

Artigo

Tecnologia social e produção microbiológica *on farm* de bioinsumos: validação em condições reais e implicações sociotécnicas para autonomia produtiva

Janaína Tauil Bernardo¹

¹ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS)

janaina-bernardo@uergs.edu.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2461-5910>

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação, em condições reais, de um equipamento microbiológico alternativo para produção *on farm* de bioinsumos fúngicos, concebido como tecnologia social voltada à autonomia produtiva e à democratização do acesso à inovação. A proposta responde a uma lacuna sociotécnica associada à ausência de equipamentos acessíveis para fermentação em substrato sólido, processo relevante para fungos filamentosos por favorecer a produção de conídios, estabilidade do produto e menor risco de contaminação. O equipamento foi desenvolvido de forma iterativa e participativa, com protótipos sucessivos aprimorados a partir do uso e do feedback de produtores. A validação ocorreu por acompanhamento longitudinal (2017–2024) em aproximadamente dez unidades produtivas distribuídas em diferentes regiões do Brasil, sem registro de contaminação atribuída ao equipamento, contaminação cruzada entre microrganismos ou espécies operacionais. O sistema foi utilizado para *Trichoderma spp.*, *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* e *Pochonia chlamydosporia*, associado a uma produção estimada de 384 toneladas de bioinsumos ($3,84 \times 10^{17}$ conídios). Os resultados indicam viabilidade microbiológica, operacional e produtiva e apontam implicações sociotécnicas relevantes para autonomia e inclusão tecnológica em sistemas agroecológicos.

Palavras-chave: tecnologia social, bioinsumos, produção *on farm*, fermentação em estado sólido, autonomia produtiva.

Social Technology and On-Farm Microbial Production of Bio-inputs: Validation Under Real-World Conditions and Sociotechnical Implications for Productive Autonomy

Abstract

This article presents the development and validation, under real-world conditions, of an alternative microbiological device for the on-farm production of fungal bioinputs, conceived as a social technology aimed at productive autonomy and democratization of access to innovation. The proposal addresses a sociotechnical gap associated with the lack of accessible equipment for solid-state fermentation, a process particularly suitable for filamentous fungi. The equipment was developed through an iterative and participatory process and validated between 2017 and 2024 in production units across different regions of Brazil. No contamination attributable to the equipment, cross-contamination among microorganisms, or operational accidents were recorded. The system was used for *Trichoderma spp.*, *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* and *Pochonia chlamydosporia*, and was associated with an estimated production of 384 tonnes of bioinputs. The results indicate microbiological, operational and productive viability, as well as relevant sociotechnical implications for productive autonomy and technological inclusion in agroecological systems.

Keywords: social technology, bioinputs, on-farm production, solid-state fermentation, productive autonomy.

1. Introdução

Nas últimas décadas, os bioinsumos têm se consolidado como alternativa estratégica para a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis, contribuindo para a redução do uso de pesticidas e fertilizantes químicos e a melhoria da eficiência ecológica dos sistemas produtivos. Estudos indicam que microrganismos utilizados como biofertilizantes e agentes de biocontrole podem promover crescimento vegetal, aumentar a tolerância a estresses bióticos e abióticos e reduzir impactos ambientais associados à agricultura convencional (Elnahal *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2026). Esse avanço ocorre em paralelo à expansão da produção *on farm* de bioinsumos, impulsionada pela busca por autonomia produtiva, redução de custos e adaptação às condições locais de produção agrícola (Sousa *et al.*, 2023). Entretanto, o desenvolvimento tecnológico associado à produção de bioinsumos permanece, em grande parte, concentrado em instituições de pesquisa e posteriormente transferido para o setor privado por meio de processos de inovação tecnológica e proteção intelectual, o que pode limitar o acesso a tecnologias adaptadas à realidade de agricultores familiares e sistemas agroecológicos (Goulet, 2023). Como consequência, observa-se a manutenção de dependência tecnológica relacionada ao acesso a equipamentos microbiológicos, formulações comerciais e sistemas produtivos centralizados, restringindo a autonomia produtiva de unidades agrícolas de menor escala.

Embora a produção *on farm* tenha se expandido significativamente no Brasil, esse crescimento não tem sido acompanhado pelo desenvolvimento de tecnologias apropriadas voltadas à produção descentralizada de bioinsumos com elevada qualidade microbiológica, especialmente no que se refere à produção de microrganismos em substrato sólido. Atualmente, observa-se predominância de tecnologias simplificadas baseadas em fermentação líquida para produção *on farm*, devido à menor complexidade operacional inicial. No entanto, para fungos filamentosos utilizados no controle biológico, como espécies do gênero *Trichoderma*, a qualidade do produto final está diretamente associada à produção de estruturas propagativas viáveis, especialmente conídios, fundamentais para a sobrevivência em condições ambientais adversas e para colonização eficiente do solo e da rizosfera.

A fermentação em estado sólido apresenta vantagens microbiológicas relevantes quando comparada à fermentação líquida, incluindo maior produção de esporos, maior estabilidade do produto final, menor atividade de água e, consequentemente, menor risco de contaminação microbiológica (Hölker; Höfer; Lenz, 2004; Pandey; Mitchell, 2000; Singhanian *et al.*, 2009). Além disso, produtos obtidos por fermentação sólida apresentam maior potencial de armazenamento e maior estabilidade quando comparados a formulações líquidas produzidas em sistemas não industriais. Apesar dessas vantagens, observa-se ausência de equipamentos apropriados e acessíveis economicamente para viabilizar a produção *on farm* de bioinsumos sólidos no contexto da agricultura familiar e da agroecologia, caracterizando uma lacuna tecnológica relevante no desenvolvimento de sistemas produtivos descentralizados. Nesse cenário, evidencia-se que o desafio atual da produção *on farm* de bioinsumos não está apenas relacionado ao domínio técnico do cultivo microbiano, mas também à disponibilidade de tecnologias apropriadas que permitam a execução segura, economicamente viável e operacionalmente acessível desses processos em condições produtivas reais. Assim, o conceito de tecnologia social torna-se central para o desenvolvimento de soluções tecnológicas capazes de promover autonomia produtiva, democratização do acesso a bioinsumos e fortalecimento de sistemas agroecológicos. Diante desse contexto, torna-se necessário desenvolver e validar

tecnologias apropriadas que viabilizem a produção descentralizada de bioinsumos fúngicos em substrato sólido, considerando simultaneamente desempenho microbiológico, viabilidade operacional, acessibilidade econômica e impacto territorial em sistemas agroecológicos.

1.1 Dependência tecnológica e produção de bioinsumos no Sul Global

A expansão do uso de bioinsumos nas últimas décadas tem ocorrido de forma desigual entre diferentes regiões do mundo, refletindo assimetrias históricas na produção e circulação do conhecimento científico e tecnológico. Países do Sul Global, embora apresentem elevada biodiversidade e forte potencial para desenvolvimento de soluções biotecnológicas aplicadas à agricultura, permanecem, em grande medida, dependentes de tecnologias desenvolvidas em centros de pesquisa e polos industriais localizados no Norte Global ou em setores industriais concentrados em grandes economias emergentes. No contexto da agricultura sustentável, os bioinsumos representam uma oportunidade estratégica para redução da dependência de insumos químicos e fortalecimento da autonomia produtiva. No entanto, o desenvolvimento tecnológico associado à produção de agentes microbiológicos de controle biológico e biofertilizantes tem sido historicamente estruturado a partir de modelos de inovação centrados em instituições públicas de pesquisa e posteriormente transferidos ao setor privado por meio de mecanismos de proteção intelectual e escalonamento industrial. Esse processo, embora fundamental para a consolidação de mercados e padronização de produtos, pode gerar barreiras de acesso tecnológico para agricultores familiares e sistemas produtivos de menor escala.

No Brasil e em outros países da América Latina, observa-se um crescimento significativo da produção *on farm* de bioinsumos, impulsionado pela necessidade de redução de custos de produção, adaptação às condições ambientais locais e busca por maior autonomia produtiva. Entretanto, a difusão desse modelo produtivo ocorre em cenário marcado por forte dependência tecnológica em relação a equipamentos microbiológicos especializados, formulações industriais e sistemas produtivos centralizados, limitando a capacidade de internalização do conhecimento técnico e de desenvolvimento de soluções adaptadas às realidades territoriais. Além disso, o desenvolvimento tecnológico disponível para produção de bioinsumos tem sido direcionado prioritariamente para modelos industriais de produção em larga escala, com menor ênfase no desenvolvimento de tecnologias apropriadas para sistemas descentralizados de produção agrícola. Essa lógica reforça assimetrias tecnológicas e limita o potencial de democratização do acesso a tecnologias biológicas, especialmente em contextos de agricultura familiar e sistemas agroecológicos, nos quais a autonomia produtiva e a adaptação tecnológica local constituem elementos centrais para sustentabilidade produtiva e territorial. Nesse cenário, a discussão sobre dependência tecnológica na produção de bioinsumos ultrapassa a dimensão puramente técnica, envolvendo aspectos sociotécnicos relacionados à circulação do conhecimento, às estruturas de inovação e às formas de acesso a tecnologias produtivas. Assim, a expansão da produção *on farm* de bioinsumos, embora represente avanço importante na busca por autonomia produtiva, ainda ocorre em ambiente tecnológico marcado por lacunas estruturais relacionadas à disponibilidade de equipamentos acessíveis e adaptados às condições reais de produção agrícola descentralizada.

A difusão tecnológica na agricultura tem ocorrido de forma desigual entre regiões, refletindo assimetrias estruturais na produção e circulação do conhecimento científico. Estudos

indicam que processos de transferência tecnológica desempenham papel central no desenvolvimento produtivo de economias emergentes, mas podem também reproduzir dependências estruturais quando não acompanhados de processos locais de inovação e adaptação tecnológica (Marín-García; Ocampo-López; Padilla Bejarano, 2025; Silva, 1997). No campo da Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), a literatura destaca que tecnologias globais são incorporadas de forma heterogênea em contextos locais, sendo mediadas por estruturas institucionais, políticas e socioeconômicas específicas (Jasanoff, 2004). No contexto agrícola, a adoção tecnológica em países em desenvolvimento é fortemente influenciada por barreiras estruturais, econômicas e institucionais, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de tecnologias apropriadas às realidades produtivas locais (OECD, 2013).

1.2 Lacuna sociotécnica na produção *on farm*: ausência de equipamentos para fermentação em substrato sólido

Apesar do crescimento recente da produção *on farm* de bioinsumos, observa-se que a difusão tecnológica nesse campo tem ocorrido de forma assimétrica, especialmente no que se refere ao acesso a tecnologias capazes de garantir qualidade microbiológica e estabilidade do produto final. No contexto atual, grande parte das tecnologias difundidas para produção descentralizada de microrganismos baseia-se em processos de fermentação líquida, frequentemente associados a protocolos simplificados voltados à viabilização operacional em sistemas produtivos de pequena escala. Entretanto, essa predominância tecnológica não necessariamente reflete a melhor eficiência microbiológica para produção de agentes biológicos de controle, mas sim limitações relacionadas à disponibilidade de equipamentos apropriados e acessíveis economicamente para produção em substrato sólido.

Para fungos filamentosos utilizados no controle biológico, como espécies do gênero *Trichoderma*, a qualidade do produto final está diretamente associada à produção de estruturas propagativas viáveis, especialmente conídios, fundamentais para sobrevivência em condições ambientais adversas e colonização eficiente da rizosfera. Estudos comparativos demonstram que processos fermentativos podem ser conduzidos tanto em fermentação submersa quanto em fermentação em estado sólido, sendo esta última frequentemente associada à maior produção de esporos, maior estabilidade fisiológica e melhor desempenho em aplicações agrícolas (Bulgari *et al.*, 2023; Catalán; Sánchez, 2020; Doriya *et al.*, 2016).

A fermentação em estado sólido caracteriza-se pelo crescimento microbiano em substratos com baixa disponibilidade de água livre, condição que simula de forma mais próxima o ambiente natural de crescimento de fungos filamentosos. Essa característica favorece a produção de metabólitos secundários, enzimas e estruturas propagativas, além de reduzir taxas de contaminação microbiológica devido à menor atividade de água disponível no sistema (Pandey, 2003; Soccol *et al.*, 2017). Além disso, produtos obtidos por fermentação sólida tendem a apresentar maior estabilidade durante armazenamento e transporte quando comparados a formulações líquidas produzidas em sistemas não industriais (Hamrouni *et al.*, 2026; Mascarin; Jaronski, 2016). No contexto da produção *on farm*, formulações líquidas apresentam vantagens operacionais relacionadas à facilidade de preparo e menor necessidade de infraestrutura inicial. Entretanto, tais sistemas podem apresentar limitações relacionadas à estabilidade microbiológica, menor vida útil do produto e maior suscetibilidade a conta-

minações quando produzidos fora de ambientes industriais controlados. Essas limitações tornam-se particularmente relevantes em sistemas de transição agroecológica, nos quais a qualidade microbiológica do insumo assume papel estratégico para recuperação biológica do solo e estabelecimento inicial de comunidades microbianas benéficas.

Apesar do potencial da fermentação em estado sólido para produção de agentes biológicos de controle e bioinsumos agrícolas, observa-se ausência de equipamentos apropriados e acessíveis economicamente capazes de viabilizar a produção descentralizada desses insumos em sistemas produtivos de agricultura familiar e agroecologia. Essa lacuna tecnológica limita a internalização do conhecimento microbiológico nos sistemas produtivos rurais e mantém a dependência de tecnologias industriais ou de protocolos simplificados que não necessariamente maximizam a qualidade microbiológica do produto final. Nesse sentido, a lacuna sociotécnica associada à produção *on farm* de bioinsumos não se restringe à disponibilidade de conhecimento técnico sobre cultivo microbiano, mas envolve também a ausência de tecnologias apropriadas que integrem biossegurança operacional, acessibilidade econômica e adaptação às condições reais de produção agrícola descentralizada. Assim, o desenvolvimento de tecnologias sociais voltadas à produção de bioinsumos sólidos representa estratégia relevante para ampliação do acesso a insumos biológicos de qualidade e fortalecimento da autonomia produtiva em sistemas agroecológicos.

2. Metodologia

2.1 Natureza da pesquisa

O estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada de natureza qualitativa-descritiva, com abordagem de pesquisa-ação e desenvolvimento sociotécnico participativo. O processo envolveu o desenvolvimento iterativo de tecnologia social voltada à produção microbiológica *on farm* de bioinsumos fúngicos, associado à validação longitudinal em condições reais de produção agrícola entre os anos de 2017 e 2024.

A pesquisa foi conduzida a partir da interação contínua entre desenvolvimento técnico do equipamento, acompanhamento de uso em unidades produtivas agrícolas e incorporação de melhorias estruturais baseadas na experiência prática dos usuários. O processo envolveu observação participante, acompanhamento técnico contínuo e adaptação progressiva do equipamento conforme demandas operacionais identificadas durante o uso em campo.

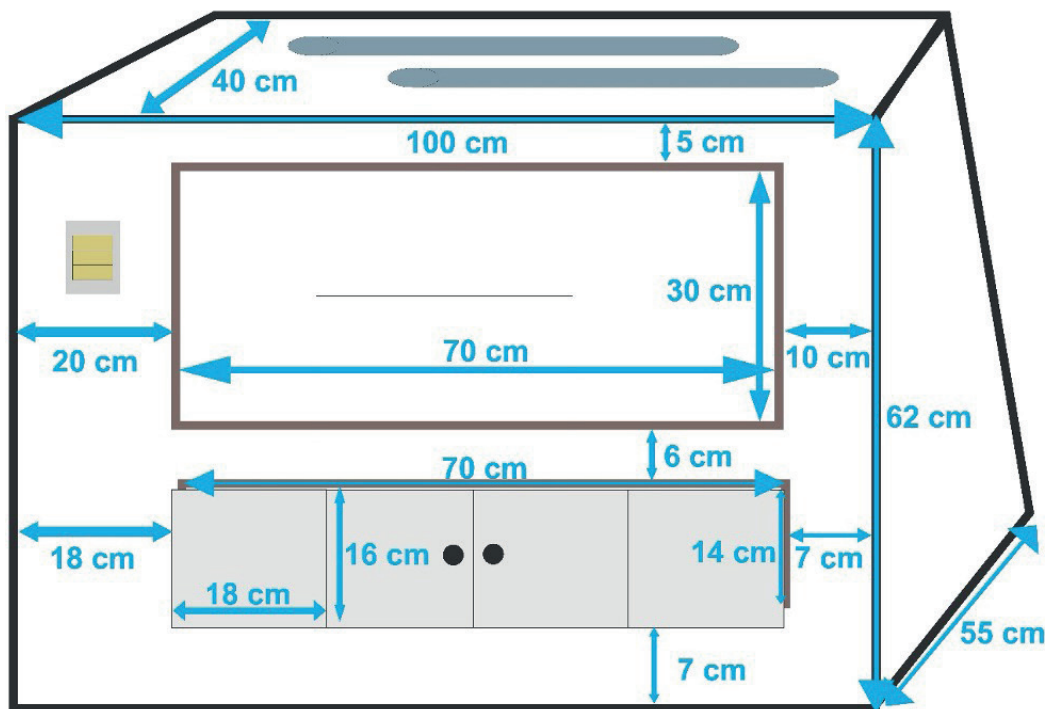
2.2 Desenvolvimento sociotécnico do equipamento

O primeiro protótipo do equipamento microbiológico alternativo foi concebido a partir da identificação de limitações associadas ao uso de câmaras de fluxo laminar convencionais em sistemas descentralizados de produção de bioinsumos, especialmente em regiões afastadas de centros urbanos e assistência técnica especializada. O equipamento foi desenvolvido com foco em acessibilidade econômica, facilidade de manutenção, segurança microbiológica e viabilidade operacional em condições produtivas rurais.

A concepção do equipamento não esteve associada apenas à redução de custos de aquisição quando comparado a equipamentos microbiológicos convencionais, mas também à necessidade de desenvolvimento de uma tecnologia microbiológica compatível com as condições territoriais da produção agrícola descentralizada. Em regiões afastadas de centros urbanos e assistência técnica especializada, a manutenção de equipamentos laboratoriais convencionais frequentemente representa fator limitante para continuidade da produção microbiológica. Nesse contexto, o equipamento foi desenvolvido buscando minimizar dependência de manutenção técnica especializada, reduzir tempo de paralisação produtiva e permitir maior autonomia operacional das unidades produtivas.

O equipamento foi construído em MDF pintado, utilizando sistema de iluminação fria e luz ultravioleta para desinfecção interna, associado à manipulação asséptica com chama aberta. O dimensionamento estrutural foi progressivamente ajustado ao longo do processo de desenvolvimento até atingir configuração considerada operacionalmente adequada para manipulação microbiológica segura, mantendo simultaneamente mobilidade e viabilidade prática de uso em sistemas descentralizados de produção agrícola.

Figura 1 - Esquema estrutural do protótipo inicial do equipamento microbiológico alternativo.



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O processo de desenvolvimento ocorreu de forma iterativa e participativa, envolvendo produtores rurais de diferentes regiões agrícolas brasileiras que utilizaram os protótipos em condições reais de produção microbiológica. As unidades produtivas participantes contribuíram para o custeio da construção dos equipamentos utilizados em suas propriedades, bem como para o acompanhamento técnico e validação operacional do sistema.

Ao longo do processo, modificações estruturais foram incorporadas a partir da experiência prática dos usuários, incluindo alterações ergonômicas, melhorias no sistema de higienização, modificação do sistema de abertura frontal e desenvolvimento de um sistema traseiro deslizante para manutenção e limpeza interna. Também foram incorporadas melhorias relacionadas ao design sanitário do equipamento, incluindo cantos arredondados e redução de áreas de acúmulo de resíduos microbiológicos.

Figura 2 - Equipamento microbiológico alternativo utilizado no Núcleo de Controle de Qualidade da produção *on farm* de bactérias, fisicamente separado da unidade de produção de fungos para prevenir contaminação cruzada, Fazenda Mata do Lobo, Rio Verde, GO (2021).



Fonte: Acervo da autora

2.3 Validação em condições reais de produção agrícola

A validação do equipamento ocorreu entre os anos de 2017 e 2024 em aproximadamente dez unidades produtivas agrícolas distribuídas em diferentes regiões do Brasil, incluindo propriedades localizadas nos estados de Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul. As unidades acompanhadas incluíram sistemas produtivos de grãos, café e cana-de-açúcar, abrangendo inicialmente propriedades empresariais de larga escala e posteriormente contextos de agricultura familiar e produção agroecológica. O equipamento foi utilizado para a produção microbiológica de fungos de interesse agrícola, incluindo espécies do gênero *Trichoderma*, além de *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* e *Pochonia chlamydosporia*.

O equipamento foi utilizado em sistemas produtivos com elevada demanda operacional de bioinsumos, incluindo propriedades agrícolas com áreas superiores a 5.000 hectares e sistemas perenes com utilização microbiológica contínua ao longo do ano agrícola, como cultivos de café.

Durante o período de acompanhamento, foram observados aspectos relacionados à biossegurança microbiológica, ocorrência de contaminação cruzada, ergonomia operacional, durabilidade estrutural, facilidade de manutenção e adaptação às condições reais de produção agrícola.

2.4 Controle de qualidade microbiológico

O controle de qualidade microbiológico dos bioinsumos produzidos foi realizado por meio de metodologias de contagem de conídios e testes de germinação para avaliação de viabilidade microbiológica, conforme protocolos descritos por Pinto e colaboradores (2019) para agentes biológicos de controle utilizados na agricultura.

2.5 Desenvolvimento de tecnologia social para produção microbiológica *on farm*

O desenvolvimento do equipamento microbiológico alternativo teve como ponto de partida a identificação das limitações associadas ao uso de equipamentos comerciais destinados à manipulação microbiológica em ambientes laboratoriais convencionais. Esses equipamentos apresentam alto custo de aquisição, necessidade de assistência técnica especializada e dificuldades de manutenção em regiões afastadas de centros urbanos, fatores que limitam sua adoção por agricultores familiares e sistemas produtivos descentralizados. Nesse contexto, o desenvolvimento do equipamento baseou-se em princípios de tecnologia social, priorizando acessibilidade econômica, facilidade de manutenção, segurança microbiológica e adaptação às condições operacionais da produção agrícola (Mitchell; Berović; Krieger, 2006; Musoni; Destain; Delvigne, 2015). O processo de desenvolvimento ocorreu de forma iterativa, envolvendo construção de protótipos sucessivos, testes em condições reais de uso e incorporação de melhorias a partir do feedback de produtores rurais. O uso do equipamento em sistemas produtivos agrícolas teve início em 2017, com continuidade até 2024, permanecendo em uso em unidades produtivas até o período atual. Ao longo desse período, foram acompanhados processos produtivos utilizando o equipamento em aproximadamente dez unidades produtivas agrícolas, distribuídas em diferentes regiões do Brasil. O acompanhamento longitudinal envolveu unidades produtivas de diferentes cadeias agrícolas, incluindo sistemas de produção de grãos, café e cana-de-açúcar, evidenciando a aplicabilidade do equipamento em distintos contextos produtivos. Adicionalmente, o acompanhamento envolveu unidades produtivas distribuídas em diferentes regiões agrícolas brasileiras, incluindo estados das regiões Norte, Centro-Oeste, Sudeste e Sul, como Tocantins, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul, evidenciando a aplicabilidade do equipamento em diferentes condições ambientais e produtivas. O acompanhamento longitudinal permitiu a coleta de informações relacionadas à operacionalização do equipamento em condições reais de produção agrícola, incluindo aspectos de biossegurança microbiológica, ergonomia operacional, facilidade de higienização e manutenção estrutural. Ao longo desse

período, foram incorporadas melhorias estruturais baseadas na experiência prática dos produtores, caracterizando processo de desenvolvimento sociotécnico participativo.

O primeiro protótipo consistiu em uma caixa microbiológica alternativa desenvolvida com foco na viabilidade operacional e segurança microbiológica. Nessa etapa inicial, foram realizados estudos de dimensionamento estrutural, incluindo altura operacional adequada para manipulação segura com chama aberta, estabilidade térmica do sistema e mobilidade do equipamento. Também foram avaliados aspectos relacionados ao design sanitário, incluindo eliminação de cantos internos pontiagudos que poderiam favorecer acúmulo de resíduos microbiológicos e dificultar processos de higienização.

Após validação inicial, o equipamento foi introduzido em condições reais de uso em sistemas produtivos agrícolas, sendo utilizado em atividades de repicagem de matrizes, produção de pré-matrizes e produção de matrizes microbiológicas. Em algumas propriedades, o equipamento também foi utilizado em etapas de produção massal de bioinsumos. No conjunto das áreas atendidas, o uso do equipamento esteve associado à produção de bioinsumos destinados a sistemas produtivos que totalizam aproximadamente 20.000 hectares. A partir do uso em campo, foram incorporadas melhorias estruturais baseadas na experiência prática dos produtores. Entre as principais modificações implementadas, destaca-se o desenvolvimento de sistema de abertura traseira deslizante, permitindo acesso facilitado para higienização interna e substituição de componentes, como sistemas de iluminação, sem comprometer a vedação microbiológica do equipamento. O sistema foi desenvolvido de forma a garantir encaixe preciso, minimizando pontos de entrada de contaminantes externos. Adicionalmente, foram implementadas melhorias no design frontal do equipamento, incluindo utilização de vidro com cantos arredondados, reduzindo pontos de acúmulo de resíduos microbiológicos e facilitando processos de higienização. O sistema de acesso frontal também foi modificado, passando de sistema de dupla abertura para sistema de abertura única, permitindo maior segurança operacional durante manipulação microbiológica e facilitando descarte de materiais contaminados sem necessidade de deslocamento excessivo do operador.

O equipamento foi construído utilizando materiais compatíveis com processos de higienização química rotineira, permitindo manutenção sanitária adequada em condições produtivas rurais. O conjunto dessas modificações resultou em equipamento microbiológico funcional, adaptado às condições operacionais da produção agrícola descentralizada e compatível com princípios de biossegurança microbiológica.

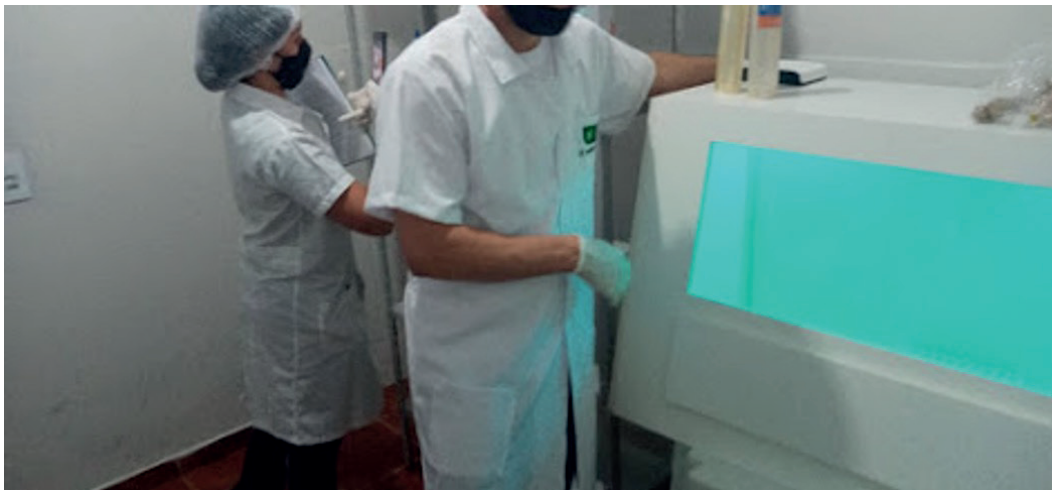
3. Resultados

3.1 Validação microbiológica, operacional e produtiva do equipamento em condições de produção agrícola

A validação do equipamento microbiológico alternativo foi realizada a partir do acompanhamento do uso em condições reais de produção agrícola ao longo do período de 2017 a 2024. Durante esse período, não foram observados eventos de contaminação microbiológica associados ao uso do equipamento, mesmo em condições de alto volume de produção de bioinsumos destinados a áreas agrícolas superiores a 5.000 hectares por unidade produtiva. O

equipamento foi utilizado na manipulação microbiológica de diferentes fungos de interesse agrícola, incluindo espécies do gênero *Trichoderma*, bem como *Metarhizium anisopliae*, *Beauveria bassiana* e *Pochonia chlamydosporia*. Ao longo do período de acompanhamento, não foram identificados eventos de contaminação cruzada entre microrganismos associados ao uso do equipamento, indicando uma eficiência operacional sob condições reais de produção. Adicionalmente, não foram registrados relatos de acidentes relacionados ao uso do equipamento durante o período de acompanhamento. O equipamento permaneceu em uso contínuo nas unidades produtivas acompanhadas, sendo mantido diretamente pelos produtores rurais, sem necessidade de substituição estrutural ao longo do período analisado. Em alguns casos, unidades produtivas que iniciaram o uso do equipamento entre 2017 e 2018 mantêm o uso das mesmas unidades até o período atual, indicando elevada durabilidade operacional em condições produtivas agrícolas.

Figura 3 - Equipamento microbiológico alternativo utilizado na sala de inoculação do Núcleo de produção de Insumo Orgânico para Uso Próprio, destinado à produção *on farm* de fungos para bioinsumos, Fazenda Mata do Lobo, Rio Verde, GO (2021)



Fonte: Acervo da autora

Do ponto de vista produtivo, o uso do equipamento esteve associado à produção de bioinsumos destinados a sistemas produtivos que totalizam aproximadamente 20.000 hectares ao longo do período analisado. Considerando médias operacionais observadas nas unidades produtivas acompanhadas, estima-se aplicação média anual de múltiplos ciclos de bioinsumos por hectare, incluindo aplicações de diferentes fungos de controle biológico em doses médias de aproximadamente 100 g por hectare por aplicação, com múltiplas aplicações anuais, variando conforme sistema produtivo e região agrícola. Nas regiões Centro-Oeste e Norte, observa-se predominância de sistemas produtivos com duas safras anuais, associadas a múltiplas aplicações de bioinsumos ao longo do ciclo produtivo. Em sistemas perenes, como cultivos de café, observa-se uso contínuo ao longo do ano agrícola. Em regiões subtropicais, observa-se menor frequência anual de aplicações, associada à sazonalidade

produtiva. Considerando médias operacionais consolidadas entre os diferentes sistemas produtivos acompanhados, estima-se uma aplicação média anual de aproximadamente 2,4 kg de bioinsumos por hectare, considerando múltiplas aplicações de diferentes fungos de controle biológico. Considerando uma área acumulada de aproximadamente 20.000 hectares ao longo do período de acompanhamento (2017–2024), estima-se produção total aproximada de 384 toneladas de bioinsumos produzidos no período associado ao uso do sistema microbiológico alternativo. Considerando uma concentração média conservadora de aproximadamente 10^9 conídios por grama de bioinsumo produzido, estima-se que o volume total de bioinsumos produzido ao longo do período esteja associado à produção de aproximadamente $3,84 \times 10^{17}$ conídios, evidenciando o potencial de produção microbiológica em escala territorial associado ao uso do sistema microbiológico alternativo.

Os resultados observados ultrapassam a dimensão estritamente técnica da validação microbiológica, evidenciando também processos de internalização tecnológica e aprendizagem sociotécnica em contextos produtivos rurais. A permanência do equipamento em uso contínuo ao longo de vários anos nas unidades produtivas acompanhadas, associada à realização de manutenção pelos próprios usuários, indica não apenas viabilidade operacional, mas também apropriação territorial da tecnologia. Adicionalmente, a utilização do equipamento em diferentes regiões agrícolas e sistemas produtivos evidencia capacidade de adaptação a distintas realidades ambientais e operacionais, aspecto relevante para processos de inovação distribuída e democratização tecnológica na produção de bioinsumos.

Os resultados observados indicam que o equipamento apresenta viabilidade microbiológica, operacional e produtiva em condições reais de produção agrícola, demonstrando o potencial para aplicação como tecnologia social voltada à produção descentralizada de bioinsumos em sistemas agroecológicos e de agricultura familiar.

3.2 Impactos sociotécnicos, autonomia produtiva e democratização tecnológica na produção *on farm* de bioinsumos

A incorporação de tecnologias apropriadas para produção microbiológica *on farm* apresenta impactos que ultrapassam a dimensão estritamente técnica, envolvendo transformações sociotécnicas relacionadas ao acesso à tecnologia, autonomia produtiva e reorganização dos sistemas de produção agrícola.

No contexto da agricultura familiar e de sistemas agroecológicos, a disponibilidade de equipamentos acessíveis economicamente representa fator determinante para internalização de processos produtivos anteriormente restritos a ambientes laboratoriais especializados. Equipamentos comerciais destinados à manipulação asséptica apresentam, em geral, custos elevados de aquisição e manutenção, além de dependência de assistência técnica especializada e disponibilidade de peças de reposição. Em fornecedores brasileiros, equipamentos com funções de proteção microbiológica e manipulação asséptica podem apresentar ampla variação de preço, situando-se em faixas que variam aproximadamente de valores iniciais próximos a R\$ 4 mil até valores superiores a R\$ 15 mil, dependendo do porte, materiais e configuração tecnológica. Nesse cenário, a necessidade de manutenção especializada e substituição de componentes pode representar barreira adicional para adoção em regiões afastadas de centros técnicos especializados.

Considerando a área útil de trabalho do equipamento microbiológico alternativo desenvolvido (0,55 m²) e o custo estimado de construção, situado entre aproximadamente R\$ 1.000 e R\$ 2.000 quando considerada mão de obra especializada, ou entre aproximadamente R\$ 500 e R\$ 1.000 quando produzido diretamente pelos agricultores a partir de modelos técnicos padronizados, observa-se redução expressiva nos custos de acesso à tecnologia microbiológica aplicada. Essa redução de custo contribui para ampliação do acesso à produção microbiológica descentralizada, permitindo que agricultores internalizem etapas estratégicas da produção de bioinsumos. Além do impacto econômico direto, a possibilidade de construção local do equipamento a partir de especificações técnicas padronizadas fortalece processos de autonomia tecnológica e aprendizagem sociotécnica nos territórios rurais. A internalização do conhecimento técnico associado à construção, manutenção e uso do equipamento contribui para redução da dependência de cadeias industriais centralizadas e favorece o desenvolvimento de capacidades técnicas locais, aspecto central em abordagens de tecnologia social e inovação territorial.

Do ponto de vista produtivo, a utilização do equipamento esteve associada à produção estimada de aproximadamente 384 toneladas de bioinsumos ao longo do período de acompanhamento (2017–2024), correspondendo à produção estimada de aproximadamente $3,84 \times 10^{17}$ conídios. Esses valores evidenciam o potencial de produção microbiológica em escala territorial associado ao uso de tecnologias apropriadas de baixo custo (Nguyen *et al.*, 2025; Rodrigues; Fortini; Neves, 2023; Shahzad *et al.*, 2025), reforçando a viabilidade de sistemas descentralizados de produção de bioinsumos em larga escala. Nesse contexto, a redução de barreiras tecnológicas para produção microbiológica contribui diretamente para fortalecimento da autonomia produtiva em sistemas agrícolas, especialmente em cenários de transição agroecológica, nos quais a disponibilidade contínua de bioinsumos de qualidade microbiológica adequada representa fator estratégico para recuperação biológica do solo, redução da dependência de insumos químicos e fortalecimento da resiliência produtiva.

Assim, a incorporação de tecnologias sociais voltadas à produção microbiológica descentralizada representa estratégia relevante para democratização do acesso a tecnologias biológicas, fortalecimento de sistemas produtivos territoriais e redução de assimetrias tecnológicas historicamente presentes nos sistemas agrícolas. Nesse sentido, a tecnologia desenvolvida contribui para ampliação do acesso à produção microbiológica aplicada, fortalecendo processos de soberania tecnológica e produtiva em sistemas agroecológicos e de agricultura familiar.

3.2.1 Implicações ampliadas para inovação sociotécnica e transição agroecológica

Além dos impactos diretos associados à viabilidade microbiológica e produtiva, o desenvolvimento de tecnologias sociais aplicadas à produção de bioinsumos apresenta implicações estruturais para processos de inovação sociotécnica em sistemas agrícolas. Em contextos produtivos marcados por assimetrias históricas de acesso ao conhecimento científico e tecnológico, a disponibilidade de tecnologias apropriadas de baixo custo contribui para reconfiguração das relações entre produção de conhecimento, inovação e uso territorial da tecnologia.

Nos sistemas agrícolas convencionais, a inovação tecnológica frequentemente ocorre por meio de fluxos lineares de transferência tecnológica, nos quais tecnologias são desenvolvidas em centros de pesquisa e posteriormente difundidas para os usuários finais. Entretanto, em

sistemas agroecológicos e de agricultura familiar, observa-se maior relevância de processos de inovação distribuída, baseados na adaptação local de tecnologias, coprodução de conhecimento e interação contínua entre produtores, pesquisadores e instituições locais. Nesse contexto, tecnologias sociais voltadas à produção microbiológica *on farm* contribuem para fortalecimento de ecossistemas locais de inovação, ampliando a capacidade de experimentação, adaptação tecnológica e geração de conhecimento aplicado em escala territorial.

A internalização de processos microbiológicos produtivos em unidades agrícolas também contribui para redução da vulnerabilidade tecnológica associada à dependência de cadeias industriais centralizadas. Em cenários de instabilidade econômica, restrições logísticas ou variações de preços de insumos industriais, a capacidade de produção local de bioinsumos representa estratégia relevante para manutenção da estabilidade produtiva. Esse aspecto torna-se particularmente relevante em contextos de transição agroecológica, nos quais a substituição progressiva de insumos químicos por insumos biológicos exige disponibilidade contínua de produtos microbiológicos com qualidade adequada.

Do ponto de vista ambiental, a produção descentralizada de bioinsumos pode contribuir para redução de impactos associados ao transporte, armazenamento e descarte de embalagens de insumos industriais. Além disso, sistemas baseados em fermentação em substrato sólido apresentam potencial de integração com cadeias locais de aproveitamento de resíduos agroindustriais, fortalecendo estratégias de economia circular e valorização de subprodutos agrícolas.

Outro aspecto relevante refere-se à construção de capacidades técnicas locais. O desenvolvimento e uso de tecnologias microbiológicas apropriadas promove processos de aprendizagem sociotécnica nos territórios rurais, permitindo que agricultores ampliem sua compreensão sobre processos microbiológicos, biossegurança e manejo de insumos biológicos. Esse processo contribui para fortalecimento da autonomia cognitiva e tecnológica dos sistemas produtivos, reduzindo a dependência de assistência técnica externa altamente especializada.

Em perspectiva de longo prazo, o desenvolvimento de tecnologias sociais para produção microbiológica descentralizada pode contribuir para diversificação dos modelos de inovação agrícola, complementando estratégias industriais convencionais. A coexistência de sistemas industriais de larga escala e sistemas descentralizados baseados em tecnologia social amplia a resiliência tecnológica do setor agrícola, permitindo respostas mais adaptativas às demandas ambientais, produtivas e territoriais.

Nesse sentido, a integração entre microbiologia aplicada, tecnologia social e inovação territorial representa estratégia promissora para construção de sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e socialmente inclusivos, especialmente em contextos produtivos caracterizados por forte diversidade ambiental, social e produtiva.

4. Conclusão

Os resultados apresentados demonstram que o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para produção microbiológica *on farm* pode representar estratégia relevante para ampliação do acesso a bioinsumos e fortalecimento da autonomia produtiva em sistemas agrícolas. A validação do equipamento microbiológico alternativo em condições reais de

produção agrícola ao longo de oito anos evidenciou viabilidade microbiológica, operacional e produtiva, incluindo ausência de eventos de contaminação associados ao equipamento, ausência de contaminação cruzada entre diferentes microrganismos manipulados, elevada durabilidade estrutural e segurança operacional em condições produtivas rurais. A utilização do equipamento esteve associada à produção estimada de aproximadamente 384 toneladas de bioinsumos ao longo do período analisado, correspondendo à produção estimada de aproximadamente $3,84 \times 10^{17}$ conídios. Esses resultados evidenciam o potencial de produção microbiológica descentralizada em escala territorial, demonstrando que tecnologias apropriadas de baixo custo podem viabilizar produção microbiológica aplicada em larga escala fora de ambientes laboratoriais convencionais.

Do ponto de vista sociotécnico, a redução expressiva dos custos de acesso a tecnologias de manipulação microbiológica, associada à possibilidade de construção local do equipamento e à redução da dependência de assistência técnica especializada, contribui para fortalecimento de processos de autonomia tecnológica e produtiva em sistemas agrícolas. Esse aspecto apresenta relevância particular em contextos de agricultura familiar e agroecologia, nos quais o acesso a tecnologias apropriadas constitui elemento central para viabilização de sistemas produtivos sustentáveis. Os resultados indicam que a incorporação de tecnologias sociais voltadas à produção microbiológica descentralizada pode contribuir para redução de assimetrias tecnológicas historicamente presentes nos sistemas agrícolas, ampliando o acesso a tecnologias biológicas e fortalecendo capacidades técnicas locais. Nesse sentido, a tecnologia desenvolvida apresenta potencial de contribuição em processos de transição agroecológica, redução da dependência de insumos químicos e fortalecimento da resiliência produtiva em sistemas agrícolas territoriais.

Os resultados indicam que processos de desenvolvimento sociotécnico participativo podem contribuir para construção de tecnologias microbiológicas apropriadas às condições territoriais da produção agrícola descentralizada, fortalecendo simultaneamente autonomia produtiva, aprendizagem técnica local e democratização do acesso à inovação microbiológica.

Por fim, os resultados obtidos indicam a relevância do desenvolvimento de tecnologias apropriadas e socialmente contextualizadas como estratégia complementar ao desenvolvimento tecnológico convencional, contribuindo para construção de modelos produtivos mais sustentáveis, resilientes e tecnologicamente inclusivos.

Referências

- BULGARI, Daniela; ALIAS, Carlotta; PERON, Gregorio; RIBAUDO, Giovanni; GIANONCELLI, Alessandra; SAVINO, Salvatore; BOUREGHDA, Houda; BOUZNAD, Zouaoui; MONTI, Eugenio; GOBBI, Emanuela. Solid-State Fermentation of *Trichoderma* spp.: A New Way to Valorize the Agricultural Digestate and Produce Value-Added Bioproducts. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 9, p. 3994–4004, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c07388>.
- CATALÁN, Eva; SÁNCHEZ, Antoni. Solid-State Fermentation (SSF) versus Submerged Fermentation (SmF) for the Recovery of Cellulases from Coffee Husks: A Life Cycle Assessment (LCA) Based Comparison. **Energies**, v. 13, n. 11, 2685, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112685>.

DORIYA, Kruthi; JOSE, Nisha; GOWDA, Manjunatha; KUMAR, Devarai Santhosh. Solid-State Fermentation vs Submerged Fermentation for the Production of L-Asparaginase. **Advances in Food and Nutrition Research**, v. 78, p. 115–135, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2016.05.003>.

ELNAHAL, Ahmed S. M.; EL-SAADONY, Mohamed T.; SAAD, Ahmed M.; DESOKY, El-Sayed M.; EL-TAHAN, Amira M.; RADY, Mostafa M.; ABUQAMAR, Synan F.; EL-TARABILY, Khaled A. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review. **European Journal of Plant Pathology**, v. 162, p. 759–792, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7>.

GOULET, Frédéric. On-farm agricultural inputs and changing boundaries: Innovations around production of microorganisms in Brazil. **Journal of Rural Studies**, v. 101, 103070, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103070>.

HAMROUNI, Rayhane; WALKER, Vincent; FARNET-DA SILVA, Anne-Marie; BRESSON, Hervé; ROUSSOS, Sevastianos; DUPUY, Nathalie. Biopesticide Production from *Trichoderma harzianum* by Solid-State Fermentation: Impact of Drying Process on Spore Viability. **Fermentation**, v. 12, n. 1, 19, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/fermentation12010019>.

HÖLKER, Ulf; HÖFER, Markus; LENZ, Jürgen. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 64, n. 2, p. 175–186, abr. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1504-3>

HÖLKER, Ulf; LENZ, Jürgen. Solid-state fermentation—are there any biotechnological advantages?. **Current Opinion in Microbiology**, v. 8, n. 3, p. 301–306, jun. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2005.04.006>.

JACKSON, Mark A.; DUNLAP, Christopher A.; JARONSKI, Stefan T. Ecological considerations in producing and formulating fungal entomopathogens for use in insect biocontrol. **Biocontrol**, v. 55, n. 1, p. 129–145, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10526-009-9240-y>.

JARONSKI, Stefan T. **Mass production of entomopathogenic fungi for biological control of insects**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, ; Agricultural Research Service, 2016.

JASANOFF, Sheila. **States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order**. Routledge, 2004.

MARÍN-GARCÍA, Edward Jhohan; OCAMPO-LÓPEZ, Carlos; PADILLA BEJARANO, José Bestier. Impact of technology transfer on food security in developing territories: a bibliometric analysis and systematic literature review. **Sustainable Futures**, v. 10, 100770, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100770>.

MASCARIN, Gabriel Moura; JARONSKI, Stefan T. The production and uses of *Beauveria bassiana* as a microbial insecticide. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 32, 177, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2131-3>.

- MITCHELL, David A.; BEROVIĆ, Marin; KRIEGER, Nadia (eds.). **Solid-State Fermentation Bioreactors: Fundamentals of Design and Operation**. Springer, 2006.
- MUSONI, Michel; DESTAIN, Jacqueline; DELVIGNE, Frank. Bioreactor design and implementation strategies for the cultivation of filamentous fungi and the production of fungal metabolites: from traditional methods to engineered systems. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, v. 19, n. 4, p. 430–442, 2015.
- NGUYEN, Huu-Thanh; PHAM, Thuy-Trang; NGUYEN, Phu-Tho; DINH, Nguyen-Chau-Giang; LE, Minh-Tuan; NGUYEN, Thanh-Dung; NGUYEN, Thi-Tho; NGUYEN, Van-Ba et al. Microbial biocontrol in agriculture: from mechanistic understanding to field application. **Discover Plants**, v. 2, 334, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44372-025-00421-y>.
- OECD. **Agricultural Innovation Systems: A Framework for Analysing the Role of the Government**. Paris: OECD Publishing, 2013.
- PANDEY, Ashok. Solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 81–84, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(02\)00121-3](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(02)00121-3).
- PANDEY, Ashok; SOCCOL, Carlos Ricardo; MITCHELL, David. New developments in solid-state fermentation: bioprocesses and products. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 1153–1169, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7).
- PINTO, Zayame Vegette; LUCON, Cleusa Maria Mantovanello; BETTIOL, Wagner. Controle de qualidade de produtos biológicos à base de *Trichoderma*. In: MEYER, Maurício César; MAZARO, Sérgio Miguel; SILVA, Juliano Cesar da (Ed.). **Trichoderma: uso na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. pt. 3, cap. 9, p. 275–295.
- RODRIGUES, Loredany Consule Crespo; FORTINI, Rosimere Miranda; NEVES, Mateus de Carvalho Reis. Impacts of the use of biological pest control on the technical efficiency of the Brazilian agricultural sector. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 1, p. 1–16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04032-y>.
- SHAHZAD, Muhammad; HAYAT, Rifat; MUJTABA, Ghulam; REHMAN, Waseem Ur; NADEEM, Muhammad et al. Biofertilizers in sustainable agriculture: mechanisms, applications, and future prospects. **Discover Agriculture**, v. 3, 224, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00318-0>.
- SILVA, José de Souza. Transferência de tecnologia agrícola para países em desenvolvimento sob o ponto de vista do paradoxo da cooperação-competição. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 14, n. 1, 1997.
- SILVA, Maria da Gloria Conceição da; MEDEIROS, Anderson Oliveira de; ROQUE, Bruno Augusto Cabral; SANTOS, Maryana Rogéria dos; BEZERRA, Káren Gercyane Oliveira; ALMEIDA, Fabíola Carolina Gomes de; SARUBBO, Leonie Asfora. Next-Generation Bioinputs: A Systematic Review of Biosurfactants in Sustainable Agriculture and Research Frontiers with Bacterial Cellulose. **Processes**, v. 14, n. 3, art. 398, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr14030398>.

SINGHANIA, Ritesh R.; PATEL, Ashok K.; SOCCOL, Carlos Ricardo; PANDEY, Ashok. Recent advances in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 44, p. 13–18, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.10.019>.

SOCCOL, Carlos Ricardo; FERREIRA DA COSTA, Eduardo Scopel; LETTI, Luiz Alberto Junior; KARP, Susan Grace; WOICIECHOWSKI, Adenise Lorenci; VANDENBERGHE, Luciana Porto de Souza. Recent developments and innovations in solid state fermentation. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 1, p. 52–71, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biori.2017.01.002>.

SOUSA, Fernanda Bittar de. **Bioinsumos *on farm* e regulamentação para boas práticas de produção**. 2023. Dissertação (Mestrado em Direito do Agronegócio e Desenvolvimento) — Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2023.

Recebimento: 30/1/ 2026

Avaliação: 25/5/2026

Aceite: 3/8/2026



www.revistabrasileiradeestudoscts.com

Essa publicação é exclusiva da Rev. Bras. Est. CTS.
A tradução e a revisão dos textos submetidos
são de inteira responsabilidade dos autores e co-autores.

Este é um artigo em acesso aberto distribuído nos termos da
Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.



**Revista Brasileira
de Estudos CTS**

Mantenedora

