por Cajamarca et al. (2019a), há grande heterogeneidade nas amostras das matérias-primas utilizadas para a produção, o que pode resultar em produtos com diferentes composições químicas, físico-químicas e microbiológicas. Também existe o risco de contaminação por metais pesados, dependendo do lote de resíduos agroindustriais utilizados. Além disso, processos como a captura de microrganismos no solo podem variar dependendo de diversos fatores, como tipo de solo, vegetação, estado de conservação/preservação da área, características climáticas, entre outros. Os resultados obtidos por Pilon et al. (2019) também apontam para a necessidade de adoção de precauções sanitárias durante a produção do biofertilizante para evitar a contaminação microbiológica por microrganismos potencialmente patogênicos como *E. coli* e *Salmonella* spp.

Tabela 2 – Características químicas e físico-químicas do biofertilizante Hortbio determinadas em diferentes estudos.

Estudar	ph	CE	C	N	C/N	P	K	S	Ca	Mg	Fe	B	Mn	Na		Zn	CD	Pb	Cr	Hg	Ni
			dag/L	g/L		mg/L															
Ludke (2009)	5.2	5.9	0.9*	1.5	6.0	170.5	1861.4	82.3	984.5	495.6	12.5	89.2	9.0	---	0.6	1.4	<0,01	<0,01	0.3	<0,01	0.2
Embrapa Hortaliças (2012)	---	---	---	1.5	---	200.0	1800.0	82.3	1000.0	500.0	12.5	89.2	1.4	---	0.6	1.4	---	---	---	---	---
Cajamarca et al. (2019a)	6.0	5.9	20.3 [#]	4.5	4.5	810.0	2930.0	460.0	3910.0	1000.0	121.15	---	---	---	---	8.8	0.1	---	---	---	---

*Carbono Orgânico; [#]Carbono total determinado pelo CHNS

Fonte: Os autores modificaram a partir dos estudos citados.

*Carbono Orgânico; Carbono total determinado pelo CHNS

Fonte: Os autores modificaram a partir dos estudos citados.

Lenda:

pH - potencial de íons de hidrogênio EC - Condutividade Elétrica

C – Carbono; N – Nitrogênio; C/N – Taxa Carbono-Nitrogênio; P – Fósforo; K – Potássio; S – Enxofre; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; Fe – Ferro; B – Bórum; Mn – Manganês; Na – Sódio; – Cooper; Zn – Zinco; Cd – Cádmio; Pb – Chumbo; Cr – Cromo; Hg – Mercúrio; Ni - Níquel

Em relação à produtividade e qualidade de produtos adubados como Hortbio®, Cajamarca et al. (2019b) e Bomfim et al. (2023) avaliaram seu efeito em condições experimentais (cultivo em vasos e estufas). Os primeiros autores avaliaram a produção de três cultivares de alface crespa utilizando Hortbio® como fonte de nutrientes, enquanto os segundos avaliaram o uso desse produto para a produção de três tipos diferentes de alface (crespa, americana e alface romana). Em ambos os casos, foi possível perceber que seu uso para a mesma planta, mas com material genético diferente, deve ser adaptado. Por exemplo, para duas cultivares, Cajamarca et al. (2019b) encontraram melhor produtividade quando Hortbio® foi diluído para 5%, enquanto para a outra cultivar, a dosagem ideal foi de 10%. Bomfim et al. (2023) encontraram bons resultados para a alface crespa e americana, que apresentaram bom desenvolvimento com doses menores de Hortbio®, enquanto a alface romana apresentou resultados ruins, independentemente da dose utilizada. Em ambos os casos, a dose ótima de biofertilizante foi entre 50 kg N/ha e 150 kg N/ha. Doses mais altas causaram danos morfofisiológicos associados à salinização do solo, bem como características dos solos utilizados com resultados compatíveis com esse processo. Usado na dose correta, o Hortbio® foi capaz de melhorar a qualidade do solo e produzir concentrações de IAA compatíveis com as necessárias para mitigar os efeitos negativos dos estresses abióticos.

Como um produto não comercial, de baixo custo e vinculado à economia circular por meio do reaproveitamento de resíduos agrícolas, e aplicável à produção de culturas predominantemente ligadas à agricultura familiar (hortaliças), o Hortbio® surge como uma solução para aumentar a resiliência e a adaptação climática que se enquadra nos marcos de justiça climática e transição justa do IPCC. Esses conceitos serão discutidos com mais detalhes no próximo tópico.

3.5 CONCEITO DE ESTRUTURAS DE JUSTIÇA CLIMÁTICA E TRANSIÇÃO JUSTA DO IPCC

O termo justiça climática decorre do reconhecimento de que os impactos globais das mudanças climáticas são distribuídos de forma desigual, afetando desproporcionalmente populações de baixa renda, comunidades rurais e pequenos agricultores, que contribuem menos para o aumento das concentrações atmosféricas de GEE. Para essas populações, são necessárias ações como desenvolvimento tecnológico compatível com seu perfil, fontes diferenciadas de financiamento e a existência de políticas públicas para inclusão climática. Essas ações estão intimamente ligadas ao conceito de transição justa, que se refere à necessidade de inclusão social e benefícios equitativos à medida que ocorre a mudança para modelos de produção de baixo carbono e resilientes ao clima (IPCC, 2023).

No contexto rural brasileiro, essas referências se aplicam principalmente à agricultura familiar, cujos agricultores são, em sua maioria, de baixa renda e, por vezes, socioeconomicamente vulneráveis. Eles também enfrentam condições como dificuldades de acesso a financiamento, sistemas agrícolas menos avançados tecnologicamente, baixos níveis de saneamento básico e acesso limitado a informações técnicas

que apoiem a adoção de práticas de mitigação, resiliência e adaptação. Também não é incomum que os agricultores familiares tenham suas áreas de produção localizadas em ambientes frágeis com diversos fatores que dificultam a produção agrícola, como temperaturas extremas, chuvas irregulares, solos degradados e relevo montanhoso. Para mitigar essa condição, é essencial a adoção de práticas e sistemas regenerativos, incluindo o uso de biofertilizantes como agente para aumentar a tolerância a estresses abióticos.

O Hortbio®, como biofertilizante de código aberto e não comercial, desempenha um papel na promoção da justiça climática e de uma transição justa, democratizando a adoção de estratégias para aumentar a resiliência e a adaptação climática, mantendo ou aumentando a sustentabilidade dos sistemas de agricultura familiar. Nesse contexto, foi comprovado que esse biofertilizante tem potencial para mitigar os efeitos negativos das altas temperaturas causadas pela CCG, como demonstrado por Lima et al. (2024) que, simulando o regime de temperatura média projetado para o Brasil em cenários pessimistas de mudanças climáticas, observaram efeitos positivos do uso do Hortbio em comparação com a adubação mineral para atributos morfoagronômicos como pendoamento prematuro, menor incidência de tipburn e clorose, tornando-se uma solução de baixo custo e altamente acessível para adaptação da agricultura familiar.

4 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. O uso de biofertilizantes representa uma importante estratégia para promover a agricultura familiar sustentável e resiliente.
2. Diversas políticas públicas nacionais e agendas internacionais reconhecem o papel desses produtos no aumento da resiliência e adaptação climática.
3. A ciência também comprova esse fato ao apontar para a presença de microrganismos como FMA e PGPR capazes de produzir compostos promotores de crescimento vegetal, como vários hormônios, que têm o potencial de mitigar os impactos negativos dos estresses abióticos.
4. O biofertilizante Hortbio® destaca-se por ser um produto de fórmula aberta, não comercial, com capacidade comprovada de manter a produtividade e reduzir a vulnerabilidade da produção de alface ao calor.
5. Além disso, o Hortbio® contribui para a economia circular ao ser produzido utilizando resíduos agrícolas e agroindustriais como matéria-prima, reduzindo sua pegada ambiental.
6. Embora existam políticas públicas de incentivo ao uso de bioinsumos no Brasil, estas ainda são de alcance limitado para os agricultores familiares, tornando-se necessária a ampliação dos serviços para esse público como estratégia de justiça climática e transição justa.

7. A padronização de biofertilizantes com base científica pode aumentar a segurança, a reprodutibilidade, a escalabilidade e a manutenção das taxas de produção, reforçando seu uso por agricultores familiares.
8. A adaptação climática é essencial para a manutenção da segurança alimentar e nutricional da população brasileira.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo financiamento da pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora ao coautor Carlos Eduardo Pacheco Lima (Processo: 313563/2025-0).

REFERÊNCIAS

- ALATZAS, A. Histonas e hormônios vegetais: novas evidências para uma interação interessante. *Revisão Botânica*, n. 79, p. 317-341, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12229-013-9119-6>.
- ANAND, U. et al. Cenário atual e perspectivas futuras de micróbios endofíticos: candidatos promissores para o manejo de estresse abiótico e biótico para sustentabilidade agrícola e ambiental. *Ecologia Microbiana*, v. 86, p. 1455-1486, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>.
- ASSAD, E. D.; ASSAD, M. L. R. C. L. Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. *Estudos Avançados*, v. 38, n. 112, p. 271-292, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015>.
- BALLARIN, A. S. et al. CLIMBra - conjunto de dados de mudanças climáticas para o Brasil. *Dados Científicos*, v. 10, p. 36, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>.
- BOMFIM, C. A. et al. Caracterização microbiológica e avaliação funcional em formulação feita na fazenda em diferentes épocas de produção. *Revista Caderno Pedagógico*, v. 21, n. 6, p. 1-23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-155>.
- BOMFIM, C. A. et al. Desenvolvimento de tipos de alface e atributos de fertilidade do substrato em resposta a doses de biofertilizante aeróbio. *Jornal de Pesquisa em Ciências Agrícolas*, v. 3, n. 10, e9733102313079, 2023. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.9733102313079>.
- BOUHZAM, I. et al. Avaliação dos impactos ambientais de vários biofertilizantes na Europa: um passo em direção à transição para a economia circular. *Produção e Consumo Sustentáveis*, v. 56, p. 460-476, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.04.012>.
- CAJAMARCA, S. M. N. et al. Desenvolvimento de alface crespa, absorção de nutrientes e tolerância à salinização em resposta a um biofertilizante aeróbio produzido a partir de resíduos agroindustriais. *Jornal Australiano de Ciência Agrícola*, v. 13, n. 10, p. 1659-1667, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.10.p1893>.
- CAJAMARCA, S. M. N. et al. Heterogeneidade na composição química de biofertilizantes, potencial uso agrônomo e teores de metais pesados de diferentes resíduos agroindustriais. *Sustentabilidade*, v. 11, n. 7, p. 1995, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11071995>.
- CONTAG; OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Agricultura familiar e sistemas alimentares: remoção de carbono e transição justa. (Lima, C. E. P.; Rubinstein, F. B. P. L.; Amaral, J. B.; Leal, L. S.; Zoche, R.; Bonetti, S. P., Eds.). Sete Publicações Ltda., 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/livrosindi202507-002>.
- COPÉRNICO. O Relatório Climático Global Copernicus 2024 confirma o ano passado como o mais quente já registrado, primeiro acima de 1,5 °C de temperatura média anual. Copérnico, 10 jan. 2025a. Disponível em: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/copernicus-global-climate-report-2024-confirms-last-year-warmest-record-first-ever-above>. Acesso em: 23 out. 2025.
- COPÉRNICO. Temperatura do ar superficial para janeiro de 2025. Serviço Copernicus para as Alterações Climáticas, 6 fev. 2025b. Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/surface-air-temperature-january-2025>. Acesso em: 23 out. 2025.
- EMBRAPA HORTALIÇAS. Hortbio®: Biofertilizante líquido para produção de hortaliças. Folder técnico. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/946012/1/folder20hortbio.pdf>. Acesso em: 23 out. 2025.

FLORES, B. M. et al. Transições críticas no sistema florestal amazônico. *Natureza*, v. 626, n. 7995, p. 555-562, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06970-0>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Agropecuário 2017: Agricultura Familiar. Governo Federal do Brasil, 2017.

KAHANA, R. et al. Projeções futuras de precipitação para o Brasil e a América do Sul tropical a partir de uma simulação climática que permita a convecção. *Fronteiras no Clima*, v. 6, p. 1419704, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1419704>.

KURNIAWATI, A. et al. Compreender o futuro dos fertilizantes de base biológica: a política e a aplicação da UE. *Química Sustentável para a Ação Climática*, v. 3, Artigo 100033, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100033>.

LI, L. et al. Emissões globais de gases de efeito estufa da agricultura: caminhos para reduções sustentáveis. *Biologia da Mudança Global*, v. 31, n. 1, p. e70015, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.70015>.

MARQUES, M. T. A. et al. Descoberta baseada em dados de mecanismos subjacentes às mudanças e variabilidade da precipitação presente e no futuro próximo no Brasil. *EGUsphere* [pré-impressão], 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-48>.

PANEEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Aquecimento global de 1,5 °C. Relatório Especial do IPCC. 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Acesso em: 23 out. 2025.

PANEEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Resumo para formuladores de políticas. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.). *Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*. Cambridge: Imprensa da Universidade de Cambridge, 2021. p. 3-32. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf. Acesso em: 23 out. 2025.

PANEEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). Resumo para formuladores de políticas. In: REISINGER, A. et al. (Eds.). *Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*. IPCC, 2023. p. 3-36. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf. Acesso em: 23 out. 2025.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável, Irrigação e Cooperativismo. *Estratégia de adaptação à mudança do clima para a agropecuária brasileira*. Brasília: MAPA/SDI, 2023. ISBN 978-85-7991-214-6.

PÉREZ-BERNAL, S. et al. Os biofertilizantes aumentam a eficiência do uso da terra no consórcio entre misturas de culturas e arranjos espaciais. *Fronteiras em Agronomia*, v. 7, p. 1562589, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1562589>.

PILON, L. et al. Qualidade microbiológica de alface fertirrigada por gotejamento com fertilizantes orgânicos ou mineral. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, n. 179, 2019. Embrapa Hortaliças.

PINGALI, P. L. *Revolução Verde: impactos, limites e o caminho a seguir*. Anais da Academia Nacional de Ciências, v. 109, n. 31, p. 12302-12308, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.

SANTOS, M. P. et al. A interação ácido abscísico-óxido nítrico e auxina modula a resposta ao estresse salino em raízes de tomateiro. *Fisiologia Vegetal Teórica e Experimental*, v. 32, p. 301-313, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40626-020-00187-6>.

SELA, S. et al. Rumo a uma abordagem unificada para priorização de práticas agrícolas regenerativas em sistemas de cultivo. *npj Agricultura Sustentável*, v. 2, n. 24, Artigo 224, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44264-024-00031-3>.

TANG, H. et al. O papel crítico dos fungos micorrízicos arbusculares para melhorar a tolerância à seca e a eficiência do uso de nitrogênio nas culturas. *Fronteiras na Ciência das Plantas*, v. 13, p. 919166, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.919166>.

ZHANG, L. et al. O impacto dos insumos químicos agrícolas no meio ambiente: evidências globais da análise e visualização de informações. *Jornal Internacional de Tecnologias de Baixo Carbono*, v. 13, n. 3, p. 338-352, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cty039>.